

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Гапонова Оксана Петрівна

УДК 669.056.99:621.793/.795:620.22.017(043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ
КЕРУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЯМИ ПОВЕРХОНЬ СТАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ
ЕЛЕКТРОІСКРОВИМ ЛЕГУВАННЯМ У СПЕЦІАЛЬНИХ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ
Спеціальність 05.02.01 – «Матеріалознавство»
(13 – Механічна інженерія)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ (О.П. Гапонова)

Науковий консультант Тарельник Вячеслав Борисович,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Гапонова О.П. Керування властивостями поверхонь сталених деталей електроіскровим легуванням у спеціальних технологічних середовищах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство (13 – механічна інженерія). Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка МОН України, Харків, 2021.

У дисертаційній роботі представлені науково обґрунтовані результати, які узагальнюють та забезпечують вирішення актуальної науково-технічної задачі – підвищення довговічності деталей динамічного обладнання шляхом керування структурою та властивостями технологічних матеріалів. На основі досліджень розроблена, науково обґрунтована та апробована новий спосіб отримання багатокомпонентних покриттів методом ЕІЛ, який полягає в створенні на оброблюваній поверхні СТС, що забезпечує насичення поверхні не струмопровідними матеріалами (сіркою, азотом, бором тощо). Розглянуті два механізми формування покриттів: із використанням графіту в якості електродного матеріалу (ЕМ) і формуванні на оброблюваній поверхні дифузійних шарів, та із застосуванням в якості ЕМ сплавів / металів, при цьому отримане покриття формується за рахунок масопереносу ЕМ і дифузійних процесів. Розроблені та апробовані нові технології цементації, азотування, сульфидування, алітування, а також отримання покриттів багатокомпонентних систем S-C, S-Al, Al-C-S, Al-C-B, Mo-S на основі методу ЕІЛ. На основі металографічних, дюрOMETричних, рентгенографічних досліджень, а також локального мікрорентгено-спектрального аналізу, визначення зносостійкості та жаростійкості покриттів встановлений взаємозв'язок між параметрами «склад електродних матеріалів та СТС – структура покриття – технологія отримання – властивості».

Розроблено нові підходи до теоретичної оцінки якості покриттів, отриманих методом ЕІЛ. Використовуючи термодинамічний підхід,

розроблена математична модель прогнозування параметрів якості поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ з використанням спеціального технологічного середовища, що дозволяє прогнозувати структуру та основні параметри покриття. На основі аналізу експериментальних даних згідно запропонованої моделі розраховані основні показники моделі, що дозволяють для даної пари електродів прогнозувати товщину покриття, його мікротвердість, суцільність, шорсткість.

Запропоноване застосування синергетичних законів опису самоорганізації процесу ЕІЛ, на основі вивчення фазових переходів динамічних складових цього процесу за допомогою методу фазової площини і дослідженням розв'язання рівняння Ланжевена. Показано, що поблизу стаціонарних точок на фазових портретах можна бачити або уповільнення еволюції, або спіральне закручування частки процесу дифузії. Знаючи межі зміни значень температури чи концентрації атомів на поверхні, можна керувати процесом отримання покриттів методом ЕІЛ.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що згідно представлених нових науково-обґрунтованих теоретичних та експериментальних результатів встановлені закономірності структуро- і фазоутворення функціональних покриттів, отриманих методом ЕІЛ з використанням СТС. Отримані дані дозволяють з високою точністю прогнозувати основні технологічні параметри покриття з метою забезпечення надійності та довговічності деталей динамічного обладнання (ДО).

Наукова новизна одержаних результатів

Вперше:

1. Одержано залежності особливостей формування фазового складу та структури обробленої поверхні вуглецевих сталей після формування однокомпонентних покриттів методом ЕІЛ з використанням СТС (алітування, цементація) та показано, що після оброблення досягається підвищення товщини та мікротвердості робочого шару.

2. Установлена можливість одержання сульфідованих шарів під час

оброблення сталевих поверхонь ЕІЛ з використанням СТС, що містить сірку, компактним графітовим електродом та електродом-інструментом із металевого дроту, що забезпечує поряд зі зміцненням меншу схильність поверхонь від схоплення деталей у спряженнях під час тертя.

3. Отримані азотовані та нітроцементовані поверхні сталевих деталей новим екологічно безпечним і менш енергозатратним методом ЕІЛ з використанням СТС. Установлений взаємозв'язок між структурою та параметрами ЕІЛ.

4. Проведено одночасне насичення сталі вуглецем, алюмінієм і бором методом ЕІЛ із застосуванням СТС. Установлено, що фазовий склад покриттів на сталях 20 і 40 представлений твердими розчинами ОЦК та ГЦК, інтерметалідом Fe_4Al_{13} і легованим бороцементитом $Fe_3(CB)$. Утворення цих фаз сприяє значному зміцненню і збільшенню мікротвердості поверхневого шару до 12 350 МПа.

5. Під час дослідження сульфомолібденових покриттів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС, за допомогою рентгенографічного аналізу встановлена наявність дисульфиду молібдену як на поверхні (до 8 % за мас.), так і на глибині 15 мкм (до 5 % за мас.), що запобігає схоплюванню поверхонь тертя в період припрацювання і сприяє підвищенню зносостійкості та довговічності деталей у трибоспряженнях.

6. Запропоновані рівняння прогнозування показників структури (товщини, суцільності), механічних властивостей (мікротвердості) та геометричних параметрів (шорсткості) однокомпонентних і багатокомпонентних покриттів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС, від параметрів процесу ЕІЛ, що дозволяє цілеспрямовано встановлювати алгоритм подальшого впливу для забезпечення потрібних властивостей поверхні деталей ДО.

Набуло подальшого розвитку математичне моделювання формування покриття, що ґрунтується на методі фазової площини і статистичного аналізу. Розроблена модель описує особливості утворення покриттів під час

ЕІЛ із застосуванням СТС. Побудовано фазові портрети температури та напруження від концентрації речовини, що показують існування стаціонарного стану системи «покриття-основа», та свідчать про дифузійний характер ЕІЛ покриттів.

Практичне значення отриманих результатів.

Розробки захищені 34 патентами, зокрема 13 на винахід, були виконані на підприємствах ТОВ «ТРИЗ», м. Суми (2019–2020 р.), АТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання» (2019 р.), ПАТ «Сумихімпром» (2020 р.), КП «Міськводоканал» (2019 р.), АТ «Сумський завод насосного та енергетичного машинобудування «НАСОСЕНЕРГОМАШ» (2020 р.), ТОВ «Науково-впровадницьке підприємство СУМИПЛАСТПОЛІМЕР» (2020 р.), кафедрі технічного сервісу Сумського національного аграрного університету, де для виконання нових технологій розроблені та затверджені спеціальні технічні умови.

Очікуваний економічний ефект від упровадження нових технологій, захищених патентами, становить 1 млн 171 тис. грн.

Розробки, які виконані в дисертаційній роботі, використовуються в учбовому процесі: лекційних курсах для бакалаврів, магістрів та аспірантів за спеціальностями «Матеріалознавство», «Галузеве машинобудування» та використовувались при підготовці методичних матеріалів (курси «Наплавлення та споріднені технології», «Технологія нанесення та властивості покриттів», «Дизайн нових матеріалів», «Технологія виробництва та обробки матеріалів», «Наукові основи вибору матеріалу і прогресивних зміцнюючих технологій», «Механічні властивості та зносостійкість матеріалів і виробів», «Сплави з особливими властивостями»).

Основні результати дисертаційної роботи, їх узагальнення та викладені наукові положення та висновки, що становлять суть роботи, отримані та сформульовані авторкою самостійно. Внесок у публікації, написаних у співавторстві, Гапоновій О.П. належить 40-100%. Вони включають теоретичні, експериментальні дослідження та промислові випробування.

Результати розглядались та обговорювались на Міжнародних науково-практичних конференціях в Україні та закордоном.

Ключові слова: електроіскрове легування, мікроструктура, мікротвердість, термодинамічна модель, зносотійкість.

Перелік опублікованих праць за темою дисертації

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Проблеми безпечної експлуатації компресорного та насосного обладнання в сучасній промисловості : колективна монографія / В. С. Марцинковський та ін. ; за ред. В. Б. Тарельника, Є. В. Коноплянченка. Суми : ФОП Литовченко Є. Б., 2020. 410 с.

2. Екологічна безпека експлуатації компресорного і насосного обладнання : монографія / В. А. Марцинковський, В. Б. Тарельник, Б. Антошевський та ін. ; за ред. О. В. Радіонова. Суми : Сумський державний університет, 2018. 282 с.

3. Современные энергоэффективные технологии реализации инженерных задач динамического оборудования : монография / под ред. В. А. Марцинковского, В. С. Марцинковского, В. Б. Тарельника и др. Сумы : Тритория, 2017. 292 с.

4. Assessment of Technological Capabilities for Forming Al-C-B System Coatings on Steel Surfaces by Electrospark Alloying Method / В. Antoszewski, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk at al. *Materials*. 2021. 14. 739.

5. Повышение экологической безопасности формирования износостойких покрытий на поверхностях деталей типа тел вращения из стали 12Х18Н10Т с применением комбинированной технологии на основе электроискрового легирования / В.Б. Тарельник, О.П. Гапонова, В.Б. Лобода и др. *Электронная обработка материалов*. 2020. Т. 56 (5). С. 115–127.

6. Myslyvchenko O. M., Gaponova O. P., Tarelnyk V. B., Krapivka M. O. The Structure Formation and Hardness of High-Entropy Alloy Coatings Obtained by Electrospark Deposition. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2020.

Vol. 59 (3–4). P. 201–208.

7. Tarel'nyk V. B., Gaponova O. P., Myslyvchenko O. M., Sarzhanov B. O. Electrospark Deposition of Multilayer Coatings. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2020. Vol. 59 (1–2). P. 76–88.

8. Cementation of steel details by electrospark alloying / V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, G. V. Kirik et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2020. Vol. 42 (5). P. 655–667.

9. Effect of Laser Processing on the Qualitative Parameters of Protective Abrasion-Resistant Coatings / V. B. Tarel'nyk, Ye. V. Konoplianchenko, O. P. Gaponova et al. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2020. Vol. 58. P. 703–713.

10. Technology support for protecting contacting surfaces of half-coupling – Shaft press joints against fretting wear / V. Martsynkovskyy, V. Tarel'nyk, Ye. Konoplianchenko, O. Gaponova, M. Dumanchuk. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, 2020. P. 216–225.

11. Гапонова О. П., Гецович Є. М. Розробка технології нанесення Al-C-S покриттів сталевих поверхонь методом електроіскрового легування. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. 2020. № 1 (39). С. 3–6.

12. Гапонова О. П. Дослідження якості сульфолітованих покриттів на сталевих поверхнях, отриманих методом електроіскрового легування. *Інженерія природокористування*. 2020. № 3. С. 86–93.

13. Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. III. The Influence of the Main Technological Parameters on Microgeometry, Structure and Properties of Electrolytic Erosion Coatings / V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 3. P. 313–335.

14. Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers

by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. II. The Analysis of a Stressedly-Deformed State of Surface Layer after a Surface Plastic Deformation of Electroerosive Coatings / V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 2. P. 173–192.

15. Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. I. Features of Formation of the Combined Electroerosive Coatings on Special Steels and Alloys / V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 1. P. 47–69.

16. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Myslyvchenko O. M. Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospark Alloying. Part I. Structural-Phase State of the Steel Surface after Aluminizing. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 10. P. 1377–1394.

17. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P. Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospark Alloying. Part II. Mathematical Model of the Aluminizing Process. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 1. P. 1483–1498.

18. Estimating qualitative parameters of aluminized coating obtained by electric spark alloying method / O. Gaponova, C. Kundera, G. Kirik et al. *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings. NAP 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2019. P. 249–266.

19. Тарельник В. Б., Гапонова О. П. Підвищення експлуатаційних характеристик і екологічної безпеки деталей машин та інструменту електроіскровим легуванням. *Компрессорное и энергетическое машиностроение.* 2019. № 1 (55). С. 2–7.

20. Гапонова О. П. Структурно-фазовий стан жаростійких покриттів, отриманих методом електроіскрового легування *Компрессорное и энергетическое машиностроение.* 2019. № 2 (55). С. 2–6.

21. Гапонова О. П. Аналіз якості комплексних сульфоцементованих покриттів, отриманих методом електроіскрового легування. *Наукові нотатки*. 2019. Вип. 67. С. 24–28.

22. Підвищення якості робочих поверхонь деталей з аустенітних хромонікелевих сталей методом електроіскрового легування / В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, О. М. Мисливченко та ін. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2019. Вип. 205: Проблеми надійності машин. С. 320–329.

23. Гапонова О. П. Аналіз якості сульфоцементованих покриттів, отриманих методом електроіскрового легування. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2019. Вип. 205: Проблеми надійності машин. С. 339–349.

24. Тарельник В. Б., Гапонова О. П., Саржанов Б. А. Спосіб екологічно безпечного зміцнення деталей з листової сталі методом електроерозійного легування графітовим електродом. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2019. № 2 (20). С. 118–126.

25. Improvement in Babbit Sliding Bearing Quality with Electrospark Alloying / V. B. Tarelnik, V. S. Martsinkovskii, E. V. Konoplyanchenko, A. V. Belous, O. P. Gaponova. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2018. Vol. 54, Issue 7–8. P. 598–604.

26. Quality Analysis of Aluminized Surface Layers Produced by Electrospark Deposition / G. V. Kirik, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk et al. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2018. Vol. 56, Issue 11–12. P. 688–696.

27. The Analysis of a Structural State of Surface Layer after Electroerosive Alloying. II. Features of Formation of Electroerosive Coatings on Special Steels and Alloys by Hard Wear-Resistant and Soft Antifriction Materials / V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2018. Vol 40, No. 6. P. 795–815.

28. The Analysis of a Structural State of Surface Layer after Electroerosive

Alloying. I. Features of formation of electroerosive coatings on steel 45 / V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2018. Vol. 40, No. 2. P. 235–254.

29. Electrosark Graphite Alloying of Steel Surfaces: Technology, Properties, and Application / V. B. Tarelnik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, O. P. Gaponova. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry.* 2018. Vol. 54, No. 2. P. 147–156.

30. Ecologically Safe Process for Sulfo-Aluminizing Steel Parts / L. D. Plyatsuk, V. B. Tarelnyk, Cz. Kundera, O. V. Radionov, O. P. Gaponova. *Journal of Engineering Sciences.* 2018. Vol. 5, Issue 1. P. C 16–C 20.

31. Тарельник В. Б., Гапонова О. П., Радионов А. В. Повышение уровня экологической безопасности при использовании интегрированных способов повышения качества стальных деталей. *Наукові нотатки.* 2018. Вип. 63. С. 214–220.

32. Use of sulphiding by electroerosion alloying method for scuff resistance increase of steel and cast iron parts friction surfaces / V. B. Tarelnyk, V. S. Martsynkovskyy, Ye. V. Konoplianchenko, O. P. Gaponova, V. P. Yaremenko. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів.* 2018. № 11. С. 20–26.

33. Исследование свойств жаростойких функциональных покрытий, сформированных методом электроискрового легирования / В. Г. Кирик, В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова и др. *Компрессорное и энергетическое машиностроение.* 2018. № 4 (54). С. 17–22.

34. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Konoplianchenko Ye. V., Dovzhyk M. Ya. Investigation of regularities of the processes of formation of surface layers with electroerosive alloying. Part II. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2017. Vol. 39, No. 3. P. 363–385.

35. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Konoplyanchenko Ye. V., Dovzhyk M. Y. Investigation of regularities of the processes of formation of

surface layers with electroerosive alloying. Part 1. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2016. Vol. 38, No. 12. P. 1611–1633.

36. Спосіб сульфидування поверхні сталевих і чавунних деталей методом електроерозійного легування : пат. 117528 України на винахід, МПК В23Н 1/04 (2006.01), С23С 8/60 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Жуков О. М., Косенко П. В., Гапонова О. П. ; заявл. 24.11.2016 ; опубл. 10.08.2018, Бюл. № 15. 8 с.

37. Спосіб сульфоцементатії поверхні сталеві деталі : пат. 117867 України на винахід, МПК В23Н 1/00 В23Н 9/02, С23С 8/66 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Жуков О. М., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В. ; заявл. 22.12.2016 ; опубл. 10.10.2018, Бюл. № 19. 9 с.

38. Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей : пат. 121343 України на винахід, МПК (2020.01) В23Н 1/06 (2006.01) В23Н 9/00 С23С 12/02 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В.; Тарельник Н. В., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевський Б., Кундера Ч.; заявл. 29.05.2018; опубл. 12.05.2020, Бюл. № 9. 5 с.

39. Способ сульфоцементации стальных деталей : пат. 2663799 РФ на изобретение, МПК В23Н 1/00 (2006.01), В2Н 9/00 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковский В. С., Белоус А. В., Жуков А. Н., Гапонова О. П., Коноплянченко Е. В. ; заявл. 30.12.2016 ; опубл. 09.08.2018, Бюл. № 22. 15 с.

40. Способ восстановления изношенных поверхностей деталей машин из нержавеющей стали : пат. 2698001 РФ на изобретение, МПК В23Р 6/00 (2006.01), В23Н 5/02 (2006.01) / Марцинковский В. С., Тарельник В. Б., Гапонова О. П., Тарельник Н. В., Коноплянченко Е. В., Павлов О. Г., Саржанов Б. А., Антошевский Б. ; заявл. 26.09.2018 ; опубл. 21.08.2019, Бюл. № 24. 20 с.

41. Способ сульфоцементации стальных деталей : пат. RU 2707776 РФ на изобретение, С1 (51) МПК, В23Н 1/00 (2006.01), В23Н 9/00 (2006.01) /

Марцинковський В. С., Тарельник В. Б., Тарельник Н. В., Коноплянченко Е. В., Гапонова О. П., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевський Б., Кундера Ч. ; заявл. 25.07.2018 ; опубл. 29.11.2019, Бюл. № 34. 11 с.

42. Способ повышения износостойкости стальных деталей : пат. 2711074 РФ на изобретение, МПК В23Н 9/00 (2006.01), С23С 28/00 (2006.01) / Марцинковський В. С., Тарельник В. Б., Гапонова О. П., Тарельник Н. В., Коноплянченко Е. В., Саржанов А. А., Саржанов Б. А., Антошевський Б. ; заявл. 11.04.2019 ; опубл. 15.01.2020, Бюл. № 2. 18 с.

43. Способ алитирования стальных деталей : пат. RU 2696616С1 на изобретение, МПК В23Н9/00 (2006-01-01) / Марцинковський В. С., Тарельник В. Б., Тарельник Н. В., Коноплянченко Е. В., Гапонова О. П., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевський Б., Кундера Ч. ; заявл. 04.06.2018 ; опубл. 06.08.2019, Бюл. № 22. 8 с.

44. Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей : пат. 121346 України на винахід, МПК (2020.01) В23Н 1/06 (2006.01), В23Н 9/00, С23С 12/02 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Е. В., Тарельник Н. В., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевський Б., Кундера Ч. ; заявл. 06.07.2018 ; опубл. 12.05.2020, Бюл. № 9. 8 с.

45. Спосіб відновлення зношених поверхонь деталей машин з нержавіючої сталі: пат. 121614 України на винахід: МПК (2020.01), В23Н 5/02 (2006.01), С23С 28/00 В23Р 6/00 / Тарельник В.Б., Марцинковський В.С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Павлов О. Г., Саржанов Б. О., Антошевський Б.; заявл. 12.09.2018; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12. 20 с.

46. Спосіб прогнозування якісних параметрів поверхневого шару при зміцненні сталевих деталей методом електроерозійного легування : пат. 121427 України на винахід, МПК (2020.01), В23Н 1/00, В23Н 1/04 (2006.01), В23Н 9/00, С23С 10/48 (2006.01), В23Р 6/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Лазоренко А. Д. ; заявл. 03.07.2018 ;

опубл. 25.05.2020, Бюл. № 10. 19 с.

47. Спосіб підвищення зносостійкості сталевих деталей : пат. 123025 України на винахід, МПК (2021.01), В23Н 1/06 (2006.01), В23Н 9/00, С23С 4/067 (2016.01), С23С 4/10 (2016.01), С23С 4/131 (2016.01), С23С 12/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В.С., Гапонова О.П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Саржанов О. А., Саржанов Б. О., Антошевський Б. ; заявл. 12.10.2020 ; опубл. 03.02.2021, Бюл. № 5. 16 с.

48. Спосіб формування пакетів гнучких елементів пружних муфт : пат. 123026 України на винахід, МПК (2021.01), F16D 3/56 (2006.01), С10М 101/02 (2006.01), С10М 103/04 (2006.01), С10М 111/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Думанчук М. Ю., Тарельник Н. В. ; заявл. 26.10.2020 ; опубл. 03.02.2021, Бюл. № 5. 6 с.

49. Спосіб сульфидування поверхні сталевих і чавунних деталей методом електроерозійного легування : пат. 115059 України на корисну модель, МПК (2017.01), В23Н 1/00, С23С 8/60 (2006.01), С22С 37/00, С22С 37/06, С22С 37/08 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Жуков О. М., Косенко П. В., Гапонова О. П. ; заявл. 24.11.2016 ; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6. 8 с.

50. Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей : пат. 119316 України на корисну модель, МПК (2017.01), С23С 10/48 (2006.01), В23Н9/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Антошевський Б., Кундера Ч., Жуков О. М. ; заявл. 27.02.2017 ; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18. 16 с.

51. Спосіб сульфоцементації сталевих деталей : пат. 119318 України на корисну модель, МПК (2017.01), В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 8/60 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Антошевський Б., Кундера Ч., Жуков О. М. ; заявл. 27.02.2017 ; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18. 9 с.

52. Спосіб підвищення зносостійкості робочих поверхонь сталевих кілець імпульсних торцевих ущільнень : пат. 119319 України на корисну

модель, МПК (2017.01), В23Н 9/00, С23С 8/00, F16J 15/16 (2006.01), F16J 15/16 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Антошевський Б., Кундера Ч., Жуков О. М. ; заявл. 27.02.2017 ; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18. 9 с.

53. Спосіб насичення поверхні сталевих і чавунних деталей сіркою методом електроерозійного легування : пат. 119317 України на корисну модель, МПК (2017.01), В23Н 1/00, С23С 8/60 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Антошевський Б., Кундера Ч., Жуков О. М. ; заявл. 27.02.2017 ; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18. 8 с.

54. Спосіб алітування сталевих деталей : пат. 119707 України на корисну модель, МПК (2017.01), С23С 10/48 (2006.01), В23Н 9/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Антошевський Б., Кундера Ч., Жуков О. М. ; заявл. 27.02.2017 ; опубл. 10.10.2017, Бюл. № 19. 22 с.

55. Спосіб алітування сталевих деталей: пат. 130157 України на корисну модель : МПК (2018.01), В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 10/48 (2006.01), С23С 8/60 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевський Б., Кундера Ч. ; заявл. 29.05.2018 ; опубл. 26.11.2018, Бюл. № 22. 6 с.

56. Спосіб прогнозування якісних параметрів поверхневого шару при зміцненні сталевих деталей методом електроерозійного легування : пат. 130574 України на корисну модель, МПК (2018.01) В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 10/48 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Лазаренко А. Д. ; заявл. 03.07.2018 ; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23. 19 с.

57. Спосіб сульфоцементації сталевих деталей : пат. 130866 України на корисну модель, МПК (2018.01), В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 10/48 (2006.01), С23С 8/60 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С.,

Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевський Б., Кундера Ч. ; заявл. 06.07.2018 ; опубл. 26.12.2018, Бюл. №24. 8 с.

58. Спосіб відновлення зношених поверхонь деталей машин з нержавіючої сталі : пат. 131805 України на корисну модель, МПК (2018.01) В23Н 5/02 (2006.01), В23Р 6/00, С23С 28/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О.П., Коноплянченко Є.В., Тарельник Н. В., Павлов О. Г., Саржанов Б. О., Антошевський Б. ; заявл. 12.09.2018 ; опубл. 25.01.2019, Бюл. №2. 21 с.

59. Спосіб формування покриття на зношувальних поверхнях деталей : пат. 141919 України на корисну модель, МПК (2020.01) В23Н 5/00, В23Н 9/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Саржанов Б. О., Пирогов В. О., Лазаренко А. Д., Гапон О. О. ; заявл. 27.12.2019 ; опубл. 27.04.2020, Бюл. № 8. 8 с.

60. Спосіб формування покриття на зношувальних поверхнях деталей : пат. 141920 України на корисну модель, МПК (2020.01) В23Н 5/00, В23Н 9/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Саржанов Б. О., Пирогов В. О., Лазаренко А. Д., Гапон О. О. ; заявл. 27.12.2019 ; опубл. 27.04.2020, Бюл. № 8. 9 с.

61. Спосіб екологічно безпечного зміцнення деталей з листової сталі методом електроерозійного легування сталевих поверхонь графітовим електродом : пат. 141992 України на корисну модель, МПК (2020.01) В23Р 6/00, В23К 9/04 (2006.01), В23Н 5/00, В23Н 5/02 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Саржанов О. А., Гапон О. О., Саржанов Б. О., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В. ; заявл. 10.09.2019 ; опубл. 12.05.2020, Бюл. № 9. 9 с.

62. Спосіб виготовлення деталей з нержавіючої сталі з комбінованим електроіскровим покриттям на зношувальних плоских і криволінійних

поверхнях : пат. 142338 України на корисну модель, МПК (2020.01), В23Н 5/00, В23Н 9/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Саржанов Б. О., Пирогов В. О., Лазаренко А. Д., Гапон О. О. ; заявл. 11.01.2020 ; опубл. 25.05.2020, Бюл. № 10. 10 с.

63. Спосіб цементації сталевих деталей електроіскровим легуванням : пат. 142822 України на корисну модель, МПК (2020.01) С23С 8/00, С23С 28/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Мисливченко О. М., Пирогов В. О., Гапон О. О., Лазаренко А. Д. ; заявл. 11.02.2020 ; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12. 8 с.

64. Спосіб захисту деталей пари тертя пружної муфти від фретинг-корозії : пат. 142811 України на корисну модель : МПК (2020.01), С23F 15/00, F01D 5/28 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Думанчук М. Ю., Коноплянченко Є. В., Гапонова О. П., Тарельник Н. В., Пирогов В. О., Гапон О. О. ; заявл. 05.02.2020 ; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12. 8 с.

65. Спосіб формування пакетів гнучких елементів пружних муфт : пат. 137273 України на корисну модель, МПК (2019.01), F16D 3/70 (2006/01), С10М 103/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Думанчук М. Ю., Тарельник Н. В. ; заявл. 15.04.2019 ; опубл. 10.10.2019, Бюл. № 19. 8 с.

66. Спосіб підвищення зносостійкості сталевих деталей : пат. 136895 України на корисну модель, МПК (2019.01), В23Н 9/00, С23С 8/60 (2006/01), С23С 10/48 (2006/01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Саржанов О. А., Саржанов Б. О., Антошевський Б. ; заявл. 02.04.2019 ; опубл. 10.09.2019, Бюл. № 17. 14 с.

67. Спосіб формування покриття на поверхні сталеві деталі методом електроіскрового легування : пат. 144932 України на корисну модель, МПК (2020.01), В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 4/00, С23С 6/00, С23С 8/60 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П.,

Мисливченко О. М., Пирогов В. О., Гапон О. О., Лазаренко А. Д. ; заявл. 26.02.2020 ; опубл. 10.11.2020, Бюл. № 21. 15 с.

68. Спосіб азотування поверхонь сталевих деталей : пат. 145506 України на корисну модель, МПК (2020.01), С23С 8/00, С23С 8/26 (2006.01), С23С 14/06 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Саржанов О. А., Коноплянченко Є. В., Гапон О. О., Лазаренко А. Д., Мікуліна М. О. ; заявл. 04.08.2020 ; опубл. 10.12.2020, Бюл. № 23. 6 с.

69. Спосіб нітроцементзації поверхонь сталевих деталей : пат. 146373 України на корисну модель, МПК (2021.01), С23С 8/00, С23С 8/22 (2006.01), С23С 8/26 (2006.01), С23С 14/06 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Саржанов О. А., Коноплянченко Є. В., Гапон О. О., Лазаренко А. Д., Мікуліна М. О. ; заявл. 06.08.2020 ; опубл. 17.02.2021, Бюл. № 7. 8 с.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

70. Energy Dispersive X-Ray Microanalysis of Part Surface Layer Carburized by Electric Spark Alloying / V. Tarelnyk, O. Gaponova, V. Martynkovskyy at al. *10th International Conference on «Nanomaterials: Applications and Properties»*, NAP 2020. 2021. P. 01TFC13-1–01TFC13-9.

71. Increasing the Efficiency of Running-In the Titanium Nitride Nanostructures Formed on R6M5 and 12KH18N10T Steels by Sulphidizing with Electric Spark Alloying Method / I. Konoplianchenko, V. Tarelnyk, O. Gaponova at al. *10th International Conference on «Nanomaterials: Applications and Properties»*, NAP 2020. 2021. P. 01TFC14-1–01TFC14-8.

72. Assessment of hydroabrasive wear resistance of construction materials with functional coatings, which are formed by resource-saving and environmentally friendly technologies / V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, B. Sarzhanov at al. *7th International Conference on Actual problems of engineering mechanics, APEM 2020*. 2020. Vol. 864 KEM.

P. 265-277.

73. Zhylenko T., Tarel'nyk V., Gaponova O., Hrytsyna A. Mathematical methods for the analysis of electrospark alloying of metal surfaces. *International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo 2019)*, Odessa, Ukraine, 2019. P. 1–4.

74. New Process for Forming Multicomponent Wear-Resistant Nanostructures by Electrospark Alloying Method / V. Tarel'nyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova et al. *Microstructure and Properties of Micro- and Nanoscale Materials, Films, and Coatings (NAP 2019)*. Springer Proceedings in Physics. 2019. Vol. 240. P. 135–149.

75. Application of Multicomponent Wear-Resistant Nanostructures Formed by Electrospark Alloying for Protecting Surfaces of Compression Joints Parts / V. Tarel'nyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova et al. *Microstructure and Properties of Micro- and Nanoscale Materials, Films, and Coatings (NAP 2019)*. Springer Proceedings in Physics. 2019. Vol. 240. P. 195–209.

76. Alternative Methods for Forming Sliding Surfaces of Face Impulse Seals / V. Tarel'nyk, I. Konoplianchenko, V. Martsynkovskyy et al. *8th IEEE International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties, NAP 2018*. 2018. P. 03TFNMC24.

77. Investigation of Qualitative Parameters of Surface Layers Formed By Stepwise Carburizing and Sulfo-Carburizing of Steel Parts With The Use of Electroerosion Alloying Method / V. Tarel'nyk, I. Konoplianchenko, V. Martsynkovskyy et al. *8th IEEE International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties, NAP 2018*. 2018. P. 03TFNMC26.

78. Zhylenko T., Gaponova O. Statistical analysis of aluminized coatings obtained by electrospark deposition. *International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, UkrMiCo*. 2018.

79. New sulphiding method for steel and cast iron parts / V. Tarel'nyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova et al. *15th International Scientific and Engineering Conference Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological*

Safety of Pump and Compressor Machinery, HERVICON+PUMPS. 2017. Vol. 233, Issue 1. P. 012049.

80. New method for strengthening surfaces of heat treated steel parts / V. Tarel'nyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova et al. *15th International Scientific and Engineering Conference Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery, HERVICON+PUMPS*. 2017. Vol. 233, Issue 1. P. 012048.

81. Гапонова О. П. Дослідження якості сульфоалітованих покриттів на сталевих поверхнях, отриманих методами електроіскрового легування. *Сучасні проблеми землеробської механіки : матеріали XXI Міжнародної наукової конференції (м. Харків 17–18 жовтня 2020 року)*. Харків : Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка. 2020. С. 43–44.

82. Гапонова О. П., Голуб Н. Р., Мисливченко О. М. Дослідження структури та властивостей Al-C-B-покриттів, отриманих методом електроіскрового легування. *Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 10 : збірник матеріалів міжнародної наукової конференції (м. Київ, 10–11 грудня 2020 р.)*. Київ : Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2020. С. 117–120.

83. Оценка гидроабразивной износостойкости конструкционных материалов с функциональными покрытиями, сформированными ресурсосберегающими и экологическими технологиями / В. Б. Тарельник, Е. В. Коноплянченко, Б. А. Саржанов, О. П. Гапонова. *Актуальні проблеми інженерної механіки : тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Одеса, 12–15 травня 2020 р.)*. Одеса : Одеська державна академія будівництва та архітектури, 2020. С. 336–340.

84. Гапонова О. П., Голуб Н. Р. Дослідження структури та властивостей багатошарових зміцнених шарів, отриманих методом електроіскрового легування. *Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали та*

програма VII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 21–24 квітня 2020 р.). Суми : Сумський державний університет, 2020. С. 101.

85. Гапонова О. П. Формування багатошарових зносостійких покриттів методом електроіскрового легування. *Сучасні технології в науці та освіті : матеріали третьої Міжнародної науково-практичної конференції* : у 2 ч. (м. Сєверодонецьк, 27–28 лютого 2020 р.). Сєверодонецьк : Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, 2020. Ч. 2 С. 24–26.

86. Гапонова О. П. Дослідження якості багатошарових покриттів, отриманих методом електроіскрового легування. *Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 9* : матеріали Міжнародної наукової конференції (м. Київ, 18–19 грудня 2019 р.). Київ : Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2019. С. 49–51.

87. Гапонова О. П., Саржанов Б. О. Підвищення якості сталеві поверхні при електроіскровому легуванні графітом. *Сучасні технології в науці та освіті* : матеріали Другої міжнародної науково-практичної конференції (м. Сєверодонецьк, 5–7 березня 2019 р.). Сєверодонецьк : Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, 2019. С. 162–164.

88. Голуб Н. Р., Гапонова О. П. До питання підвищення ресурсу та відновлення працездатності деталей машин шляхом формування функціональних покриттів. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма VI Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 16–19 квітня 2019 р.). Суми : Сумський державний університет, 2019. С. 102.

89. Биченко М. М., Гапонова О. П. Перспективи застосування електроіскрового легування для підвищення якості робочих поверхонь деталей машин. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма VI Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 16–19 квітня 2019 р.). Суми : Сумський державний університет, 2019. С. 108–109.

90. Підвищення якості робочих поверхонь деталей з аустенітних хромонікелевих сталей методом електроіскрового легування / В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Н. Р. Голуб та ін. *Проблеми надійності машин* : збірник матеріалів Міжнародної науково-методичної конференції, присвяченої пам'яті академіка В. Я. Аніловича (м. Харків, 12–13 листопада 2019 р.). Харків : Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, 2019. С. 99–100.

91. Гапонова О. П. Аналіз якості сульфоцементованих покриттів, отриманих методом електроіскрового легування. *Проблеми надійності машин* : збірник матеріалів Міжнародної науково-методичної конференції, присвяченої пам'яті академіка В. Я. Аніловича (м. Харків, 12–13 листопада 2019 р.). Харків : Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, 2019. С. 101–102.

92. Гапонова О. П. Исследование особенностей структурообразования и свойств электроискровых алитированных покрытий. *Сучасні технології в науці та освіті* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (м. Сєверодонецьк, 19–22 лютого 2018 р.). Сєверодонецьк : Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, 2018. С. 184.

93. Жиленко Т. І., Гапонова О. П. Кінетичний аналіз поверхонь, отриманих методом електроіскрового легування. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2018* : тези доповідей Десятої міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, 27–9 березня 2018 р.). Дніпро : Національна металургійна академія України, 2018. С. 15.

94. Ніколаєнко А. С., Гапонова О. П. Метод нанесення захисного покриття на робочу поверхню деталі шляхом електроіскрового легування. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма V Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції (м. Суми, 17–20 квітня 2018 р.). Суми : Сумський державний університет, 2018. С. 78.

95. Гапонова О. П., Биченко М. М., Зінченко І. Д. Аналіз якості комплексних покриттів, отриманих методом електроіскрового легування.

Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 8 : збірник матеріалів Міжнародної наукової конференції (м. Київ, 6–7 грудня 2018 р.). Київ, 2018. С. 121–122.

96. Гапонова О. П. Перспективи застосування електроіскрової обробки поверхні сталевих виробів. *Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія 4.0. Сучасний напрямок автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях* : матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (м. Суми, 22–26 травня 2017 р.). Суми : Сумський державний університет, 2017. С. 66–67.

97. Гапонова О. П., Охріменко В. О. Дослідження зносостійкості комплексних боридних покриттів. *Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія 4.0. Сучасний напрямок автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях* : матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (м. Суми, 22–26 травня 2017 р.). Суми : Сумський державний університет, 2017. С. 120–121.

98. Ніколаєнко А. С., Гапонова О. П. Удосконалення технології підвищення зносостійкості деталей машин електроіскровим легуванням. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій (м. Суми, 18–21 квітня 2017 р.) : у 2 ч. Суми : Сумський державний університет, 2017. Ч. 1. С. 120–121.

99. Охріменко В. О., Гапонова О. П. Особливості структуроутворення бор-хромових та бор-мідних покриттів на інструментальних сталях. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій (м. Суми, 18–21 квітня 2017р.) : у 2 ч. Суми : Сумський державний університет, 2017. Ч. 1. С. 106–108.

100. Гапонова О. П., Ніколаєнко А. С. Жаростійкість алітованих

покриттів, отриманих електроіскровим легуванням. *Матеріали для роботи в екстремальних умовах–7* : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 30 листопада – 2 грудня 2017 р.). Київ : Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2017. С. 112.

101. Гапонова О. П., Охріменко В. О. Комплексні дифузійні покриття під час борирування. *Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 7* : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 30 листопада – 2 грудня 2017 р.). Київ : Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2017. С. 113.

102. Гапонова О. П., Охріменко В. О. Структура і властивості боридних покриттів легованих міддю та хромом на іструментальних сталях. *Сучасні проблеми землеробської механіки* : збірник тез доповідей XVI Міжнародної наукової конференції (м. Суми, 17–18 жовтня 2016 р.). Суми : Сумський державний університет, 2016. С. 146–148.

103. Okhrimenko V. O., Gaponova O. P. Effect of heat treatment on structure and properties of austenite-martensite stainless steel. Системи розроблення та поставлення продукції на виробництво : матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції (м. Суми, 17–20 травня 2016 р.). Суми : Сумський державний університет, 2016. С. 107.

104. Панов Б. Ю., Гапонова О. П. Влияние предварительной холодной пластической деформации на диффузию углерода стали 20 : матеріали та програма IV Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції (м. Суми, 19–22 квітня 2016 р.) : у 2 ч. / редкол.: О. Г. Гусак, В. Г. Євтухов. Суми : Сумський державний університет, 2016. Ч. 1. С. 85.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

105. Microstructure and Properties of AlCrFeCoNiCux High-Entropy

Alloys / M. V. Demchenko, O. P. Gaponova, O. M. Myslyvchenko et al. *Journal of Engineering Sciences*. 2018. Vol. 5, Issue 1. P. C 11–C 16.

106. Research of conductivity in polycrystalline films with a thin coating using the modified Mayadas – Shatzkes model / T. P. Hovorun, O. A. Bilous, O. P. Gaponova et al. *Ukrainian Journal of Physics*. 2017. Vol. 62, No. 2. P. 132–139.

107. Дослідження структури та властивостей дифузійних покриттів на інструментальних сталях після бороміднення та борохромування / О. П. Гапонова, В. О. Охріменко, С. В. Марченко та ін. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2017. № 2. С. 8–11.

108. Gaponova O. P., Baglyuk G. A. Effect of temperature-rate strain conditions on the power variables and structurization during hot-forging of the sintered Cu-2% Ti billets. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2016. Vol. 55, No. 7–8. P. 406–412.

109. Gaponova O. P., Hovorun T. P. The theoretical analysis of a dynamic softening in the sintered materials. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2015. Vol. 37, No. 8. P. 1113–1123.

110. Pogrebnyak O. D., Dyadyura K. O., Gaponova O. P. Features of thermodynamic processes on contact surfaces of multicomponent nanocomposite coatings with hierarchical and adaptive behaviour. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2015. Vol. 37, No. 7. P. 899–919.

111. Gaponova O. P., Kolosyuk A. G. Researches of diffusion processes in powder materials and their role in structure formation. *Ukrainian Journal of Physics*. 2014. Vol. 59, No. 10. P. 1013–1019.

ABSTRACT

Gaponova O. P. Control of surface properties of steel parts by electrospark alloying in special technological environments. – As a manuscript.

Thesis for Doctor of Sciences Degree of specialty 05.02.01 – Materials Science (13 – Mechanical Engineering). – Petro Vasilenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation work presents scientifically substantiated results that generalize and provide a solution to an urgent scientific and technical problem – increasing the durability of dynamic equipment parts by controlling the structure and properties of steel surfaces due to the complex effect of electrospark alloying (ESA) using a special technological environment (STE). Based on the research, new methods of obtaining single-component and multicomponent coatings by the ESA method with the use of STE have been developed. These methods include the application of STE to the treated surface, then ESA. It allows providing a complex of properties and obtaining high quality coatings. Generalized regularities of the influence of factors (composition of electrode materials and STE, energy and technological parameters of ESA) on the structural state of the treated surface allow to reasonably propose materials and composition of STE to ensure the required surface properties in the most economical way.

The analysis of structure and phase formation of one-component and multicomponent layers obtained by the ESA method with the use of STE is carried out. It is shown, due to the use of STE, it is possible to increase the depth of the diffusion layer (cementation), to reduce the microhardness of the surface (sulfidation), to strengthen the surface layer (cementation, nitriding, aluminizing), to increase heat resistance (aluminizing). According to the proposed method of cementation by the method of ESA (CESA) using STE managed to increase the hardened layer to 230 μm and achieve a hardness of 10 796 MPa at 100 % continuity of the doped layer. The sulfide coatings obtained to 75 μm . A new method of nitriding by ESA using STE was investigated. The obtained coatings

have a high microhardness (up to 9 160 MPa) and a layer thickness (up to 50 μm).

New approaches to the theoretical assessment of the quality of coatings obtained by the ESA method have been developed. The mathematical model has been developed for predicting the quality parameters of surface layers obtained by the ESA method using STE, which makes it possible to predict the structure and main parameters of the coating. Based on the analysis of experimental data according to the proposed model, the main indicators of the model are calculated, which allow predicting the thickness of the coating, its microhardness, continuity, and roughness for a given pair of electrode materials.

Key words: electrospark alloying, surface quality, microstructure, microhardness, wear resistance, mathematical model.

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE TOPIC OF THE THESIS

List of publications in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Problems of safe operation of compressor and pumping equipment in modern industry: collective monograph / V. S. Martsinkovsky et al. ; ed. V. B. Tarel'nyk, E. V. Konoplyanchenko. Sumy: FOP Litovchenko E. B., 2020. 410 p.
2. Ecological safety of operation of compressor and pumping equipment: monograph / V. A. Marcinkovsky, V. B. Tarel'nyk, B. Antoshevsky et al. ; ed. O. V. Radionov. Sumy: Sumy State University, 2018. 282 p.
3. Modern energy-efficient technologies for the implementation of engineering problems of dynamic equipment: a monograph / ed. V. A. Martsinkovsky, V. S. Martsinkovsky, V. B. Tarel'nik et al. Sumy: Tritoria, 2017. 292 p.
4. Assessment of Technological Capabilities for Forming Al-C-B System Coatings on Steel Surfaces by Electrospark Alloying Method / B. Antoszewski, O. P. Gaponova, V. B. Tarel'nyk et al. *Materials*. 2021. 14. 739.
5. Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kha18En10Te Steel Using a

Combined Technology Based on Electrospark Alloying / V. B. Tarelnik, O. P. Gaponova, V. B. Loboda et al. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2021. Vol. 57, No. 2. pp. 173–184.

6. Myslyvchenko O. M., Gaponova O. P., Tarelnyk V. B., Krapivka M. O. The Structure Formation and Hardness of High-Entropy Alloy Coatings Obtained by Electrospark Deposition. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2020. Vol. 59 (3–4). P. 201–208.

7. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Myslyvchenko O. M., Sarzhanov B. O. Electrospark Deposition of Multilayer Coatings. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2020. Vol. 59 (1–2). P. 76–88.

8. Cementation of steel details by electrospark alloying / V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, G. V. Kirik et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2020. Vol. 42 (5). P. 655–667.

9. Effect of Laser Processing on the Qualitative Parameters of Protective Abrasion-Resistant Coatings / V. B. Tarelnyk, Ye. V. Konoplianchenko, O. P. Gaponova et al. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2020. Vol. 58. P. 703–713.

10. Technology support for protecting contacting surfaces of half-coupling – Shaft press joints against fretting wear / V. Martsynkovskyy, V. Tarelnyk, Ye. Konoplianchenko, O. Gaponova, M. Dumanchuk. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, 2020. P. 216–225.

11. Gaponova O. P., Getsovich Є. M. Development of application technology Al-C-S coatings of steel surfaces by electrospark alloying. *Bulletin of Sumy NAU. Series "Mechanization and automation of production processes"*. 2020. No. 1 (39). P. 3–6.

12. Gaponova O. P. Research of quality of sulfoalitized coverings on the steel surfaces received by a method of electrospark alloying. *Engineering of nature management*. 2020. No 3. P. 86–93.

13. Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. III. The Influence of the Main Technological Parameters on Microgeometry, Structure and Properties of Electrolytic Erosion Coatings / V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 3. P. 313–335.

14. Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. II. The Analysis of a Stressedly-Deformed State of Surface Layer after a Surface Plastic Deformation of Electroerosive Coatings / V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 2. P. 173–192.

15. Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. I. Features of Formation of the Combined Electroerosive Coatings on Special Steels and Alloys / V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 1. P. 47–69.

16. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Myslyvchenko O. M. Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospark Alloying. Part I. Structural-Phase State of the Steel Surface after Aluminizing. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 10. P. 1377–1394.

17. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P. Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospark Alloying. Part II. Mathematical Model of the Aluminizing Process. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 1. P. 1483–1498.

18. Estimating qualitative parameters of aluminized coating obtained by electric spark alloying method / O. Gaponova, C. Kundera, G. Kirik et al. *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings. NAP 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2019. P. 249–266.

19. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P. Improving the performance and environmental safety of machine parts and tools by electrospark alloying. *Compressor and power engineering magazine*. 2019. No1 (55). P. 2–7.

20. Gaponova O. P. Structural-phase state of heat-resistant coatings obtained by the method of electrospark alloying. *Compressor and power engineering magazine*. 2019. No 2 (55). P. 2–6.

21. Gaponova O. P. Quality analysis of complex sulfocementated coatings obtained by electrospark doping. *Scientific notes*. 2019. Vol. 67. P. 24–28.

22. Improving the quality of working surfaces of parts from austenitic chromium-nickel steels by the method of electrospark alloying / V. Бю Тарельник, О. П. Гапонова, О. М. Мисльвиченко et al. *Bulletin of the Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*. 2019. Vol. 205: Problems of reliability of machines. P. 320–329.

23. Gaponova O. P. Quality analysis of sulfocementized coatings obtained by the method of electrospark alloying. *Bulletin of the Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*. 2019. Vol. 205: Problems of reliability of machines. C. 339–349.

24. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Sarzhanov B. A. Method of ecologically safe strengthening of sheet steel parts by electroerosion alloying with graphite electrode. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2019. No 2 (20). P. 118–126.

25. Improvement in Babbit Sliding Bearing Quality with Electrospark Alloying / V. B. Tarelnik, V. S. Martsinkovskii, E. V. Konoplyanchenko, A. V. Belous, O. P. Gaponova. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2018. Vol. 54, Issue 7–8. P. 598–604.

26. Quality Analysis of Aluminized Surface Layers Produced by Electrospark Deposition / G. V. Kirik, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk et al. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2018. Vol. 56, Issue 11–12. P. 688–696.

27. The Analysis of a Structural State of Surface Layer after Electroerosive Alloying. II. Features of Formation of Electroerosive Coatings on

Special Steels and Alloys by Hard Wear-Resistant and Soft Antifriction Materials / V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2018. Vol 40, No. 6. P. 795–815.

28. The Analysis of a Structural State of Surface Layer after Electroerosive Alloying. I. Features of formation of electroerosive coatings on steel 45 / V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2018. Vol. 40, No. 2. P. 235–254.

29. Electrospark Graphite Alloying of Steel Surfaces: Technology, Properties, and Application / V. B. Tarelnik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, O. P. Gaponova. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry.* 2018. Vol. 54, No. 2. P. 147–156.

30. Ecologically Safe Process for Sulfo-Aluminizing Steel Parts / L. D. Plyatsuk, V. B. Tarelnyk, Cz. Kundera, O. V. Radionov, O. P. Gaponova. *Journal of Engineering Sciences.* 2018. Vol. 5, Issue 1. P. C 16–C 20.

31. Tarelnyk V. B, Gaponova O. P, Radionov A. V. Improving the level of environmental safety using integrated methods to improve the quality of steel parts. *Scientific notes.* 2018. Vol. 63. P. 214–220.

32. Use of sulphiding by electroerosion alloying method for scuff resistance increase of steel and cast iron parts friction surfaces / V. B. Tarelnyk, V. S. Martsynkovskyy, Ye. V. Konoplianchenko, O. P. Gaponova, V. P. Yaremenko. *Technical service of agriculture, forestry and transport systems.* 2018. No 11. P. 20–26.

33. Investigation of the properties of heat-resistant functional coatings formed by the method of electrospark alloying / V. G. Kirik, V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova et al. *Compressor and power engineering magazine.* 2018. No 4 (54). P. 17–22.

34. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Konoplianchenko Ye. V., Dovzhyk M. Ya. Investigation of regularities of the processes of formation of surface layers with electroerosive alloying. Part II. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*

2017. Vol. 39, No. 3. P. 363–385.

35. Tarelyk V. B., Gaponova O. P., Konoplyanchenko Ye. V., Dovzhyk M. Y. Investigation of regularities of the processes of formation of surface layers with electroerosive alloying. Part 1. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2016. Vol. 38, No. 12. P. 1611–1633.

36. The method of sulfiding the steel surface and cast iron parts by electroerosion alloying. Patent No. 117528 Ukraine, IPC B23H 1/04 (2006.01), C23C 8/60 (2006.01) / Tarelyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Bilous A. V., Zhukov O. M., Kosenko P. V., Gaponova O. P.; declared 24.11.2016 ; published 10.08.2018. Byul. no. 15. 8 p.

37. The method of sulfocementation of the surface of a steel part. Patent No. 117867 Ukraine, IPC B23H 1/00 B23H 9/02, C23C 8/66 (2006.01) / Tarelyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Bilous A. V., Zhukov O. M. ; declared 22.12.2016 ; published 10.10.2018. Byul. no. 19. 9 p.

38. The method of surface treatment of steel parts. Patent No. 121343 Ukraine, IPC (2020.01) B23H 1/06 (2006.01) B23H 9/00 C23C 12/02 (2006.01) / Tarelyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Konoplyanchenko E. V.; Tarelyk N. V., Dumanchuk M. Yu., Goncharenko M. V., Antoshevsky B., Kundera Ch. ; declared 29.05.2018 ; published 12.05.2020. Byul. no. 9. 5 p.

39. The method of sulfocementation of steel parts. Patent No. 2663799 RF, IPC (B23H 1/00 (2006.01), B2H 9/00 (2006.01) / Tarelyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Belous A. V., Zhukov A. N., Gaponova O. P., Konoplyanchenko E. V.; declared 30.12.2016 ; published 09.08.2018. Byul. no.22. 15 p.

40. Method of restoration of worn-out surfaces of stainless steel machine parts. Patent No. 2698001 RF, IPC B23P 6/00 (2006.01), B23H 5/02 (2006.01) / Martsynkovskyy V. S., Tarelyk V. B., Gaponova O. P., Belous A. V., Zhukov A. N., Gaponova O. P., Tarelyk N.V., Konoplyanchenko E.V., Pavlov O. G., Sarzhanov B. A., Antoshevsky B. ; declared 26.09.2018; published 21.08.2019. Byul. no. 24. 20 p.

41. Method of sulfocarburing steel parts. Patent No. 2707776 RF, C1 (51) IPC B23H 1/00 (2006.01), B23H 9/00 (2006.01) / Martsynkovskyy V. S., Tarelnyk V. B., Tarelnyk N.V., Konoplyanchenko E.V., Gaponova O. P., Dumanchuk M. Yu., Goncharenko M. V., Antoshevsky B., Kundera Ch.; declared 25.07.2018 ; published 29.11.2019. Byul. no. 34. 11 p.

42. The method of increasing the wear resistance of steel parts. Patent No. 2711074 RF, IPC B23H 9/00 (2006.01), C23C 28/00 (2006.01) / Martsynkovskyy V. S., Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Tarelnyk N.V., Konoplyanchenko E.V., Sarzhanov A. A., Sarzhanov B. A., Antoshevsky B. ; declared 11.04.2019 ; published 15.01.2020. Byul. no. 2. 18 p.

43. Method of aluminizing steel parts. Patent No. 2696616C1 RF, IPC B23H9/00 (2006-01-01) / Martsynkovskyy V. S., Tarelnyk V. B., Tarelnyk N.V., Konoplyanchenko E.V., Gaponova O. P., Dumanchuk M. Yu., Goncharenko M. V., Antoshevsky B., Kundera Ch. ; declared 04.06.2018 ; published 06.08.2019. Byul. no. 22. 8 p.

44. The method of surface treatment of steel parts. Patent No. 121346 Ukraine, IPC (2020.01) B23H 1/06 (2006.01), B23H 9/00, C23C 12/02 (2006.01) / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Konoplyanchenko E. V.; Tarelnyk N. V., Dumanchuk M. Yu., Goncharenko M. V., Antoshevsky B., Kundera Ch. ; declared 06.07.2018 ; published 12.05.2020. Byul. no. 9. 8 p.

45. A method of restoring worn surfaces of machine parts made of stainless steel. Patent No. 121614 Ukraine, IPC (2020.01), B23H 5/02 (2006.01), C23C 28/00 B23P 6/00 / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Konoplyanchenko E. V.; Tarelnyk N. V., Pavlov O. G., Sarzhanov B. O., Antoshevsky B. ; declared 12.09.2018 ; published 25.06.2020. Byul. no. 12. 20 p.

46. The method of predicting the qualitative parameters of the surface layer during the strengthening of steel parts by electroerosion alloying. Patent No. 121427 Ukraine, IPC (2020.01), B23H 1/00, B23H 1/04 (2006.01), B23H 9/00, C23C 10/48 (2006.01), B23P 6/00 / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Lazorenko A. D. ; declared 03.07.2018 ; published 25.05.2020.

Byul. no. 10. 19 p.

47. A method of increasing the wear resistance of steel parts. Patent No. 123025 Ukraine, IPC (2021.01), B23H 1/06 (2006.01), B23H 9/00, C23C 4/067 (2016.01), C23C 4/10 (2016.01), C23C 4/131 (2016.01), C23C 12/00 / Tarelynyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Konoplyanchenko E. V., Tarelynyk N. V., Sarzhanov O. A., Sarzhanov B. O., Antoshevsky B. ; declared 12.10.2020 ; published 03.02.2021. Byul. no. 5. 16 p.

48. A method of forming packages of flexible elements of elastic couplings. Patent No. 123026 Ukraine, IPC (2021.01), F16D 3/56 (2006.01), C10M 101/02 (2006.01), C10M 103/04 (2006.01), C10M 111/00 / Tarelynyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Konoplyanchenko E. V., Dumanchuk M. Yu., Tarelynyk N. V. ; declared 26.10.2020 ; published 03.02.2021. Byul. no. 5. 6 p.

49. The method of sulfiding the surface of steel and cast iron parts by electroerosion alloying. Patent No. 115059 Ukraine, IPC (2017.01), B23H 1/00, C23C 8/60 (2006.01), C22C 37/00, C22C 37/06, C22C 37/08 / Tarelynyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Belous A. V., Zhukov O. M., Kosenko P. V., Gaponova O. P. ; declared 24.11.2016 ; published 27.03.2017. Byul. no. 6. 8 p.

50. The method of surface treatment of steel parts. Patent No. 119316 Ukraine, IPC (2017.01), C23C 10/48 (2006.01), B23H9/00 / Tarelynyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Belous A. V., Gaponova, Konoplyanchenko E. V., Antoshevsky B., Kundera Ch., Zhukov O. M. ; declared 27.02.2017 ; published 25.09.2017. Byul. no. 18. 16 p.

51. The method of sulfocementation of steel parts. Patent No. 119318 Ukraine, IPC (2017.01), B23H 1/00, B23H 9/00, C23C 8/60 (2006.01) / Tarelynyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Belous A. V., Gaponova, Konoplyanchenko E. V., Antoshevsky B., Kundera Ch., Zhukov O. M. ; declared 27.02.2017 ; published 25.09.2017. Byul. no. 18. 9 p.

52. The method of increasing the wear resistance of the working surfaces of steel rings of pulse end seals. Patent No. 119319 Ukraine, IPC (2017.01),

B23H 9/00, C23C 8/00, F16J 15/16 (2006.01), F16J 15/16 (2006.01) / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Belous A. V., Gaponova O. P., Konoplyanchenko E. V., Antoshevsky B., Kundera Ch., Zhukov O. M. ; declared 27.02.2017 ; published 25.09.2017. Byul. no. 18. 9 p.

53. The method of saturating the surface of steel and cast iron parts with sulfur by electroerosion alloying. Patent No. 119317 Ukraine, IPC (2017.01), B23H 1/00, C23C 8/60 (2006.01) / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Belous A. V., Gaponova, Konoplyanchenko E. V., Antoshevsky B., Kundera Ch., Zhukov O. M. ; declared 27.02.2017 ; published 25.09.2017. Byul. no. 18. 8 p.

54. The method of alliteration of steel parts. Patent No. 119707 Ukraine, IPC (2017.01), C23C 10/48 (2006.01), B23H 9/00 / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Belous A. V., Gaponova, Konoplyanchenko E. V., Antoshevsky B., Kundera Ch., Zhukov O. M. ; declared 27.02.2017 ; published 10.10.2017. Byul. no. 19. 22 p.

55. The method of alliteration of steel parts. Patent No. 130157 Ukraine, IPC (2018.01), B23H 1/00, B23H 9/00, C23C 10/48 (2006.01), C23C 8/60 (2006.01) / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Konoplyanchenko E. V., Tarelnyk N. V., Dumanchuk M. Yu., Goncharenko M. V., Antoshevsky B., Kundera Ch.; declared 29.05.2018 ; published 26.11.2018. Byul. no. 22. 6 p.

56. The method of predicting the qualitative parameters of the surface layer during the strengthening of steel parts by electroerosion alloying. Patent No. 130574 Ukraine, IPC (2018.01) B23H 1/00, B23H 9/00, C23C 10/48 (2006.01) / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Lazarenko A. D.; declared 03.07.2018 ; published 10.12.2018. Byul. no. 23. 19 p.

57. The method of sulfocementation of steel parts. Patent No. 130866 Ukraine, IPC (2018.01), B23H 1/00, B23H 9/00, C23C 10/48 (2006.01), C23C 8/60 (2006.01) / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Konoplyanchenko E. V., Tarelnyk N. V., Dumanchuk M. Yu., Goncharenko M. V., Antoshevsky B., Kundera Ch.; declared 06.07.2018 ;

published 26.12.2018. Byul. no. 24. 8 p.

58. The method of restoring worn surfaces of machine parts made of stainless steel. Patent No. 131805 Ukraine, IPC (2018.01) B23H 5/02 (2006.01), B23P 6/00, C23C 28/00 / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Konoplyanchenko E. V., Tarelnyk N. V., Pavlov O. G., Sarzhanov B. O., Antoshevsky B. ; declared 12.09.2018 ; published 25.01.2019. Byul. no. 2. 21 p.

59. The method of forming a coating on the wearing surfaces of parts. Patent No. 141919 Ukraine, IPC (2020.01) B23H 5/00, B23H 9/00 / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Konoplyanchenko E. V., Tarelnyk N. V., Sarzhanov B. O., Pirogov V. O., Lazarenko A. D., Gapon O. O. ; declared 27.12.2019 ; published 27.04.2020. Byul. no. 8. 8 p.

60. The method of forming a coating on the wearing surfaces of parts. Patent No. 141920 Ukraine, IPC (2020.01) B23H 5/00, B23H 9/00 / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Konoplyanchenko E. V., Tarelnyk N. V., Sarzhanov B. O., Pirogov V. O., Lazarenko A. D., Gapon O. O. ; declared 27.12.2019 ; published 27.04.2020. Byul. no. 8. 9 p.

61. The method of environmentally friendly hardening of sheet steel parts by electroerosion alloying of steel surfaces with a graphite electrode. Patent No. 141992 Ukraine, IPC (2020.01) B23P 6/00, B23K 9/04 (2006.01), B23H 5/00, B23H 5/02 (2006.01) / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Sarzhanov O. A., Gapon O. O., Sarzhanov B. O., Gaponova O. P., Konoplyanchenko E. V. ; declared 10.09.2019 ; published 12.05.2020. Byul. no. 9. 9 p.

62. The method of manufacturing stainless steel parts with a combined electrospark coating on wearing flat and curved surfaces. Patent No. 142338 Ukraine, IPC (2020.01), B23H 5/00, B23H 9/00 / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Konoplyanchenko E. V., Tarelnyk N. V., Sarzhanov B. O., Pirogov V. O., Lazarenko A. D., Gapon O. O. ; declared 11.01.2020 ; published 25.05.2020. Byul. no. 10. 10 p.

63. The method of cementing steel parts by electrospark alloying. Patent No. 142822 Ukraine, IPC (2020.01) C23C 8/00, C23C 28/00 / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Myslyvchenko O. M., Pirogov V. O., Gapon O. O., Lazarenko A. D.; declared 11.02.2020 ; published 25.06.2020. Byul. no. 12. 8 p.

64. The method of protecting parts of the friction pair of the elastic coupling from fretting corrosion. Patent No. 142811 Ukraine, IPC (2020.01), C23F 15/00, F01D 5/28 (2006.01) / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Dumanchuk M. Yu., Konoplyanchenko E. V., Gaponova O. P., Tarelnyk N. V., Pirogov V. O., Gapon O. O. ; declared 05.02.2020 ; published 25.06.2020. Byul. no. 12. 8 p.

65. The method of forming packages of flexible elements of elastic couplings. Patent No. 137273 Ukraine, IPC (2019.01), F16D 3/70 (2006/01), C10M 103/00 / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Konoplyanchenko E. V., Dumanchuk M. Yu., Tarelnyk N. V. ; declared 15.04.2019 ; published 10.10.2019. Byul. no. 19. 8 p.

66. The method of increasing the wear resistance of steel parts. Patent No. 136895 Ukraine, IPC (2019.01), B23H 9/00, C23C 8/60 (2006/01), C23C 10/48 (2006/01) / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Konoplyanchenko E. V., Tarelnyk N. V., Sarzhanov O. A., Sarzhanov B. O., Antoshevsky B. ; declared 02.04.2019 ; published 10.09.2019. Byul. no. 17. 14 p.

67. The method of forming a coating on the surface of a steel part by the method of electrospark alloying. Patent No. 144932 Ukraine, IPC (2020.01), B23H 1/00, B23H 9/00, C23C 4/00, C23C 6/00, C23C 8/60 (2006.01) / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Myslivchenko O. M., Pirogov V. O., Gapon O. O., Lazarenko A. D.; declared 26.02.2020 ; published 10.11.2020. Byul. no. 21. 15 p.

68. The method of nitriding the surfaces of steel parts. Patent No. 145506 Ukraine, IPC (2020.01), C23C 8/00, C23C 8/26 (2006.01), C23C 14/06 (2006.01) / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Sarzhanov O. A.,

Konoplyanchenko E. V., Gapon O. O., Lazarenko A. D., Mikulina M. O. ; declared 04.08.2020 ; published 10.12.2020. Byul. no. 23. 6 p.

69. The method of nitrocementation of surfaces of steel parts. Patent No. 146373 Ukraine, IPC (2021.01), C23C 8/00, C23C 8/22 (2006.01), C23C 8/26 (2006.01), C23C 14/06 (2006.01) / Tarelnyk V. B., Martsynkovskyy V. S., Gaponova O. P., Sarzhanov O. A., Konoplyanchenko E. V., Gapon O. O., Lazarenko A. D., Mikulina M. O. ; declared 06.08.2020 ; published 17.02.2021. Byul. no. 7. 8 p.

Articles that certifying the approbation of the thesis:

70. Energy Dispersive X-Ray Microanalysis of Part Surface Layer Carburized by Electric Spark Alloying / V. Tarelnyk, O. Gaponova, V.Martsynkovskyy at al. *10th International Conference on «Nanomaterials: Applications and Properties», NAP 2020*. 2021. P. 01TFC13-1–01TFC13-9.

71. Increasing the Efficiency of Running-In the Titanium Nitride Nanostructures Formed on R6M5 and 12KH18N10T Steels by Sulphidizing with Electric Spark Alloying Method / I. Konoplianchenko, V. Tarelnyk, O. Gaponova at al. *10th International Conference on «Nanomaterials: Applications and Properties», NAP 2020*. 2021. P. 01TFC14-1–01TFC14-8.

72. Assessment of hydroabrasive wear resistance of construction materials with functional coatings, which are formed by resource-saving and environmentally friendly technologies / V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, B. Sarzhanov at al. *7th International Conference on Actual problems of engineering mechanics, APEM 2020*. 2020. Vol. 864 KEM. P. 265-277.

73. Zhylenko T., Tarelnyk V., Gaponova O., Hrytsyna A. Mathematical methods for the analysis of electrospark alloying of metal surfaces. *International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo 2019)*, Odessa, Ukraine, 2019. P. 1–4.

74. New Process for Forming Multicomponent Wear-Resistant Nanostructures by Electrospark Alloying Method / V. Tarelyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova at al. *Microstructure and Properties of Micro- and Nanoscale Materials, Films, and Coatings (NAP 2019)*. Springer Proceedings in Physics. 2019. Vol. 240. P. 135–149.

75. Application of Multicomponent Wear-Resistant Nanostructures Formed by Electrospark Alloying for Protecting Surfaces of Compression Joints Parts / V. Tarelyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova at al. *Microstructure and Properties of Micro- and Nanoscale Materials, Films, and Coatings (NAP 2019)*. Springer Proceedings in Physics. 2019. Vol. 240. P. 195–209.

76. Alternative Methods for Forming Sliding Surfaces of Face Impulse Seals / V. Tarelyk, I. Konoplianchenko, V. Martsynkovskyy at al. *8th IEEE International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties, NAP 2018*. 2018. P. 03TFNMC24.

77. Investigation of Qualitative Parameters of Surface Layers Formed By Stepwise Carburizing and Sulfo-Carburizing of Steel Parts With The Use of Electroerosion Alloying Method / V. Tarelyk, I. Konoplianchenko, V. Martsynkovskyy at al. *8th IEEE International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties, NAP 2018*. 2018. P. 03TFNMC26.

78. Zhylenko T., Gaponova O. Statistical analysis of aluminized coatings obtained by electrospark deposition. *International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, UkrMiCo*. 2018.

79. New sulphiding method for steel and cast iron parts / V. Tarelyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova at al. *15th International Scientific and Engineering Conference Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery, HERVICON+PUMPS*. 2017. Vol. 233, Issue 1. P. 012049.

80. New method for strengthening surfaces of heat treated steel parts / V. Tarelyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova at al. *15th International Scientific and Engineering Conference Hermetic Sealing, Vibration Reliability and*

Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery, HERVICON+PUMPS. 2017. Vol. 233, Issue 1. P. 012048.

81. Gaponova O. P. Research of quality of sulfoalitized coverings on the steel surfaces received by methods of electrospark alloying. *Modern problems of agricultural mechanics : materials of the XXI International Scientific Conference* (Kharkiv, October 17-18, 2020). Kharkiv: Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture. 2020. P. 43–44.

82. Gaponova O. P., Golub N. R., Myslyvchenko O. M. Investigation of the structure and properties of Al-C-B coatings obtained by electrospark doping. *Materials for use in extreme conditions – 10: proceedings of the international scientific conference* (Kyiv, December 10-11, 2020). Kyiv: National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2020. P. 117-120.

83. Estimation of hydroabrasive wear resistance of structural materials with functional coatings formed by resource-saving and ecological technologies / V. B. Tarelннк, E. V. Konoplyanchenko, B. A. Sarzhanov, O. P. Gaponova. *Actual problems of engineering mechanics : abstracts of reports of the VII International scientific-practical conference* (Odessa, May 12-15, 2020). Odessa: *Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2020. P. 336–340.

84. Gaponova O. P., Golub N. R. Investigation of the structure and properties of multilayer reinforced layers obtained by the method of electrospark doping. *Modern technologies in industrial production : materials and program of the VII Ukrainian scientific and technical conference* (Sumy, April 21-24, 2020). Sumy: Sumy State University, 2020. P. 101.

85. Gaponova O. P. Formation of multilayer wear-resistant coatings by electrospark alloying. *Advanced Technologies in Research and Education: The collection of research materials of the third international conference: at 2 Volumes*. (Severodonetsk, February 27-28, 2020). Severodonetsk: Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2020. Vol. 2. P. 24–26.

86. Gaponova O. P. Research of quality of the multilayer coverings

received by a method of electrospark alloying. *Materials for work in extreme conditions* - 9: materials of the International Scientific Conference (Kyiv, December 18-19, 2019). Kyiv: National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2019. P. 49-51.

87. Gaponova O. P., Sarzhanov B. O. Improving the quality of the steel surface during electrospark alloying with graphite. *Advanced Technologies in Research and Education: The collection of research materials of the second international conference: (Severodonetsk, March 5-7, 2019)*. Severodonetsk: Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2019. P. 162–164.

88. Golub N. R., Gaponova O. P. On the issue of increasing the resource and restoring the efficiency of machine parts by forming functional coatings. *Modern technologies in industrial production: materials and program of the VI Ukrainian scientific and technical conference (Sumy, April 16-19, 2019)*. Sumy: Sumy State University, 2019. P. 102.

89. Bychenko M. M., Gaponova O. P. perspectives for the use of electrospark alloying to improve the quality of working surfaces of machine parts. *Modern technologies in industrial production : materials and program of the VI Ukrainian scientific and technical conference (Sumy, April 16-19, 2019)*. Sumy: Sumy State University, 2019. P. 108–109.

90. Improving the quality of working surfaces of parts made of austenitic chromium-nickel steels by the method of electrospark alloying / V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, N. R. Golub et al. Problems of machine reliability materials of the International scientific-methodical conference dedicated to the memory of Academician V. Ya. Anilovich (Kharkiv, November 12-13, 2019). Kharkiv: Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, 2019. P. 99–100.

91. Gaponova O. P. Quality analysis of sulfocementated coatings obtained by electrospark doping. *Problems of machine reliability: materials of the International scientific-methodical conference dedicated to the memory of Academician V. Ya. Anilovich (Kharkiv, November 12-13, 2019)*. Kharkiv:

Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, 2019. P. 101–102.

92. Gaponova O. P. Study of the peculiarities of structure formation and properties of electrospark aluminized coatings. *Advanced Technologies in Research and Education* : materials of the International Scientific and Practical Conference (Severodonetsk, 19-22 February 2018). Severodonetsk: Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2018. P. 184.

93. Zhilenko T. I., Gaponova O. P. Kinetic analysis of the surfaces, taken by the method of electrospark leguvannya. *Information technologies in metallurgy and machinery. ITMM'2018: theses of the Tenth International Scientific and Practical Conference* (Dnipro, March 27-9, 2018). Dnipro: National Metallurgical Academy of Ukraine, 2018, P. 15.

94. Nikolaunko A. S., Gaponova O. P. Method of applying a protective coating on the working surface of the part by electrospark doping. *Modern technologies in industrial production* : materials and program of the V Ukrainian interuniversity scientific and technical conference (Sumy, April 17-20, 2018). Sumy: Sumy State University, 2018. P. 78.

95. Gaponova O. P., Bychenko M. M., Zinchenko I. D. Analysis of the quality of complex coatings obtained by electrospark doping. *Materials for work in extreme conditions - 8: materials of the International Scientific Conference* (Kyiv, December 6-7, 2018). Kyiv: National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2018. P. 121–122.

96. Gaponova O. P. Possibilities of application electrospark surface treatment of steel products. *Systems for product development and production. Industry 4.0. Modern direction of automation and data exchange in production technologies: materials of the II International scientific-practical conference* (Sumy, May 22-26, 2017). Sumy: Sumy State University, 2017. P. 66–67.

97. Gaponova O. P., Okhrimenko V. O. Research of wear resistance of complex boride coatings. *Systems for product development and production. Industry 4.0. Modern direction of automation and data exchange in production*

technologies: materials of the II International scientific-practical conference (Sumy, May 22-26, 2017). Sumy: Sumy State University, 2017. P. 120–121.

98. Nikolaenko A. S., Gaponova O. P. Improvement of technology of increase of wear resistance of details of cars by electrospark alloying. *Modern technologies in industrial production*: materials of the scientific and technical conference of teachers, staff, graduate students and students of the Faculty of Technical Systems and Energy Efficient Technologies (Sumy, April 18-21, 2017): 2 Volume. Sumy: Sumy State University, 2017. Vol. 1. P. 120–121.

99. Okhrimenko V. O., Gaponova O. P. Features of the structure of boron-chromium and boron-copper coatings on tool steels. *Modern technologies in industrial production* : materials of the scientific and technical conference of teachers, staff, graduate students and students of the Faculty of Technical Systems and Energy Efficient Technologies (Sumy, April 18-21, 2017): 2 Volume. Sumy: Sumy State University, 2017. Vol. 1. P. 106–108.

100. Gaponova O. P., Nikolaenko A. S. Heat resistance of alloyed coatings obtained by electrospark alloying. *Materials for work in extreme conditions – 7*: materials of the International scientific and technical conference (Kyiv, November 30 – December 2, 2017). Kyiv: National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2017. P. 112.

101. Gaponova O. P., Okhrimenko V. O. Complex diffusion coatings during boring. *Materials for work in extreme conditions – 7*: materials of the International scientific and technical conference (Kyiv, November 30 – December 2, 2017). Kyiv: National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2017. P. 113.

102. Gaponova O. P., Okhrimenko V. O. Structure and properties of boride coatings doped with copper and chromium on tool steels. *Modern problems of agricultural mechanics* : abstracts of the XVI International Scientific Conference (Sumy, October 17-18, 2016). Sumy: Sumy State University, 2016. P. 146–148.

103. Okhrimenko V. O., Gaponova O. P. Effect of heat treatment on structure and properties of austenite-martensite stainless steel. *Systems of development and delivery of products for production: materials of the I International scientific-practical conference* (Sumy, May 17-20, 2016). Sumy: Sumy State University, 2016. P. 107.

104. Panov B. Yu., Gaponova O. P. Influence of preliminary cold plastic deformation on carbon diffusion of steel 20: materials and program of the IV Ukrainian interuniversity scientific and technical conference (Sumy, April 19-22, 2016): in 2 volumes. / editors : O. G. Gusak, V. G. Yevtukhov. Sumy: Sumy State University, 2016. Vol. 1. P. 85.

List of articles reflecting further scientific results of the thesis

105. Microstructure and Properties of AlCrFeCoNiCux High-Entropy Alloys / M. V. Demchenko, O. P. Gaponova, O. M. Myslyvchenko et al. *Journal of Engineering Sciences*. 2018. Vol. 5, Issue 1. P. C 11–C 16.

106. Research of conductivity in polycrystalline films with a thin coating using the modified Mayadas – Shatzkes model / T. P. Hovorun, O. A. Bilous, O. P. Gaponova et al. *Ukrainian Journal of Physics*. 2017. Vol. 62, No. 2. P. 132–139.

107. Research of structure and properties of diffusion coatings on tool steels after boron copper plating and boron chrome plating / O. P. Gaponova, V. O. Okhrimenko, S. V. Marchenko et. al. *Compressor and power engineering magazine*. 2017. No 2. P. 8–11.

108. Gaponova O. P., Baglyuk G. A. Effect of temperature-rate strain conditions on the power variables and structurization during hot-forging of the sintered Cu-2% Ti billets. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2016. Vol. 55, No. 7–8. P. 406–412.

109. Gaponova O. P., Hovorun T. P. The theoretical analysis of a dynamic softening in the sintered materials. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2015. Vol. 37, No. 8. P. 1113–1123.

110. Pogrebnjak O. D., Dyadyura K. O., Gaponova O. P. Features of

thermodynamic processes on contact surfaces of multicomponent nanocomposite coatings with hierarchical and adaptive behaviour. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2015. Vol. 37, No. 7. P. 899–919.

111. Gaponova O. P., Kolosyuk A. G. Researches of diffusion processes in powder materials and their role in structure formation. *Ukrainian Journal of Physics.* 2014. Vol. 59, No. 10. P. 1013–1019.

ЗМІСТ

СКРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧКИ.....	50
ВСТУП.....	52
РОЗДІЛ 1 ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ДИНАМІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	61
1.1. Проблеми, вирішення та перспективи створення спеціальних структур поверхневих шарів відповідальних деталей машин динамічного обладнання ..	61
1.2. Сучасні методи нанесення функціональних покриттів.....	73
1.3. Обґрунтування вибору методу електроіскрового легування для підвищення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей ДО	83
1.3.1. Особливості формування поверхневого шару при ЕІЛ	83
1.3.2. Створення однокомпонентних шарів на металевих поверхнях методом ЕІЛ.....	90
1.3.3. Створення багатокомпонентних покриттів методом ЕІЛ.....	99
1.4. Застосування методів фінішного оброблення з метою підвищення якості електроіскрових покриттів	104
1.5. Моделювання процесу формування покриття методом ЕІЛ	110
1.6. Висновки до розділу	113
1.7. Мета та завдання дослідження.....	115
РОЗДІЛ 2 МОЛОГІЯ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	117
2.1. Методологія досягнення мети дослідження.....	117
2.2. Устаткування для проведення електроіскрового легування.....	128
2.3. Обґрунтування вибору досліджуваних матеріалів	131
2.4. Методика формування однокомпонентних поверхневих шарів, отриманих методом електроіскрового легування, із застосуванням СТС	134
2.5. Методика формування багатокомпонентних поверхневих шарів, отриманих методом електроіскрового легування із застосуванням СТС	137
2.6. Методика визначення шорсткості поверхні	140

2.7. Проведення металографічних, дюрOMETричних досліджень зміненого поверхневого шару	141
2.8. Дослідження фазового і хімічного складів поверхневих шарів	144
2.9. Випробування покриттів на жаростійкість	147
2.10. Методика дослідження трибологічних властивостей	148
2.11. Випробування на розтяг	149
2.12. Висновки до розділу	149
РОЗДІЛ 3 ТЕРМОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ПРИ ЕЛЕКТРОІСКРОВОМУ ЛЕГУВАННІ.....	
3.1. Математична модель прогнозування якості поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ	152
3.2. Прогнозування жаростійкості поверхневих шарів, отриманих методом електроіскрового легування	182
3.3. Синергетичний принцип самоорганізації при ЕІЛ	185
3.3.1. Моделювання процесу формування покриття на основі методу фазової площини і статистичного аналізу	186
3.3.2. Кінетична теорія самоорганізації	189
3.3.3. Метод фазової площини	193
3.4. Висновки до розділу	203
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СТАНУ ОДНОКОМПОНЕНТИХ ПОКРИТТІВ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ	
4.1. Аналіз якості алітованих поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ....	206
4.2. Аналіз якості цементованих поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ220	
4.3. Аналіз якості сульфидованих поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ229	
4.4. Аналіз якості азотовмісних поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ	234
4.5. Висновки до розділу	239
РОЗДІЛ 5 УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ДЕТАЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЗАСНОВАНИХ НА МЕТОДІ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ.....	
	243

5.1. Аналіз якості сульфоцементованих покриттів, отриманих методами ЕІЛ	243
5.2. Аналіз якості сульфоалітованих покриттів, отриманих методами ЕІЛ	..... 258
5.3. Аналіз якості покриттів системи Al-C-S, отриманих методами ЕІЛ	..... 270
5.4. Аналіз якості покриттів системи Al-C-B, отриманих методами ЕІЛ, алюмінієвим електродом	..... 277
5.5. Аналіз якості сульфомолібденових покриттів, отриманих методами ЕІЛ	285
5.6. Створення квазібагатошарових зміцнених шарів методом електроіскрового легування	..... 295
5.7. Висновки до розділу	..... 308
РОЗДІЛ 6 ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ	
ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ДИНАМІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ 315	
6.1. Результати дослідження впливу способів підвищення якості робочих поверхонь на їх механічні властивості	..... 315
6.2. Результати порівняльних трибологічних випробувань поверхонь ковзання, оброблених методом ЕІЛ	..... 317
6.3. Управління якістю поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС	..... 322
6.3.1. Загальні положення	..... 322
6.3.2. Визначення констант рівнянь якості поверхневих шарів після однокомпонентного насичення	..... 323
6.3.3. Визначення констант рівнянь якості поверхневих шарів після багатокомпонентного насичення	..... 327
6.4. Статистичний та кінетичний аналіз процесу конденсації речовини при ЕІЛ із застосуванням СТС, шляхом побудови фазових портретів	..... 335
6.4.1. Статистичний аналіз процесу формування алітованих покриттів	... 335
6.4.2. Кінетичний аналіз процесу формування алітованих покриттів	..... 341
6.4.3. Кінетичний аналіз процесу формування Al-C-B покриттів	..... 345
6.5. Підвищення якості робочих поверхонь деталей ДО	..... 350
6.5.1. Зміцнення шийок валів	..... 350
6.5.2. Зміцнення деталей масляних ущільнень	..... 357

6.5.3. Зміцнення робочих коліс відцентрового компресору	362
6.5.4. Зміцнення вал-шестерні компресорної установки К-104 «ВАВЕТТА».....	365
6.5.5. Зміцнення прес-форми для формування виробів з полімерних композиційних матеріалів	368
6.6. Висновки до розділу	374
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	380
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	385
ДОДАТОК А	433
ДОДАТОК Б	437
ДОДАТОК Б.1	437
ДОДАТОК Б.2	441
ДОДАТОК Б.3	443
ДОДАТОК Б.4	446
ДОДАТОК Б.5	447
ДОДАТОК Б.6	448
ДОДАТОК Б.7	451
ДОДАТОК Б.8	454
ДОДАТОК Б.9	457
ДОДАТОК Б.10	458
ДОДАТОК В	459
ДОДАТОК Г	460
Г.1 Математична модель прогнозування якості поверхневих шарів, отриманих алітуванням методом ЕІЛ	460
Г.2 Математична модель прогнозування якості поверхневих шарів, отриманих методом ЦЕІЛ із застосуванням СТС	469
Г.3 Математична модель прогнозування якості азотованих поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ	477
ДОДАТОК Д	488

Д.1 Математична модель прогнозування якості сульфоцементованих шарів, отриманих методом ЕІЛ	488
Д.2 Математична модель прогнозування якості сульфоалітованих поверхневих шарів	502
Д.3 Математична модель прогнозування якості Al+C+V поверхневих шарів	517
Д.4 Математична модель прогнозування якості сульфомолібденових поверхневих шарів	527
Д.5 Математична модель прогнозування якості карбонітрованих поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ.....	542
ДОДАТОК Е	553
ДОДАТОК Ж	556
ДОДАТОК И.....	557
ДОДАТОК К	560
ДОДАТОК Л	563
ДОДАТОК Н.....	565
ДОДАТОК П.....	566

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧКИ

ЕІЛ – електроіскрове легування;

СТС – спеціальне технологічне середовище;

ЕМ – електродний матеріал;

ДО – динамічне обладнання;

ПК – підшипники ковзання;

ТУ – торцеві ущільнення;

ПШ – підшипникові шийки;

Ф-К – фретинг-корозія;

ХТО – хіміко-термічне оброблення;

ІА – іонне азотування;

СВЧ – оброблення струмами високої частоти;

ППД – поверхнева пластична деформація;

АВ – алмазне вигладжування;

ОК – обкатка кулькою;

ОР – обкатка роликом;

БУФО – безабразивне ультразвукове фінішне оброблення;

ПМ – пружні муфти;

ЗВ – захисна втулка;

КНТ – компресор низького тиску;

ЦЕІЛ – цементация методом ЕІЛ;

ТІУ – торцеві імпульсні ущільнення;

КІБ – катодно-іонне бомбардування;

ТО – термічне оброблення;

ЛО – лазерне оброблення;

ЛЕ – легуючий електрод;

ЕМ – електродний матеріал;

КПЕ – оброблення високоенергетичними концентрованими потоками енергії та речовини;

РМР – регулярний мікрорельєф поверхні;

ЛШ – легований шар;

ВСТУП

Актуальність роботи. Висока енергоємність внутрішнього валового продукту України значно знижує конкурентоспроможність національного виробництва, підвищення якої можна домогтися лише за рахунок модернізації устаткування промисловості, зниження енергоємності вироблюваної продукції впровадження новітніх енергозберіжливих, екологічно безпечних технологій.

Велика кількість відповідальних деталей вузлів тертя компресорів, турбодетандерів, вентиляторів, насосів, холодильних машин та машинних приводів, а також машин спеціалізованого застосування: дробарок, млинів, сепараторів, центрифуг та іншого динамічного обладнання (ДО), працює за високих швидкостей, тисків, температур, а також в умовах абразивного, корозійного та інших видів впливу робочих середовищ.

Підвищення режимних параметрів деякого ДО супроводжується розробленням нових композиційних матеріалів типу «основа – покриття», що поєднують у собі захисні властивості покриттів із механічною міцністю основи. На цей час при зміцненні поверхні виробів усе більшого значення набувають методи з використанням концентрованих потоків енергії. Серед них найбільш перспективною вважається технологія електроіскрового легування (ЕІЛ), яка привертає найбільшу увагу інженерів-технологів. Основними перевагами ЕІЛ порівняно з іншими методами є висока адгезія покриття з основою, можливість локального оброблення поверхні, екологічна безпека, відсутність деформацій та жолоблення, низькоенергоємне устаткування, що на порядок менше, ніж під час хіміко-термічного оброблення (ХТО), відсутність необхідності попередньої підготовки поверхні та ін. Значно розширити галузь застосування методу ЕІЛ для ширшого кола відповідальних деталей ДО можна за рахунок уведення між анодом (електродом-інструментом) і катодом (деталлю) спеціального технологічного середовища (СТС) у вигляді пасти, до складу якого входять необхідні легувальні елементи, необов'язково струмопровідні.

Технологія ЕІЛ може ефективно конкурувати, а інколи, залежно від вимог креслення, повністю замінювати такі методи ХТО, як цементация, металізація та ін., що потребують дорогого та об'ємного обладнання, є трудомісткими, тривалими за часом і найчастіше екологічно небезпечними. Мікрометалургійні процеси при ЕІЛ проходять за частки секунди, без розігрівання всієї маси деталі або, тим більше, відпалу її поверхні. При ХТО товщина легованого шару більша, ніж під час ЕІЛ, але такі деталі як вали, штоки, плунжери – в результаті жолоблення значно відхиляються від своєї осі (до 3 мм), зазвичай у різних площинах, їх необхідно піддавати правці під пресом, неодноразово відпалювати для зниження твердості й підвищення пластичності або шліфувати, знімаючи з поверхні значний шар металу, причому найбільш твердого. Метод ЕІЛ позбавлений цих недоліків та дозволяє створювати якісні покриття, що мають заданий комплекс фізико-механічних властивостей.

Хоча для ЕІЛ притаманна підвищена шорсткість поверхні та деякі інші недоліки, їх можна знизити або повністю усунути за рахунок поєднання з іншими зміцнювальними технологіями (лазерне оброблення, поверхневе пластичне деформування (алмазне вигладжування, обкатування кулькою) або безабразивним ультразвуковим фінішним обробленням (БУФО).

Таким чином, актуальним напрямком дослідження є створення енергоефективних та екологічно безпечних технологій отримання функціональних покриттів, що базуються на методі ЕІЛ з використанням спеціального технологічного середовища, оцінювання і прогнозування структурного стану поверхонь після їх оброблення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана на кафедрі технічного сервісу Сумського національного аграрного університету (СНАУ) в рамках бюджетної теми Міністерства освіти і науки України «Розробка енергозберігаючих технологій для забезпечення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей», номер держреєстрації 0116U002756, 2016–2017 рр.; Сумському

державному університеті (СумДУ) в рамках бюджетних тем Міністерства освіти і науки України: «Науково-технологічні аспекти дизайну матеріалів», номер держреєстрації 0110U001770, 2010–2014 рр., «Сучасні технології розробки та отримання перспективних матеріалів і формоутворення виробів машинобудівної галузі», номер держреєстрації 0114U005445, 2014–2019 рр., «Розроблення та дослідження властивостей нових функціональних матеріалів», номер держреєстрації: 0120U101433, 2019–2024 рр., «KVP Welding Technologies», номер держреєстрації 09-12, 2019 р., «Аналіз впливу гідродинамічних сил, які діють у вузьких зазорах ущільнень та опор, на підвищення енергоефективності та зниження шкідливих викидів і вібрацій відцентрових машин», номер держреєстрації 0120U102004, 2020–2023 рр. та низки госпдоговорів, які були виконані за участі авторки.

Мета роботи – підвищення довговічності деталей динамічного обладнання шляхом керування структурою та властивостями сталейних поверхонь за рахунок комплексного впливу електроіскрового легування із застосуванням СТС.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- проаналізувати і систематизувати способи підвищення якості робочих поверхонь деталей ДО;
- розробити методологію управління структуроутворенням сталейних поверхонь під час їх оброблення методом ЕІЛ із застосуванням СТС;
- дослідити особливості формування структури та властивостей однокомпонентних покриттів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС за різних режимів оброблення;
- встановити вплив складу СТС та режиму ЕІЛ на особливості формування структурно-фазового стану багатоконпонентних покриттів;
- розробити адекватну математичну модель прогнозування якості поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ з використанням СТС;
- розробити математичну модель формування електроіскрового покриття, що ґрунтується на методі фазової площини й статистичного

аналізу, яка враховує параметри процесу ЕІЛ, а також перевірити її адекватність;

– дослідити залежності механічних і трибологічних властивостей модифікованих поверхонь від матеріалу легувальних електродів-інструментів, складу СТС, а також енергетичних режимів ЕІЛ і встановити найбільш ефективно їх поєднання;

– розробити наукові принципи практичної реалізації енергоефективних та екологічно безпечних технологій одержання функціональних покриттів, що базуються на методі ЕІЛ з використанням СТС, в поєднанні з іншими методами підвищення якості поверхневих шарів деталей для подальшого впровадження у виробництво.

Об’єкт дослідження – процеси одержання на сталях покриттів для підвищення довговічності деталей ДО.

Предмет дослідження – закономірності формування структури та фазового складу покриттів із заданими властивостями, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС.

Методи дослідження. На основі методу системного аналізу досліджені конструкторсько-технологічні вимоги до деталей ДО, а також існуючі методи підвищення їх якості. Математична модель формування електроіскрового покриття, що базуються на методі фазової площини й статистичного аналізу, яка враховує параметри процесу ЕІЛ, а також модель прогнозування якості поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ, побудовані на основі фундаментальних положень фізики, фізичного металознавства, матеріалознавства. Лабораторні та промислові дослідження виконано на сучасному устаткуванні та вимірювальній апаратурі. Використовувалися сучасні методи досліджень: оптична та електронна мікроскопія, рентгеноструктурний і мікрорентгеноспектральний аналізи. Випробування з визначення комплексу характеристик: мікротвердість, показники міцності та пластичності, а також зносостійкості й жаростійкості отриманих покриттів – проведені за стандартними методиками.

Наукова новизна одержаних результатів

Вперше:

1. Одержано залежності особливостей формування фазового складу та структури обробленої поверхні вуглецевих сталей після формування однокомпонентних покриттів методом ЕІЛ з використанням СТС (алітування, цементация) та показано, що після оброблення досягається підвищення товщини та мікротвердості робочого шару.

2. Установлена можливість одержання сульфідованих шарів під час оброблення сталей поверхонь ЕІЛ з використанням СТС, що містить сірку, компактним графітовим електродом та електродом-інструментом із металевого дроту, що забезпечує поряд зі зміцненням меншу схильність поверхонь від захоплення деталей у спряженнях під час тертя.

3. Отримані азотовані та нітроцементовані поверхні сталей новим екологічно безпечним і менш енергозатратним методом ЕІЛ з використанням СТС. Установлений взаємозв'язок між структурою та параметрами ЕІЛ.

4. Проведено одночасне насичення сталі вуглецем, алюмінієм і бором методом ЕІЛ із застосуванням СТС. Установлено, що фазовий склад покриттів на сталях 20 і 40 представлений твердими розчинами ОЦК та ГЦК, інтерметалідом Fe_4Al_{13} і легованим бороцементитом $Fe_3(CB)$. Утворення цих фаз сприяє значному зміцненню і збільшенню мікротвердості поверхневого шару до 12 350 МПа.

5. Під час дослідження сульфомолібденових покриттів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС, за допомогою рентгенографічного аналізу встановлена наявність дисульфиду молібдену як на поверхні (до 8 % за мас.), так і на глибині 15 мкм (до 5 % за мас.), що запобігає захопленню поверхонь тертя в період припрацювання і сприяє підвищенню зносостійкості та довговічності деталей у трибоспряженнях.

6. Запропоновані рівняння прогнозування показників структури (товщини, суцільності), механічних властивостей (мікротвердості) та

геометричних параметрів (шорсткості) однокомпонентних і багатокомпонентних покриттів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС, від параметрів процесу ЕІЛ, що дозволяє цілеспрямовано встановлювати алгоритм подальшого впливу для забезпечення потрібних властивостей поверхні деталей ДО.

Набуло подальшого розвитку математичне моделювання формування покриття, що ґрунтується на методі фазової площини і статистичного аналізу. Розроблена модель описує особливості утворення покриттів під час ЕІЛ із застосуванням СТС. Побудовано фазові портрети температури та напруження від концентрації речовини, що показують існування стаціонарного стану системи «покриття-основа», та свідчать про дифузійний характер ЕІЛ покриттів.

Практичне значення одержаних результатів. Розробки захищені 34 патентами, зокрема 13 на винахід, були виконані на підприємствах ТОВ «ТРІЗ», м. Суми (2019–2020 р.), АТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання» (2019 р.), ПАТ «Сумихімпром» (2020 р.), КП «Міськводоканал» (2019 р.), АТ «Сумський завод насосного та енергетичного машинобудування «НАСОСЕНЕРГОМАШ» (2020 р.), ТОВ «Науково-впровадницьке підприємство СУМИПЛАСТПОЛІМЕР» (2020 р.), кафедрі технічного сервісу Сумського національного аграрного університету, де для виконання нових технологій розроблені та затверджені спеціальні технічні умови.

Очікуваний економічний ефект від упровадження нових технологій, захищених патентами, становить 1 млн 171 тис. грн.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, одержані автором самостійно та викладені в працях [12, 20, 21, 23, 81, 85, 91, 92, 96]. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок полягає в такому: встановлення закономірностей формування структури покриттів [1–18, 20–47, 49–64, 66–105, 107–110], проведення дюрOMETричних

досліджень [1–18, 20–47, 49–64, 66–105, 107–110], підготовка зразків для проведення рентгенографічних та локального мікрорентгеноспектрального аналізу [1–9, 11, 12, 16–18, 21–23, 26–30, 34–39, 41–45, 47, 49–55, 57–67, 70–71, 73–79, 81–86, 91, 92, 95, 99, 105, 107], проведення випробувань на зносостійкість [5, 9, 13, 25, 29, 34, 42, 45, 47, 52, 66, 72, 74, 97–99, 107] і жаростійкість [3, 18, 20, 33, 43, 92, 100] покриттів, обґрунтування вибору матеріалів та методів дослідження, аналіз одержаних результатів [1–111], розроблення нових підходів до побудови математичної моделі процесів ЕІЛ, що базується на методі фазової площини і статистичного аналізу [4, 73, 78, 93], розроблення математичної моделі прогнозування якості поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ [1–3, 34, 35, 46, 61], дослідження та розроблення нових технологічних процесів моделювання і прогнозування структуроутворення та властивостей покриттів [1–3, 34, 35, 46, 61, 106, 109–111].

В отриманих патентах запропоновані нові способи оброблення робочих поверхонь деталей машин та інструменту методом ЕІЛ, а також матеріали й режими оброблення, визначені властивості отриманих покриттів [36–68], способи прогнозування якісних параметрів покриттів [35, 46, 61].

У монографіях [1], [2] і [3] автором особисто розроблені матеріали п'ятого, третього та п'ятого розділів, відповідно.

Апробація результатів роботи. Основні положення й результати дисертаційної роботи розглядалися, обговорювалися та отримали позитивні відгуки на багатьох міжнародних науково-технічних і практичних конференціях у період 2016–2020 рр.: «Сучасні проблеми землеробської механіки», присвяченої 90-річчю Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка та 120-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка (м. Харків, Україна, 17–18 жовтня 2020 р.), «Actual problems of engineering mechanics» (м. Одеса, ОГАСА, 12–15 травня 2020 р.), «International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)» (м. Одеса, Україна, 15–20

вересня 2019 р., 9–13 листопада 2020 р.), «2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (DSMIE-2019)» (м. Луцьк, ЛНТУ, Україна, 11–14 червня 2019 р.), «8th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP 2018)» (Затока, Україна, 9–14 вересня 2018 р.), «International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)» (м. Одеса, ОНАЗ ім. О. С. Попова, Україна, 10–14 вересня 2018 р. та 9–13 вересня 2019 р.), «International Scientific and Engineering Conference Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery, HERVICON+PUMPS» (м. Суми, СумДУ, Україна, 5–8 вересня 2017 р. та 8–11 вересня 2020 р.), «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, СумДУ, квітень 2017–2020 рр.), «Сучасні технології в науці та освіті» (м. Сєверодонецьк, СНУ ім. Володимира Даля, Україна, лютий 2018 р., березень 2019 р., лютий 2020 р.), «Матеріали для роботи в екстремальних умовах» (м. Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», грудень 2017–2020 рр.), «Проблеми надійності машин», присвяченої пам'яті академіка В. Я. Аніловича» (м. Харків, ХНТУСГ, 12–13 листопада 2019 р.), «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ITMM'2018» (м. Дніпро, Національна металургійна академія України, 27–29 березня 2018 р.), «Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво» (м. Суми, СумДУ, травень 2016, 2017 рр.), «Сучасні проблеми землеробської механіки» (м. Суми, СНАУ, 17–18 жовтня 2016 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 111 наукових працях, зокрема: 3 монографіях у співавторстві, 33 статтях в спеціалізованих наукових виданнях України і 6 статтях у закордонних виданнях; 25 статті входять до міжнародних наукометричних баз даних SCOPUS та/або Web of Science. Отримано 34 патенти (з яких 13 на винахід), опубліковано 35 матеріалів і тез у збірниках доповідей наукових конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи викладено на 568 сторінках, зокрема 12 додатків на 136 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 431 сторінка, 134 рисунків, 61 таблиця. Список використаних джерел налічує 359 найменувань на 47 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ДИНАМІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

1.1. Проблеми, вирішення та перспективи створення спеціальних структур поверхневих шарів відповідальних деталей машин динамічного обладнання

Устаткування можна класифікувати на динамічне (машини) і статичне (судини і апарати). Динамічне обладнання (ДО) включає в себе компресори, газодувки, вентилятори, насоси, холодильні машини і машини приводу (електродвигуни, турбіни газові і парові, газомотори, дизелі). У цю ж групу можна включити машини спеціалізованого застосування: дробарки, млини, грохоти, дозатори, живильники, перемішувальні пристрої мішалок, сепаратори, центрифуги, фільтри барабанні та ін. [1].

Підвищення ефективності роботи ДО можна вирішити застосуванням нових модернізованих вузлів: роторів, підшипників ковзання (ПК), торцевих ущільнень (ТУ), з'єднувальних муфт та ін., які відповідають сучасному рівню розвитку і забезпечують високу надійність експлуатації агрегатів на всіх технологічних режимах.

До сучасних деталей машин ДО ставляться наступні вимоги (рис. 1.1): високі експлуатаційні показники (продуктивність, точність, ККД; простота і безпека обслуговування; можливість автоматизації); висока надійність; технологічність і економічність. Не менш важливою вимогою є також екологічна безпека, яка проявляється на всіх етапах їх життєвого циклу.

Деталі машин в процесі експлуатації можуть бути жорстко з'єднані між собою або мати відносне переміщення, причому в останньому випадку за наявності мастильного матеріалу або без нього, під навантаженням або без нього. Зазвичай втрата працездатності деталей машин та прискорений вихід їх із ладу під час експлуатації виникають з трьох основних причин: втома матеріалу, корозійне руйнування, зношування поверхонь тертя деталей [2].



Рисунок 1.1 – Вимоги, що ставляться до деталей машин динамічного обладнання

Відповідно до ГОСТ 27674-88, розрізняють наступні види зношування: механічне, корозійно-механічне, абразивний, гідроерозійне (газоерозійне), гідроабразивне (газоабразивне), утомне, кавітаційне, зношування при заїданні, окисне, зношування при фретингу, зношування при фретинг-корозії, електроерозійне. Доведено існування також водневого виду зношування, який на сьогодні не внесений до переліку видів зношування в державних стандартах [3].

Основними матеріалами для виготовлення деталей є сталі різних класів (конструкційні для цементації (20, 20Х, 12ХН3А, 18ХГТ і ін.), покращувані (45, 40Х, 40ХН, 40ХН2МА, 30ХГТ, 30ХГСА, 38Х2МЮА і ін.), будівельні (Ст3кп, 12Г2С, 09Г2СД, 10ХНДП і ін.), ресорно-пружинні (65, 75, 60Г, У9А, 60С2, 50ХФА і ін.), підшипникові (ШХ15, ШХ20СГ і ін.) і т.д. ; інструментальні (У8А, ХВГ, Р6М5, Х12 і ін.); з особливими властивостями – корозійностійкі, жароміцні, жаростійкі, зносостійкі і ін.), а також чавуни, деякі кольорові метали і неметалеві матеріали.

Збільшення надійності та терміну експлуатації сучасних машин призвело до необхідності використання деталей, виготовлених з матеріалів та

сплавів із покращеними властивостями. Поліпшення властивостей цих деталей забезпечується, як правило, застосуванням високолегованих сталей, що обумовлює великі витрати дефіцитних легуючих елементів. Особливо гостро стоїть це питання в Україні, що не має достатньо ресурсів для виробництва високолегованих сплавів з нікелем, хром, ванадієм, молібденом, вольфрамом. У свою чергу, застосування високолегованих сталей і сплавів призводить до підвищення собівартості деталей машин, що пов'язано зі збільшенням ціни вихідних матеріалів при їх виробництві, ускладненням технологічного процесу, пов'язаного з особливостями їх механічної та термічної обробки.

Більшість параметрів виробу визначає стан поверхневого шару матеріалу, з якого воно виготовлено. Очевидно, що використання дефіцитних і дорогих матеріалів в усьому об'ємі виробу недоцільно.

Конструкторсько-технологічний аналіз деталей машин ДО, для яких актуально підвищення якості їх робочих поверхонь, дозволив виділити їх основні групи, в залежності від вимог, що пред'являються як до самих деталей, так і до їх поверхонь. Розглянемо основні з них.

Ротор відцентрового компресора або насоса складається з вала, на якому закріплені робочі колеса, розвантажувальний поршень (думіс), напівмуфта, роторна частина лабіринтових ущільнень і т.д. На рисунку 1.2 показаний ротор компресора високого тиску синтезгазу з розвантажувальними думісами.

Основними видами пошкодження матеріалу ДО є корозія й ерозія від впливу середовища, кавітаційне зношування (для насосного обладнання) і фретинг-корозія.

Для валів роторів характерними поверхнями (елементами), що піддаються зносу є підшипникові шийки (ПШ), тобто шийки під ПК і посадочні поверхні під: підшипники кочення, робочі колеса, напівмуфти і т.п. Якщо ПШ зношуються переважно через абразивне зношування, то посадочні поверхні головним чином в результаті фретинг-корозії (Ф-К). При

цьому обидва види зношування поглиблюються агресивним впливом навколишнього середовища.



а



б

Рисунок 1.2 – Ротор компресора синтезгаз(а) з розвантажувальними думісами (б)

При виготовленні валів, підвищення зносостійкості ПШ і посадочних поверхонь досягають традиційними методами хіміко-термічного оброблення (ХТО) цементацією й азотуванням, які, зазвичай, проводять у шахтних печах. В процесі ХТО вали піддаються жолобленню, причому більшою мірою при цементації. Поверхні на валу, що не підлягають зміцненню, покривають спеціальною обмазкою. Поводки та деформації усуваються наступним шліфуванням, а в окремих випадках, при великих викривленнях, проводять відпускання (зниження твердості), вирівнювання на пресі і, нарешті шліфування. Слід зазначити, що при шліфуванні видаляється значна частина зміцненого поверхневого шару, причому найбільш твердого.

При іонному азотуванні (ІА) вали найменше піддаються жолобленню і деформаціям. Зазвичай зміна форми вала відбувається в межах допуску. Однак застосування ІА обмежується розмірами камери.

При дрібносерійному виробництві, а в окремих випадках і при одиничному типі виробництва, для зміцнення ПШ застосовують оброблення струмом високої частоти (СВЧ). Істотним недоліком такої технології є досить висока вартість виготовлення оснащення, що значно знижує галузь

застосування даного методу для більш широкого кола даного класу деталей в одиничному виробництві.

При ремонті ПШ шліфують і відновлюють гальванічним нанесенням твердого хрому. При великих розмірах валів для відновлення ПШ виготовляють спеціальне оснащення, де розміри гальванічної ванни значно зменшені й співставні з розміром ПШ. Слід зазначити, що така технологія не завжди призводить до позитивного результату і в окремих випадках покриття відшаровується вже при наступній шліфовці і процес відновлення доводиться повторювати.

Серед широкої номенклатури поверхонь деталей машин, що виготовляються та відновлюються, значна частина припадає на посадочні місця валів під підшипники кочення [4].

Існуючі технології виготовлення, а тим більше відновлення, в повній мірі не забезпечують необхідні фізико-механічні властивості посадочних поверхонь валів під підшипники кочення. Основними способами відновлення посадочних поверхонь валів під підшипники кочення є: зварювання, наплавлення, напилення, установка додаткової деталі, заміна частини деталі, застосування полімерних матеріалів [5-7].

Проблема довговічності посадочних поверхонь валів під підшипники кочення і пошук оптимальних способів підвищення їх надійності залишається, як і раніше, актуальним завданням [8].

Слід зазначити, що такі технології відновлення посадочних поверхонь, як під підшипники кочення, так і інші деталі можна застосовувати лише до валів насосів. Для відцентрових компресорів, у яких число обертів може перевищувати 20 000 об / хв., такі технології, як правило, не застосовують. В даному випадку використовують комбіновану технологію, що включає електроіскрове легування (ЕІЛ) і поверхневу пластичну деформацію (ППД) [9-11], хоча таким способом важко сформувати покриття з високою якістю поверхні товщиною більше 0,2 мм.

За останні роки з'явилися нові і більш перспективні технології виготовлення ПШ і посадочних поверхонь, які полягають у проведенні процесу ЕІЛ графітовим електродом, тобто цементації методом електроіскрового легування (ЦЕІЛ) з подальшим обробленням методами ППД: обкаткою кулькою (ОК) або роликом (ОР) (рис. 1.3). Останнім часом метод ППД здійснюється безабразивним ультразвуковим фінішним обробленням (БУФО).

Така комбінована технологія має ряд переваг порівняно з вище описаними методами. У ній відсутні практично всі недоліки методів ХТО і оброблення СВЧ. Крім того, вона має всі переваги ЕІЛ (локальність, мала витрата енергії, відсутність об'ємного нагріву матеріалу, висока міцність зчеплення покриття з основним металом, простота автоматизації процесу, «вбудовуваність» в технологічний процес виготовлення деталей і суміщення операцій, гнучкість процесу за рахунок технологічної уніфікації та ін. [12-14]), а такі недоліки як збільшення шорсткості поверхні, зниження втомної міцності і виникнення розтягуючих залишкових напружень усуваються подальшою ППД.

На нашу думку, недоліком комбінованої технології ЕІЛ + ППД є невелика товщина цементованого шару (до 50 мкм), яка після ППД може знижуватися до 20-30 мкм, що за певних умов (наприклад, потрапляння абразиву в масло і т.п.) може призвести до його передчасного руйнування. Тому дослідження, спрямовані на збільшення товщини зміцненого шару при ЕІЛ, актуальні і своєчасні.

Робочі колеса крім газо- та гідроабразивного зносу піддаються корозійному й ерозійному зношуванню в результаті впливу агресивного середовища. Крім того, вкрай небезпечною є ерозія стінок (дисків) колеса, спричинена виникненням кавітації в насосі, що призводить до сильних ударів, підвищення вібрації, вищерблення та роз'їдання матеріалу стінок [15].



а



б



в



г



д



е

а – ЕІЛ підшипникової шийки вал-шестерні; б – ППД (ОР) підшипникової шийки зубчатого колеса; в – часткове оброблення методом ЕІЛ посадкової поверхні вала; г – повна обробка методом ЕІЛ посадкової поверхні вала; д – обробка посадкової поверхні вала методом БУФО; е – вал відцентрового насоса з посадковою поверхнею під робочі колеса, зміцненої методом ЕІЛ + БУФО

Рисунок 1.3 – Зміцнення поверхонь вала комбінованою технологією ЕІЛ + ППД

З метою збільшення терміну служби робочих коліс відцентрових компресорів, що піддаються абразивному зношуванню, застосовують шлікерні покриття зносостійкими матеріалами.

У робочих колесах дуттьових машин застосовують наплавлення і броньові накладки. Броньові накладки виконуються у вигляді вигнутих пластин, що прикріплюються до робочих поверхонь лопаток, а також у вигляді куточків, приварюється в місцях стику лопаток з основним диском [12].

В останні роки на базах з ремонту обладнання має широке застосування покриття поверхонь робочих коліс полімерними матеріалами. Таке покриття не тільки зменшує гідравлічні втрати потужності насоса, але й захищає від абразивного зносу і впливу хімічно активного середовища [16-18].

В зв'язку з тим, що робоче колесо має закриті поверхні складної конфігурації, до якості покриття цих поверхонь ставляться підвищені вимоги. Рекомендована товщина такого покриття складає 0,2-0,3 мм. На сполучених поверхнях робочих коліс і міжступінчатих ущільнень товщина покриття повинна бути 0,4-0,6 мм, так як необхідно мати припуск для наступного механічного оброблення покриття з метою отримання необхідних розмірів.

Для зміцнення робочих коліс перспективною технологією є ЕІЛ вхідних і вихідних кромek лопаток і дисків. При зміцненні зовнішніх поверхонь ступиць колеса (щілинних ущільнень) доцільно застосовувати комбіновану технологію, що включає цементацію методом ЕІЛ (ЦЕІЛ) і ППД. Тут також не менше актуальним є збільшення глибини і твердості зміцненого шару [19].

Сполучні муфти в роторних машинах ДО мають не тільки забезпечувати надійну передачу великих крутних моментів при високій частоті обертання, а й мати стабільно низький дисбаланс, демпфірувати вібрації, які передаються по валопроводу від одних частин агрегату до інших, а також мати оптимальні пружно-масові характеристики. Для роботи в зоні великих навантажень муфти мають бути з високим ступенем надійності та тривалим ресурсом роботи. Таким вимогам найбільше відповідають пружні муфти (ПМ) з пакетом металевих мембран (рис. 1.4).

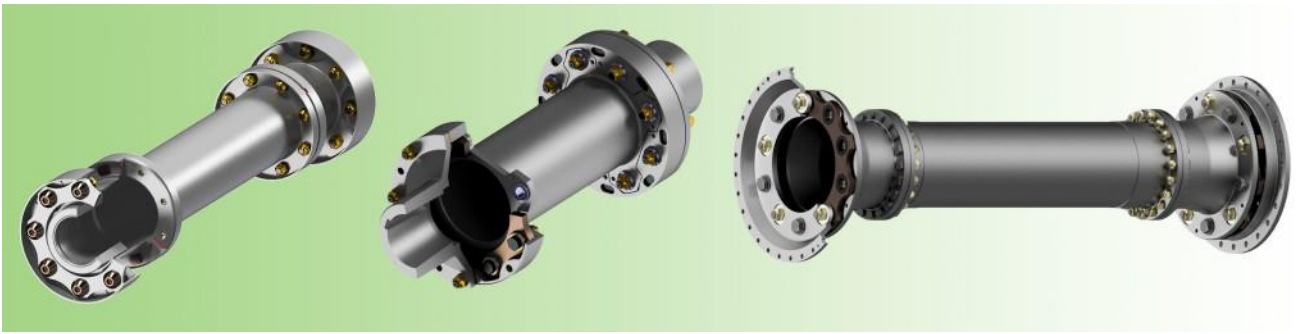
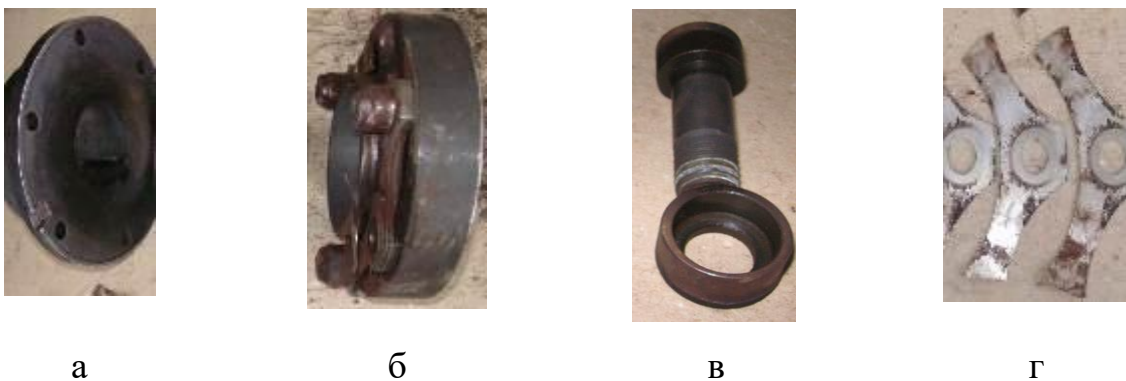


Рисунок 1.4 – Муфта з пружними металевими елементами конструкції
ТОВ «ТРИЗ» [22]

Пружна муфта є характерним прикладом виникнення Ф-К. Практика показує, що в процесі роботи, дії Ф-К в тій чи іншій мірі піддаються багато деталей ПМ, такі як поверхні напівмуфт, проставок, болтів, шайб, втулок, пружних елементів та ін. (рис. 1.5).

Під дією циклічних робочих навантажень в ПМ виникають періодичні зміщення контактуючих поверхонь деталей. Наявність контактного тиску між спряженими поверхнями і амплітуди їх відносного зсуву зумовлюють появу пошкоджень від Ф-К [23].



а – напівмуфта; б – проставка з пакетом гнучких елементів;

в – болт і втулка; г – зруйновані гнучкі елементи

Рисунок 1.5 – Деталі пружної муфти, схильні до Ф-К

У роботі [24] запропоновано з метою підвищення якості поверхні ПМ, проводити ЦЕІЛ, нанесення на зміцнений шар м'яких антифрикційних

металів, наприклад, міді, срібла та ін. з подальшою БУФО. Комбіновані електроіскрові покриття (КЕП), сформовані таким способом, можуть бути перспективними для підвищення якості пресових з'єднань.

В якості вузлів ущільнення високооборотних компресорів найбільш часто використовують плаваючі ущільнення. Згідно [25] захисна втулка (ЗВ), що є відповідальною деталлю в плаваючих ущільненнях компресорів, працює за таких важких умов: тиск до 35-40 МПа, агресивне середовище, несприятливий температурний режим роботи. Таким чином, поверхня ЗВ має бути виконана з твердого зносостійкого матеріалу, а її основа – володіти достатньою пластичністю для забезпечення можливості напресовки на вал.

Зазначені вимоги обумовлюють необхідність застосування композиційних матеріалів типу «основа-покриття», що є вдалим поєднанням захисних властивостей покриття і механічної міцності основи.

Традиційно в плаваючих ущільненнях компресорів в якості матеріалу основи ЗВ застосовується МОНЕЛЬ (сплав на основі нікелю, що містить в якості основного легуючого елемента 27-37% міді) [26]. Цей сплав має високу стійкість проти корозії, характеризується досить високою межею міцності на розрив і хорошою пластичністю в гарячому і холодному станах. Для збільшення ресурсу роботи ЗВ на робочу поверхню плазмовим напиленням або вакуумної наплавленням наноситься зносостійкий матеріал, що володіє високою корозійною стійкістю, на основі нікелю – хастеллой (товщиною ≈ 2 мм) [27].

Аналіз технології виготовлення монелевих ЗВ показав, що це досить трудомісткий процес, для якого властиві наступні показники: значні витрати на матеріали; багаторівневий контроль як матеріалу основи, так і матеріалу покриття; складна технологія нанесення покриття; низький коефіцієнт використання матеріалу (0,1-0,3); великий відсоток браку (близько 20%); необхідність застосування спеціалізованої технологічної лінії і т.д. Зазначене обумовлює необхідність розробки нової, більш економічно вигідної технології їх виготовлення.

В якості альтернативи, для заміни ЗВ з монель-металу на більш дешеві, але такі, що не поступаються за своїми експлуатаційними характеристиками, фахівцями «ТРИЗ» ЛТД (м. Суми) були розроблені два способи їх виготовлення.

Стосовно першого способу, ТОВ «ТРИЗ» до певного часу виготовляв ЗВ зі сталі 38Х2МЮА або 40ХН2МА, піддаючи їх процесу карбонітрації в розплаві солей з наступним шліфуванням поверхні після гарячої пресовки на вал ротора. Але, слід зазначити, що в цьому випадку видаляється значна частина поверхневого шару, причому саме того, що характеризується найбільшою твердістю, а це, відповідно, знижує ефективність застосування даної технології.

Другий спосіб вперше застосовано під час проведення зупинного ремонту в березні 2014 року на ПАТ «АЗОТ» м. Черкаси для ремонту ротора КНТ компресора поз. 103J. Даний спосіб полягає в тому, що після посадки на вал термооброблених втулок, поверхнєве зміцнення здійснювалося методом ЦЕІЛ з подальшою обробкою методом БУФО (рис.1.6).

Аналогічно проводиться зміцнення торцевих поверхонь при виготовленні зовнішніх і внутрішніх плаваючих кілець. На внутрішні циліндричні поверхні плаваючих ущільнень, для підвищення зчеплення бабітового шару з основою, методом ЕІЛ перед лудінням, наноситься мідь. На контактуючі торцеві поверхні кілець, що ущільнюються, і відповідних деталей корпусу і кришки після ЦЕІЛ наносять шар зі срібла (рис. 1.7).

У таблиці А.1 ДОДАТКУ А представлені деякі вузли ДО, традиційні методи підвищення їх якості при виготовленні та ремонті, а також найбільш перспективні технології, що відрізняються підвищеною екологічною безпекою, меншими енерговитратами, більш низькою собівартістю і підвищеним міжремонтним пробігом.



а



б

а – після ЦЕІЛ; б – після ЦЕІЛ і БУФО

Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд втулки

ЦЕІЛ поверхні



а – зовнішнє; б – масло-газ.

Рисунок 1.7 – Кільця плаваючого ущільнення ТОВ «ТРИЗ»

Результати аналізу щодо причин втрати працездатності різних класів деталей машин ДО, які працюють у важких умовах експлуатації вказують, що, незважаючи на те, що до них застосовується значна кількість відповідних методів захисту, вони піддаються різноманітним видам зношування і наразі складно віддати перевагу будь-якому способу захисту або їх комбінації без додаткових досліджень.

Водночас основним завданням методів, що застосовуються, є підвищення якісних параметрів поверхневого шару, а саме: підвищення твердості і мікротвердості, зниження шорсткості, підвищення зносостійкості

і відновлення зношених ділянок поверхонь, зміна величини і знаку залишкових напружень, збільшення втомної міцності і т.д. Крім того, при виборі методу або комбінації з декількох методів необхідно віддавати перевагу таким, що є економічно вигідними й екологічно безпечними.

1.2. Сучасні методи нанесення функціональних покриттів

В літературі представлена широка класифікація покриттів за низкою ознак: товщина, міцність зв'язку з основою, матеріал, функціональні ознаки, спосіб нанесення і т.д. [28, 29]. Слід зазначити, що, незважаючи на різноманіття покриттів і технологій їх формування, основним завданням методів, що застосовуються, є підвищення якісних параметрів поверхневого шару, який в процесі експлуатації піддається різним видам зношування, корозійному руйнуванню, окисненню при підвищених температурах і т.д. Як відомо [12], під якістю поверхні розуміють стан поверхневого шару деталі. До параметрів, що характеризують якість поверхневого шару відносять: геометричні розміри, фізико-механічні властивості, структуру. На рис. 1.8 подана схема основних параметрів якості поверхневого шару. Зовнішній шар металу, що має відхилення від встановлених (нормованих) геометричної форми і розмірів, а також фізико-механічних властивостей і структури, в значній мірі визначає експлуатаційні властивості і ресурс деталі.

На практиці знайшли широке застосування наступні методи управління якістю поверхневого шару деталі: поверхневе пластичне деформування (обробка дробом, обкатка кулькою, обкатка роликом, алмазне вигладжування та ін.) [30-32], хіміко-термічне оброблення (цементация, азотування, нітроцементация і ін.) [33-35], поверхневе термічне оброблення (гартування СВЧ, контактне, газополум'яне, в електроліті й ін.) [36-38], наплавка [39], напилення (PVD, CVD, магнетронне розпилення та ін.) [40-42], оброблення концентрованими потоками енергії (лазерна, електронним і іонним пучками, електроіскрове легування та ін.). Основні технологічні можливості методів

поверхневого оброблення деталей машин, їх переваги та недоліки представлені в табл. 1.1.



Рисунок 1.8 – Схема основних параметрів якості поверхневого шару

Основним завданням методів, що застосовуються для модифікації поверхні, є отримання якісних параметрів поверхневого шару: підвищення (або зниження) твердості і мікротвердості, зниження (або підвищення) шорсткості, підвищення зносостійкості, в деяких випадках відновлення зношених ділянок поверхонь, зміна величини і знака залишкових напружень, збільшення втомної міцності і т.д. [14].

Методами поверхневої пластичної деформації (ППД) вдається досягти підвищення багатьох параметрів якості поверхневого шару: знизити шорсткість, збільшити глибину зміцнення, мікротвердість, міцність від втоми, зносостійкість, контактну витривалість та ін. У порівнянні з іншими методами, ППД деталей має наступні переваги: мала трудомісткість; простота технології, яка не потребує значних витрат на обладнання і оснащення; можливість зміцнення деталей будь-якої форми і розмірів; відсутність негативних термічних ефектів і шаржування; забезпечення мінімальної шорсткості поверхні зі сприятливою формою мікронервностей і великою часткою опорної площі; утворення стискаючих залишкових напружень; повільне і стабільне підвищення мікротвердості поверхневого

Таблиця 1.1 – Класифікація та технологічні можливості методів підвищення якості поверхневого шару деталей

МАШИН

Методи		Технологические возможности							Переваги «+» і недоліки «-» методів
		Матеріал заготовки	Точність обробки	Шорсткість, Ra, мкм	Твердість обробленої поверхні	Залишкові напруги	Товщина нанесеного шару, мм		
							min	max	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Пластичне деформування	Обкатка кулькою	Чавун, сталь, сплави з кольорових металів	Зберігається від попереднього оброблення	0,32-0,04	Збільшується на 20-50%	Стиснення	0,3	5,0	«+» відсутні термічні ефекти і шаржування, забезпечується мінімальна шорсткість поверхні зі сприятливою формою мікронерівностей і великою часткою опорної площі, утворюються стискаючі залишкові напруження, плавно і стабільно підвищується мікротвердість поверхневого шару [45] «-» нагрів інструменту і оброблюваної деталі (може викликати термопластичну деформацію, незворотні структурні зміни і інші явища, здатні нівелювати ефект ППД)
	Обробка дробом			40-0,63	Збільшується на 20-40%	Стиснення	0,4	1,0	
	Алмазне вигладжування			0,63-0,04	Збільшується на 30-60%	Стиснення	0,01	0,2	
	Ультразвукове оброблення			Збільшується у порівнянні з вихідним значенням	Збільшується на 50-90%	Стиснення	0,1	0,9	
Хіміко-термічне оброблення	Цементация	маловуглецева сталь	Жолоблення (поводка) 0,05-0,15 мм	Знижується у порівнянні з вихідним значенням	HRC 60-70	Стиснення	0,5	2,0	«+» більша відмінність властивостей поверхні і серцевини у зв'язку зі зміною хімічного складу поверхневих шарів; можна піддавати різні за формою і розмірами деталі з одержанням збагаченого шару однакової товщини «-» низька продуктивність, громіздке обладнання, обмеження розмірів виробів «+» надає поверхневому шару виробів особливі фізико-хімічні властивості, що дозволяють підвищити ресурс виробів, які працюють в наступних умовах: корозії під напруженням в середовищах азотної і октової кислот, перекису водню; розчині кухонної солі, морської води, палив, що містять сірку і оксиди ванадію; зносу при різних видах тертя; ерозії; знакозмінних навантажень; повзучості при підвищених температурах; термічних ударів; дозволяє поліпшувати магнітні властивості електротехнічних сталей. «-» низька продуктивність, громіздке обладнання, обмеження розмірів виробів, обмеження шару за товщиною
	Азотування	Сталь, чавун	Жолоблення (поводка) 0,05-0,10 мм		HV 750-1200		0,05	0,6	
	Ціанування	Сталь			HRC 60-75		0,01	2,5	
	Хромування	Сталь, чугун	Жолоблення (поводка) 0,05-0,10 мм		HV 1800		0,01	0,20	

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Поверхнє термічне оброблення	Гартування з нагріванням газовим полум'ям	Сталь	Жолоблення 0,03-0,1 мм	Знижується у порівнянні з вихідним значенням	HRC 40-70	Стиснення	0,5	10	«+» універсальний, можливість обробляти великогабаритні деталі «-» перегрів поверхні, труднощі вимірювання та регулювання температури в процесі нагрівання і неможливість точно забезпечити задану товщину загартованого шару, вигорання вуглецю, легуючих елементів
	Гартування з нагріванням СВЧ	Сталь	Жолоблення 0,03-0,07 мм	Не змінюється	HRC 40-70		0,2	10	«+» висока продуктивність, можливість контролю режиму гартування, зниження собівартості, зменшення деформацій, отримання чистої поверхні, без окалини майже повна відсутність знеуглецювання поверхневого шару простота механізації і автоматизації процесу і вбудовування його в потік «-» висока вартість установок
Наплавлення	Ручна газова наплавка	Сталь, чавун і сплави з кольорових металів	Значна деформація	15-30	HB ≥ 200-400	Розтягування	0,5	20	«+» велика товщина покриття, висока продуктивність, відносна простота конструкції і транспортабельність обладнання, відсутність обмежень за розмірами оброблюваних поверхонь виробів, простота виконання процесу «-» деформація виробів, нерівномірність властивостей наплавлених виробів, обмежений вибір поєднань основного і наплавленого металів, труднощі наплавлення дрібних деталей складної форми [46]
	Механізована наплавлення під шаром флюсу		Незначна деформація		HB ≥ 250-450		1,5	40	
	Вібродугове наплавлення		Незначна деформація		HB ≥ 500-650		0,3	3,0	
напилення (PVD, CVD, магнетронне розпилення)	Газова металізація	Метали і неметалеві матеріали	Деформації немає	Знижується у порівнянні з вихідним значенням	HB ≥ 120-420	На зовнішніх циліндричних поверхнях - напруження стиску; на внутрішніх - розтягування	0,3	15	«+» можна наносити різні покриття на вироби з найрізноманітніших матеріалів, покриття рівномірні за товщиною, зручний і високоекономічний метод у випадках, коли необхідно нанести покриття на частину великого виробу, є найбільш ефективним способом у випадках, коли необхідно збільшити розміри деталі на товщину не більше 0,5-1 мм, порівняно просте і легке обладнання, можна напилювати різні матеріали у кілька шарів, малі деформації, можна використовувати для виготовлення деталей різної форми, висока продуктивність, відносно невелика трудомісткість «-» великі втрат напилюваного матеріалу, необхідність підготовки поверхні, низька екологічність процесу [47]
	Електрометалізація						1,3	15,0	
	Плазмова металізація	Сталь, чавун і сплави кольорових металів	Незначна деформація		HB ≥ 500-2000		0,3	20-30	

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Оброблення концентрованими потоками енергії	Лазерна	Сталь, чавун	Деформації немає, точність зберігається від попереднього оброблення	10-0,63	HV 900-1300	Розтягування	0,05	2,0	«+» високі значення швидкості нагріву і охолодження - понад 10^4 - 10^5 °C / c, що сприяє отриманню унікальних структур і властивостей обробленої поверхні; висока продуктивність; відсутність додаткових охолоджуючих середовищ, токсичних відходів, шкідливих викидів; висока культура виробництва; можливість особистого управління глибиною і твердістю зміцненого шару за допомогою зміни режимів обробки; можливість часткової і повної автоматизації технологічних процесів; можливість отримання на поверхні металу шару із заданими властивостями шляхом введення легуючих елементів «-» висока енергоємність процесів (лазерна, електронно-променева), порівняно мала товщина зміцненого шару, низька продуктивність (лазерна, електронно-променева), складність інтеграції в технологічний процес (електронно-променеве гартування), небезпечність (лазерне гартування), низька екологічність (плазмове гартування)
	Електронними та іонними пучками	Сталь, чавун і сплави кольорових металів		Збільшується у порівнянні з вихідним значенням	HV 1100-1500		0,01	2,5	
	Електроіскрове легування			10-0,32	HV 900-1200	0,01	1,2		

шару та ін. Крім того, ППД можна створювати на поверхнях, які зміцнюються, спеціальні мікрорельєфи [43, 44].

Однак, методами ППД неможливо підвищити корозійну стійкість, жаростійкість, оскільки не змінюється хімічний склад сплаву, що обробляється. Крім того, напруження, що виникають при ППД, можуть ініціювати або прискорювати руйнування під впливом агресивних середовищ і / або підвищених температур. Перспективним є застосування комбінованої поверхневого оброблення, наприклад, комбінації ХТО і ППД [9-11, 48, 49]. При цьому, ППД в технологічному циклі оброблення може передувати або проводитися в якості остаточної операції.

Щоб надати поверхневому шару деталі підвищеної твердості зі збереженням в'язкої серцевини, що забезпечує захисні властивості поверхні з механічною міцністю основи, застосовують поверхне термічне оброблення (ТО). У табл. 1.1 наведені основні методи і технологічні можливості ТО, переваги і недоліки. Найбільше застосування має гартування СВЧ, що обумовлено універсальністю даного способу. Термічні методи призводять до створення нових структурних складових, зміни розмірів зерен і забезпечують отримання мікротвердості близько 7500 МПа і глибини зміцненого шару до 5мм, а для великогабаритних виробів до 30 мм. Однак, реалізація способів ТО потребує значних енерговитрат, а також, для проведення гартування СВЧ необхідна наявність мідних індукторів певної величини і конструкції. Слід зазначити, що виготовлення індуктора для деталей складної форми і розробка технологічного процесу часто є нерентабельним.

Найбільшого розвитку серед усіх існуючих методів підвищення якості поверхневого шару деталей машин набули технології хіміко-термічного оброблення, що обумовлено відносною легкістю регулювання якості поверхневого шару і створення значного градієнту його властивостей у напрямку від поверхні до серцевини, а також можливістю отримувати шари

як малої, так і великої товщини. У табл. 1.1 наведено основні технологічні можливості методів ХТО.

Процеси ХТО, такі як цементация, азотування, нітроцементация є дуже поширеними і використовуються практично на всіх машинобудівних підприємствах. Водночас, наступні процеси – борування, хромування, сульфидування, алітування, бороалітування, сульфоцементация та інші використовуються значно рідше. Це пов'язано в першу чергу з тим, що розроблені для проведення зазначених процесів, карбюратори в більшості випадків потребують застосування складного і дорогого нестандартного обладнання. Слід зазначити, що використання цементации методом ХТО доречно тільки у випадку сталевих деталей, що містять менше 0,3% вуглецю. Крім того, основним недоліком всіх видів ХТО є значна тривалість процесу, а, отже, і висока собівартість. Тому, в літературі нараховується велика кількість робіт, спрямованих на розробку заходів, спрямованих на підвищення ефективності ХТО. Це термоциклювання [50-52], застосування магнітного поля [53-54], ультразвуку [55-57], попередня ППД [58-60], застосування різних активаторів [61] і ін. Проте, слід зауважити, що застосування різних методів активації процесу ХТО в значній мірі збільшує вартість оброблення, а, отже, і собівартість продукції, оскільки вимагає застосування не тільки додаткового дорогого обладнання, а й матеріалів.

Одним з перспективних способів отримання функціональних покриттів є наплавлення. Перевагами наплавлення є: можливість створення покриття великої товщини, що важливо для виробів, які використовуються в умовах інтенсивного абразивного зносу, висока продуктивність, можливість застосування для відновлення зношених поверхонь, відносна простота конструкції і транспортабельність обладнання, відсутність обмежень за розмірами поверхонь, що наплавляються на вироби, простота виконання процесу, можливість нанесення шару на підкладку будь-якого складу й ін. [62-64]. Проте, технологія наплавлення не позбавлена недоліків, таких як деформація виробів, внаслідок нагрівання до високих температур і

прискореного охолодження, нерівномірність структури і властивостей наплавлених покриттів, обмежений вибір поєднань основного і наплавленого металів, обумовлений погіршенням якості наплавленого шару, труднощі наплавлення дрібних деталей складної форми й ін. (табл. 1.1).

Перспективним напрямком структурної модифікації поверхневих шарів деталей машин є оброблення високоенергетичними концентрованими потоками енергії і речовини (КПЕ): лазерні технології, електронно-променева обробка, іонно-променева обробка, іонна імплантація, вакуумно-плазмова, імпульсно-плазмова обробка, електроіскрове легування й ін. Про унікальний вплив зазначеного впливу на формування структури, мікроструктури, властивостей поверхні, а також на процеси тертя і зношування металів вказується в роботах Уманського О. П. [65-67], Тарельника В. Б. [68-72], Верхотурова А. Д. [73-77], Дурягиной З. А. [78-80], Подчерняевой І. О. [81-83], Скобло Т. С. [49, 84-89], Антошевского Б. [90-92] та ін.

Оброблення сплавів КПЕ порівняно з іншими методами об'ємного і поверхневого зміцнення має наступні переваги [93, 94]:

- висока щільність потужності дозволяє отримати надзвичайно високі значення швидкості нагріву та охолодження – більше 10^4 - 10^5 °C / с, що сприяє отриманню унікальних структур та властивостей обробленої поверхні;
- висока продуктивність: тривалість зміцнення КПЕ на 1-2 порядки менше у порівнянні з об'ємною ТО і, особливо, ХТО;
- відсутність додаткових охолоджуючих середовищ, токсичних відходів, шкідливих викидів; висока культура виробництва; можливість особистого управління глибиною і твердістю зміцненого шару за допомогою зміни режимів оброблення; можливість часткової і повної автоматизації технологічних процесів; можливість отримання на поверхні металу шару із заданими властивостями шляхом введення легуючих елементів.

Вакуумно-плазмові технології є одним із сучасних методів нанесення захисних покриттів, що активно розвивається [40]. Для нанесення покриттів

вакуумно-плазмовим способом, як правило, використовуються дві групи методів: CVD – хімічне осадження покриття з пари і PVD – фізичне осадження з пари. Ці методи дозволяють наносити покриття з чистих металів, сплавів, та/або сполук (наприклад, Ti, Ni, Si, C та ін.). Перевагами методів CVD є: можливість отримати однорідні за товщиною покриття, що мають низьку пористість та високу адгезію з основою; можливість обробляти вироби складної форми; можливість нанесення багат шарових покриттів; порівняно нескладне управління складом покриття; можливість створення покриттів необхідної товщини (до 15 мкм) та ін. Основний недолік CVD методів – процес проходить при високих температурах (близько 800-1000°C), що спричинює деформацію деталей, що обробляються, та появу на них тріщин, а також виникнення залишкових напружень [95, 96]. Технології CVD мають на увазі використання дорогих високочистих хімічних реагентів, що призводить до збільшення вартості процесу.

Методи PVD ґрунтуються на переведенні матеріалу мішені в парову та/або плазмову фазу з наступним осадженням його на підкладку. Найчастіше застосовується розпилення по діодній та тріодній схемам, магнетронне розпилення та електродугове випаровування [97-100]. Переваги PVD методів полягають у високій швидкості осадження покриття (близько 1 мкм/хв) і отриманні щільних і твердих шарів. Оптимальна товщина покриттів близько 7 мкм, твердість – 1500–4000 HV. Основною перевагою PVD методу, у порівнянні з CVD, є можливість проведення процесу при температурах 180–550°C, що дозволяє проводити процес після остаточної ТО, мінімізувати деформації і зміни форми виробу. Недоліки PVD методу – неможливість нанесення покриття на вироби складної форми, обмеження розмірів деталі, невелика товщина покриття, складність отримання покриття з низькою пористістю, висока вартість процесу.

Іноді для інструменту, оснащеного твердим сплавом, використовується метод КІБ – метод конденсації покриттів з плазмової фази у вакуумі з іонним бомбардуванням поверхонь інструменту (один з різновидів PVD).

Температура підкладки відносно низька (450 °С), що дозволяє застосовувати його для нанесення зносостійких покриттів на інструмент, оснащений твердим сплавом, і на інструмент з швидкорізальної сталі.

Вакуумно-плазмовий метод дозволяє отримувати широку гаму моношарових, багатшарових і композиційних покриттів, що попереджають утворення геометричних, кристалохімічних і фізико-механічних дефектів на поверхневих шарах інструментального матеріалу.

Лазерні технології, що займають особливе місце серед високоенергетичних методів обробки металевих поверхонь, забезпечують значне зміцнення та підвищення зносостійкості деталей.

Сучасні відомості про технологію лазерного оброблення (ЛО) викладені в довідниках, монографіях, періодичній літературі [101-104]. Перспективними видами лазерного поверхневого оброблення є термічне оброблення [105], легування [106-109], текстурування [110-111] та ін.

Перспективність застосування в різних галузях промисловості результатів лазерної поверхневої обробки (гартування, легування, текстурування, наплавлення і т.д.) відзначається багатьма авторами. Однак незважаючи на безсумнівний науковий і практичний інтерес лазерні технології поверхневої обробки в даний час не отримали належного розвитку і впровадження. Причиною цього є висока вартість лазерного устаткування, висока вартість процесу, можливість утворення тріщин у поверхневому шарі внаслідок релаксації високих внутрішніх напружень розтягу. Крім того, недостатня вивченість загальних закономірностей зміни властивостей оброблюваних сплавів в залежності від фазового і структурного стану в умовах надвисоких швидкостей нагріву і охолодження, стримує розробку конкретних робочих технологій та рекомендацій прикладного характеру.

Для зміцнення, відновлення та нанесення захисних покриттів найбільш перспективним є метод електроіскрового легування (ЕІЛ), заснований на процесі перенесення легуючого матеріалу анода на оброблювану поверхню при іскровому розряді в газовому середовищі (повітря, азот, інертний газ і

ін.). ЕІЛ дозволяє отримувати на поверхні металевих деталей покриття з різних струмопровідних матеріалів простим способом, як в технологічному відношенні, так і в апаратному оформленні, що є значною його перевагою. Іншими істотними перевагами електроіскрового легування є: висока адгезія покриття з основою, можливість локальної обробки поверхні, відсутність необхідності в попередній підготовці поверхні, незначний нагрів поверхні деталі, екологічність процесу та ін.

Питання отримання якісних функціональних покриттів методом ЕІЛ, який позбавлений недоліків технологій ХТО, є виключно важливим, оскільки дозволяє відкрити нові можливості для застосування ЕІЛ для робочих поверхонь деталей і розширити сферу їх застосування в машинобудуванні, приладобудуванні та інших галузях народного господарства.

1.3. Обґрунтування вибору методу електроіскрового легування для підвищення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей ДО

1.3.1. Особливості формування поверхневого шару при ЕІЛ

Метод ЕІЛ є одним з найбільш простих і доступних з технологічної точки зору. Серед його переваг, таких, як локальність, мала витрата енергії, відсутність об'ємного нагріву матеріалу, висока міцність зчеплення покриття з основним металом, необхідно виділити простоту автоматизації процесу, «вбудовуваність» в технологічний процес виготовлення деталей і суміщення операцій, гнучкість процесу за рахунок технологічної уніфікації [12, 13, 112].

ЕІЛ є універсальним методом підвищення якості робочих поверхонь деталей машин і інструменту, який дозволяє збільшити твердість, стійкість до корозії, зносо- та жаростійкість, покращити припрацьовуваність поверхонь, відновлювати розміри деталей, створювати мікрорельєф поверхні певної шорсткості, нанесення радіоактивних ізотопів, застосування в декоративному мистецтві і ін. [113-114].

Технологічна сутність методу полягає в перенесенні легуючого матеріалу анода на оброблювану поверхню при іскровому розряді в повітряному середовищі.

Найбільш важливою особливістю методу ЕІЛ є формування змінених поверхневих шарів і покриттів на деталях з різноманітними фізичними і хімічними властивостями [115, 116].

Шляхом варіювання режимів електроіскрового оброблення, складу матеріалів електродів і міжелектродного середовища, дослідники отримують покриття із заданими експлуатаційними характеристиками.

Дослідження закономірностей формування структури і властивостей електроіскрових покриттів показали, що, незважаючи на простоту технології, ЕІЛ є процесом складним і багатопараметричним [117, 118]. Авторами [113, 118, 119] встановлено, що властивості поверхневого шару, який формується при ЕІЛ, перш за все, залежать від структури (макро- і мікроструктури, атомної, електронної, кристалічної), фазового та хімічного складу анодних матеріалів. У разі одноразового впливу іскрового розряду на поверхню електродів процес формування поверхневого шару буде визначатися співвідношенням теплофізичних характеристик матеріалу анода і катода.

В процесі ЕІЛ на поверхні анода і катода утворюється шар зміненої структури, який при впливі на нього реактивів, що використовуються для виявлення мікроструктури матеріалів електродів, залишається «білим», тобто структура його не виявляється. Подібні шари спостерігалися на поверхнях матеріалів, що піддавалися механічному обробленню (шліфуванню, точінню, фрезеруванню, електромеханічному обробленню), технологічним процесам поверхневого зміцнення (наприклад, обробленню дробом), на поверхнях, що підлягали впливу на них концентрованими потоками енергії (лазерне, плазмове, вибуховий вплив, електроіскрове оброблення т. п.) [119, 120]. Загальним для всіх зазначених випадків є те, що утворення «білих» шарів відбувається в умовах локальної дії високих температур і тисків. За інтенсивністю впливу на поверхневий шар ЕІЛ значно відрізняється від

перерахованих вище процесів (тиск ударної хвилі 0,1 Па, температура 5-40 · 10³ °С). Висока швидкість тепловідведення призводить до того, що в межах товщини шару близько декількох мікрометрів температура швидко падає до температур плавлення і відповідних фазових перетворень. У зв'язку з цим кристалізація, фазові перетворення, дифузія і хімічна взаємодія, що супроводжують процес ЕІЛ, призводять до утворення вкрай нерівноважних структур з дуже дрібним зерном, високою гетерогенністю за складом, структурою та властивостями. Твердість такого шару, як правило, значно перевищує твердість матеріалів електродів. У ньому діють напруження, що переважають внутрішні напруження в електродних матеріалах анода і катода [12, 113].

Дослідження структурно-фазових перетворень у поверхневих шарах різних металів є актуальним, незважаючи на значну кількість робіт, присвячених механізмам структуроутворення для різних електродних матеріалів [12, 86, 110, 113, 119, 121-132]. В роботах за цим напрямком виділено наступні процеси, що відбуваються при електроіскровому легуванні:

- перенесення матеріалу на поверхню деталі з легуючого електрода з утворенням механічних сумішей, твердих розчинів, хімічних сполук;
- збагачення елементами легуючого електрода (ЛЕ), при цьому має місце аномально висока дифузія перенесеного матеріалу під дією висококонцентрованих потоків енергії;
- надшвидкісне гартування, при короткочасному нагріванні розрядом електричного струму до високої температури, а потім миттєве охолодження;
- пластичне деформування при локальній дії на матеріал імпульсного тиску;
- утворення вкрай нерівноважних структур з дрібним зерном, високою гетерогенністю за складом, структурою, що відбувається при локальній дії на матеріал імпульсних тисків і температур, термічних напружень;

– азотування, цементация, оксидування, що відбуваються при взаємодії з навколишнім середовищем.

Таким чином, формування поверхонь при ЕІЛ є комплексним результатом прояву великої кількості структурних механізмів.

Металографічні дослідження електроіскрових покриттів показали, що вони, як правило, складаються з декількох зон. Кількість цих зон визначається параметрами ЕІЛ, матеріалами катода і анода. Загальний шар ЕІЛ має дві зони: верхню – білу, що не піддається дії травників, і нижню – перехідний шар із змінною концентрацією дифузійного характеру [119, 133, 134]. В науковій літературі білі шари багатьма вченими характеризуються як мартенситно-аустенітні, з дрібно-голчатою структурою, що мають високу щільність дефектів кристалічної будови. Утворення дрібно-голчатих структур в білому шарі спричинено, як правило, субструктурною взаємодією дефектів кристалічної будови.

У більшості випадків дифузний шар за глибиною перевищує верхній білий, а глибина проникнення елементів анода в катод може становити від декількох до ста мікрометрів. Крім цього, часто спостерігають третю зону, так звану зону термічного впливу (ЗТВ) [135]. Для загартованих деталей підшар може виявитися зоною відпускання (зоною зниженої твердості). Глибина цієї зони залежить від енергії розряду. Для перших двох зон характерна висока мікротвердість, у 3-3,5 рази вище, ніж у основи. Підвищення мікротвердості пов'язують з протіканням високотемпературного наклепу при впливі значних тисків в умовах великих швидкостей нагріву і охолодження. У роботі [136] зазначено, що в процесі зміцнення металу основна роль належить термічному впливу.

У літературі представлена широка класифікація електродних матеріалів, що застосовуються для ЕІЛ [137-139]. В даний час на практиці в якості легуючого електрода використовують переважно тверді сплави на основі карбідів вольфраму і титану, проте вони не завжди відповідають вимогам, що ставляться до поверхонь та електродних матеріалів (ЕМ) для

ЕІЛ, оскільки мають високу вартість та є ерозійно стійкими. Крім того, покриття з твердих сплавів підвищують твердість і зносостійкість, проте вони не забезпечують стійкість до корозії, жаростійкість, особливі триботехнічні властивості та ін.

Окремо необхідно зазначити екологічні та економічні питання отримання електродів – існуючі методи, що використовуються на металургійних і хімічних підприємствах, у більшості випадків є екологічно небезпечними.

Така невиправдано обмежена кількість наведених в літературі матеріалів також не дозволяє в повній мірі розкрити можливості даного прогресивного методу.

У цьому аспекті заслуговують на увагу технології отримання покриттів методом ЕІЛ, такі як цементація, сульфідкування, борування, металізація та їх комбінації. Як ЕМ застосовують відносно дешеві матеріали, технології їх отримання є екологічно безпечними, енерго- і ресурсозберігаючими [140].

Відомі способи насичення неметаллами і металами методами ХТО, проте, як відомо, для здійснення процесу дифузії необхідні тривалі витримки, високі температури, нагрівання всієї деталі, можливі викривлення і деформації, низька продуктивність процесу і т.д.

Перспективним напрямком є отримання функціональних покриттів дешевим, екологічно безпечним, простим способом – методом ЕІЛ.

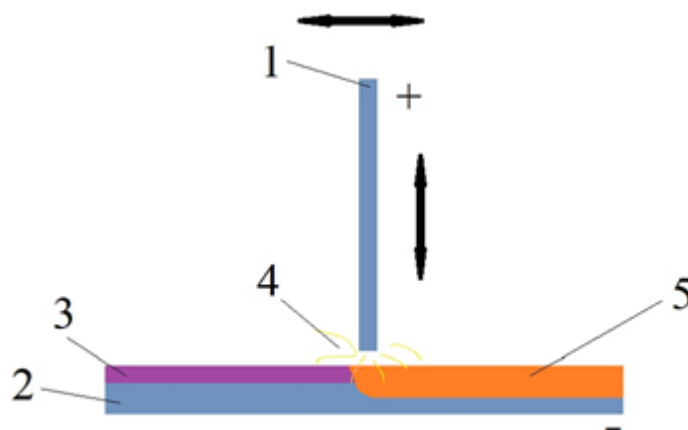
Проте в літературі є лише незначна кількість робіт щодо розробки матеріалів, які застосовуються для отримання покриттів при ЕІЛ, щодо вивчення технологічних особливостей їх отримання, фазо- і структуроутворення, властивостей і т.д. В деяких публікаціях наявні результати дослідження цементації методом ЕІЛ [141-143], металізації [144, 145] сталевих поверхонь. Роботи, в яких представлені результати вивчення таких процесів як борування, сульфідкування, алітування, молібдування та їх комбінацій, досить обмежені. Тому зазначений напрямок дослідження є актуальним і своєчасним.

Як відомо, ХТО супроводжується трьома фізико-хімічними процесами: дисоціація молекул насичувального середовища, адсорбція активних атомів і дифузія атомів насичувального елемента вглиб металу (виробу). При цьому утворюється дифузійний шар.

Якщо розглядати процес легування при проходженні електроіскрового розряду, то можна відзначити, що ці процеси притаманні і методу ЕІЛ. Основоположниця методу ЕІЛ Н.І. Лазаренко [146] описує процес утворення покриття на оброблюваній поверхні при іскровому електричному розряді в такий спосіб. Матеріал у пароподібному і рідкокапельному станах, викинутий з анода (легуючого електрода) у вигляді пучка, що поступово розширюється, потрапляє в міжелектродний простір, розігрій електричним імпульсом до температури, при якій можливе існування речовини в іонізованому стані. Частинки вдаряються об поверхню катода (деталі), локально розігріту електричним імпульсом, вступають з нею у взаємодію, утворюючи сплави, тверді розчини або просто механічну суміш. Склад шару, що утворився на катоді, і його фізико-хімічні властивості часто істотно відрізняються від властивостей легуючого і легованих матеріалів. Коли анодом є графіт, також відбуваються значні зміни фізико-хімічних властивостей поверхні, що обробляється. Незважаючи на короткочасність дії одиничних імпульсів і загальну невисоку температуру оброблюваного матеріалу, в поверхневих шарах катода розвиваються дифузійні процеси і утворюється дифузійний шар, який виникає в результаті надшвидкісного нагріву і охолодження діючих матеріалів (до декількох тисяч градусів за секунду), високого тиску, що розвивається каналом розряду в точці його виникнення, і багаторазових уніполярних і імпульсних дій електричного поля дуже високої напруженості.

Незважаючи на значну схожість методу ЕІЛ з ХТО, слід зазначити його унікальність. Мікрометалургійні процеси при ЕІЛ протікають за частки секунди, без розігрівання всієї маси катода або, тим більше, відпалу її поверхні.

На нашу думку, при ЕІЛ в поверхню деталі можна вводити не тільки елементи струмопровідного матеріалу анода, що складається, наприклад, з металу або графіту, а й діелектрики, наприклад, сірку, бор і ін. шляхом введення їх в рідку мікрованну, що утворюється при локальних електроіскрових розрядах (рис. 1.9).



1 і 2 – електроди, анод і катод (оброблювана деталь), відповідно; 3 – СТС;
4 – іскровий розряд; 5 – змінений поверхневий шар

Рисунок 1.9 – Схема електроіскрового легування

Для цього необхідно створити між анодом і катодом спеціальне технологічне середовище (СТС), до складу якого входять необхідні елементи. СТС може бути суспензією (в якій тверда речовина рівномірно розподілена у вигляді найдрібніших частинок в рідкому стані, у вигляді мазі, гелю і т.д.), до складу якого входить необхідна речовина, наприклад, сірка. Якщо такої речовини немає, то її необхідно ввести в СТС. Наприклад, якщо в СТС ввести порошок сечовини і / або меламіну, до складу яких входить значна кількість азоту і суспензією, що утворилася, покрити сталеву поверхню, то при ЕІЛ електродом з такого ж сталевого матеріалу можна отримати азотовану поверхню. При використанні, в даному випадку, електрода-інструменту з графіту можна очікувати протікання процесу карбонітрації.

Таким чином, якщо використовувати при ЕІЛ різні матеріали, як електрода-інструменту (анода), так і СТС, можна значно розширити області

застосування традиційних методів ХТО (цементациї, азотування, сульфидування та ін.) для більш широкої номенклатури деталей машин, таких як відповідальні деталі ДО, що вимагають дуже високої якості, як в поверхневому шарі, так і в серцевині.

Поверхневі шари, сформовані новим методом із використанням СТС і наступним ЕІЛ, являють собою значний науковий і практичний інтерес і вимагають всебічного вивчення. Такі покриття мають всі переваги традиційного ЕІЛ і за рахунок додаткового дозованого цілеспрямованого легування можуть слугувати важелями управління якістю поверхневих шарів деталей ДО.

1.3.2. Створення однокомпонентних шарів на металевих поверхнях методом ЕІЛ

Одним з ефективних методів поверхневого зміцнення є цементация – процес насичення металевих поверхонь вуглецем. Найбільш вивченою і широко застосовуваною в промисловості є цементация методом ХТО. Мета цементациї – насичення поверхні вуглецем, з метою надання їй після відповідного термічного оброблення високої твердості та зносостійкості. В літературі налічується досить велика кількість робіт, присвячених різним способам цементациї, що ґрунтуються на застосуванні методу ХТО. З метою збільшення продуктивності оброблення, розроблені способи цементациї з використанням спеціальних паст і обмазок [147, 148]. Однак ці способи мають деякі недоліки хіміко-термічної обробки і можуть застосовуватися лише для сталей з вмістом вуглецю до 0,3%.

Ефективним способом насичення поверхні металевих поверхонь вуглецем є цементация із застосуванням КПЕ, що генеруються електроіскровим розрядом. При цьому технологія цементациї, що здійснюється методом ЕІЛ може застосовуватися до сталей з різним вмістом вуглецю. Накопичений досвід з розробки технології ЦЕЕЛ (цементация електроерозійним легуванням) [142, 149, 150].

При цементації сталевих деталей електроіскровим легуванням товщина зміцненого шару залежить від енергії розряду і часу легування (продуктивності процесу). Зі збільшенням енергії розряду і часу легування товщина зміцненого шару зростає, але при цьому збільшується і шорсткість поверхні. Так при ЕІЛ вуглецем середньовуглецевої легованої сталі 40Х ($R_a=0,5$ мкм) з продуктивністю 5 хв/см² при енергії розряду $6,8$ Дж товщина шару підвищеної твердості становить понад $1,15$ мм. Шорсткість поверхні при цьому відповідає $R_a = 11,7-14,0$ мкм [143, 151, 152].

Висока швидкість охолодження призводить до формування фазового складу по метастабільній діаграмі з утворенням карбідів та інших метастабільних фаз. Графіт у вільному стані в цьому випадку не виділяється. Дослідження механізму формування фаз при електроіскровому навуглецьовуванні [153] показали, що процес утворення цементитної фази (Fe_3C) в поверхневому шарі сталевих зразків відбувається через етапи утворення рідкої фази, її насичення іонами вуглецю і азоту, з наступною швидкісною кристалізацією з утворенням аустеніту і нітриду заліза (Fe_4N).

Слід зазначити, що при традиційній цементації (нагрів відбувається до температури $900-950^{\circ}C$ і для отримання 1 мм шару – витримка 10 годин у карбюризаторі) з метою усунення жолоблень і деформацій необхідно зішліфувати значну частину поверхневого шару, причому найбільш тверду, що не завжди дозволяє досягти необхідного результату.

У електроіскрових технологіях графіт також використовують для зменшення шорсткості поверхонь, сформованих попереднім електроіскровим обробленням іншими електродними матеріалами (мідь, срібло, нікель, титан) [154].

На даний час накопичено дані про фазові та структурні перетворення у поверхневих шарах сталей і різних металів при електроіскровому легуванні графітом, також є відомості про вплив на структуру і властивості технологічних режимів і механічного оброблення цементованих поверхонь. Поряд з цим відсутні кількісні дані про вплив енергії розряду на глибину

цементації, властивості і шорсткість металевих поверхонь, вплив електроіскрової цементації на міцність сталевих зразків.

Таким чином, ЦЕІЛ може значно розширити області застосування цементації, що здійснюється традиційними методами ХТО. Особливо це актуально для деталей ДО, коли необхідно проводити обробку окремих поверхонь деталі в локальних місцях, не захищаючи при цьому близько розташовані поверхні. Процес ЦЕІЛ, досить часто, здійснюється без розбирання вузла машини, наприклад, без вивільнення вала ротора турбокомпресора або іншої відцентрової машини від закріплених на ньому деталей. В даному випадку зношені шийки під підшипники ковзання перешліфовують, а потім проводять ЦЕІЛ і оброблення методом ППД. Після цього ротор балансують і встановлюють на підшипники в корпус компресора.

Крім цього, товщину зміцненого шару, який формується на сталевій деталі при нанесенні на її поверхню методом ЕІЛ покриття з твердого зносостійкого металу, можна збільшити за рахунок проведення попередньої ЦЕІЛ [155, 156]. Товщину зміцненого шару можна збільшувати шляхом проведення попередньої ЦЕІЛ не тільки на сталевих деталях, а й на деталях з нікелевого сплаву [157-159]. Збільшення товщини шару підвищеної твердості за рахунок попередньої ЦЕІЛ, також значно розширює області застосування методу цементації, що здійснюється традиційною ХТО.

Відомо, що для підвищення зносостійкості і забезпечення спеціальних трибологічних властивостей, а також покращення припрацювання і протизадирних властивостей сталевих деталей, проводять сульфидування. Основним методом створення сульфідних покриттів є ХТО. В результаті сульфидування на поверхні сталеві деталі утворюються сполуки сірки – сульфіди. Так, дисульфіди молібдену MoS_2 , вольфраму WS_2 , сульфіди заліза FeS , цинку ZnS та інших металів є ефективними мастильними матеріалами і можуть вводитися до складу самозмащувальних добавок [160]. В результаті сульфидування сталі при температурах до 560°C утворюється шар сульфіду

заліза, який покращує припрацьовуваність поверхонь тертя і підвищує їх зносостійкість. Утворені в результаті сульфідуювання ферросульфідні сполуки надають цьому покриттю властивість самозмашування. Сульфідна плівка, що має меншу міцність, ніж основний метал, легко руйнується при терті та відділяється від основи без пластичного деформування, запобігаючи схоплюванню поверхонь тертя. Плівка сульфиду заліза (FeS) підвищує зносостійкість поверхонь тертя і покращує їх припрацьовуваність. Феросульфідне покриття має досить високу пористість і вбирає велику кількість мастила, надаючи матеріалу властивості самозмашування [161]. Крім того, покращується оброблюваність різанням і здатність до шліфування та полірування, що дозволяє підвищити чистоту остаточного механічного оброблювання. Як показано в роботі [162], сульфідуювання дозволяє підвищити зносостійкість сталевих контртіл фрикційних пар (до 6 разів, у порівнянні з загартованими деталями. Довговічність трибосполучень при цьому підвищується не менше ніж у 3 рази. Відомий факт того, що при товщині дифузійного сульфідного шару 0,3 мм після зношування деталі на 1,0 мм спостерігається незначна зміна товщини сульфідного шару. Це можна пояснити тим, що тепло, яке виникає в зоні контакту поверхонь, призводить до активізації дифузійних процесів і сульфідний шар переміщується вглиб деталі [163].

Традиційно спосіб сульфідуювання полягає в насиченні поверхневого шару металу (сталі, чавуну, сплавів титану і ін.) сіркою у відповідних соляних ваннах. Глибина сульфідованого шару досягає 50 мкм. Сульфідуювання може бути низько, середньо- і високотемпературним (при 150-450; 540-580; 850-950 °С, відповідно). Шорсткість поверхонь, які пройшли сульфідуювання, трохи вища за вихідну, при цьому спостерігається незначне збільшення розмірів деталей [45, 164]. Такий спосіб має недоліки, що притаманні технології ХТО.

Відомо спосіб, коли сірку вводять у поверхневий шар виробу методом ЕІЛ. Для введення сірки її наносять на поверхню у вигляді

порошкоподібного шару, виконують так зване «опудрювання» поверхні і через цей шар проводять легування матеріалами деталі або покриття. У процесі оброблення, нанесення порошкоподібної сірки повторюють 2-3 рази [146]. Проте, даний спосіб не завжди приводить до бажаного результату. Особливості формування властивостей і структури поверхневого шару визначаються сутністю ЕІЛ.

Сірка не є електропровідним матеріалом, і для здійснення процесу ЕІЛ (контакту легуючого електрода з легованою поверхнею) її необхідно відсунути легуючим електродом убік. При цьому попадання сірки в зону рідкої фази матеріалів електродів і утворення хімічних сполук у значній мірі ускладнено, а якщо і відбувається, то на окремих розрізнених ділянках. Суцільність на поверхні плівки сульфідів низька.

В роботі [165] запропонований спосіб ЕІЛ сірчистим залізом сталей 45, Х12Ф, сірого і перлітного ковкого чавуну, який дозволив сформувати на поверхні, що обробляється, збагачений сіркою шар товщиною 40-50 мкм. В результаті, значно зменшилася схильність сірого чавуну до утворення задирів при сухому терті, зменшилося зношування у 8-10 разів, а стійкість волоочильних матриць збільшилася в 3,5 рази. Незважаючи на позитивні результати, спосіб сульфидування із застосуванням як електродів ЕІЛ сірчистого заліза має низку недоліків:

- необхідність виготовляти електроди за складною технологією;
- обмежене застосування при ЕІЛ сталевих (залізних) електродів з нелегованих сталей;
- електроди з нелегованих сталей в процесі ЕІЛ нагріваються, окислюються і руйнуються, що негативно впливає на якість сформованого покриття (висока шорсткість, низька суцільність, прижоги, приварювання окремих дрібних частинок із зруйнованого анода);
- електроди не застосовуються в механізованих установках через вигоряння;

– зазначений спосіб виготовлення і спікання електродів є дорогим, трудомістким і екологічно шкідливим.

Отже, враховуючи, що запропонований вище спосіб формування покриття методом ЕІЛ із використанням СТС (рис. 1.9), необхідне всебічне вивчення процесу сульфидування сталюї поверхні із застосуванням СТС, що містить сірку, а в якості матеріалу анода використовувати сталь тієї ж марки.

Отже актуальним завданням є удосконалення способу сульфидування методом ЕІЛ, підвищення якості покриття, забезпечення його здешевлення, простоти виконання та екологічності.

Серед однокомпонентних покриттів найбільшого поширення отримала металізація методом ЕІЛ (Ti, V, Cr, Zr, Nb, Mo, W, Ta, а також Al, Mn, Co, Ni, Cu).

Авторами робіт [139, 144] досліджувалися фізико-хімічні властивості і жаростійкість покриттів, сформованих методом ЕІЛ, на сталі 45 тугоплавкими металами IV – VI груп і металами підгрупи заліза. Показано, що характер залежностей приросту катода і ерозії анода залежить від положення легуючого елемента в таблиці Д.І. Менделєєва: їх величини зменшуються в підгрупах зі збільшенням атомних мас металів. Цікаві результати отримані при дослідженні жаростійкості отриманих покриттів. Авторами показано, що чим вище жаростійкість легуючого металу, тим кращі показники формування на електроді зі сталі 45 легованого шару при ЕІЛ перехідними металами і металами групи заліза. Найбільш жаростійкими є хром, нікель, гафній, кобальт.

Відомо [166], що з метою надання залізовуглецевим сплавам підвищених окалиностійкості, опору атмосферній корозії і ряду інших властивостей застосовують алітування. Крім того, комплексні алітовані покриття [167] характеризуються високою температурою плавлення, низькою щільністю, високим модулем пружності, жароміцністю, стійкістю до окислення і займання. Крім цього, останнім часом намітилася тенденція

використовувати комплексні алітовані покриття для створення захисних та зносостійких покриттів.

Відомі способи алітування методами хіміко-термічного оброблення [33, 168-170]. За класичною технологією алітування полягає у насиченні поверхні сталльної деталі у розплаві алюмінію. Відомі також й інші способи алітування. Так, у роботі [171], спосіб алітування включає нанесення алюмінієвого шару на сталеву поверхню (зазвичай напиленням), обмазку та відпал. При цьому, особлива увага звертається на шорсткість поверхні, що алітують, причому, окисні плівки, масло і пил є неприпустимими. Незважаючи на позитивні результати, описана технологія, як і класична технологія алітування у розплавах, має ряд недоліків, притаманних ХТО.

У роботі [172] представлено результати дослідження стійкості до корозії алюмінієвих покриттів на сталі Ст3, отриманих у розплаві алюмінію. Показано, що зі збільшенням товщини покриття, отриманого методом ЕІЛ алюмінієвим електродом, опір до атмосферної корозії зростає. Автори також зазначають, що пористість електроіскрових алюмінієвих покриттів не є стримуючим фактором. У місцях пор за наявності електроліту (вологи) розвивається електрохімічна корозія. При цьому покриття служить анодом, а сталь – катодом. За умови пористого покриття, основний метал захищається електрохімічно – доки шар не розчиниться, катод захищається за допомогою анодного механізму. У разі безпористих електроіскрових алюмінієвих покриттів, окрім описаного механізму діє ще й екранувальний механізм захисту від корозійного руйнування. Цей захист збільшується зі зростанням оксидних шарів на алюмінієвих покриттях.

Як показано в роботах [173, 174] електроіскрові алюмінієві покриття надійно захищають сталь в фосфорнокислих і водно-сольових середовищах.

У публікації [175] запропоновано спосіб нанесення покриттів, що включає електроіскрове легування (ЕІЛ) алюмінієвим електродом металеві поверхні. Методами електронної мікроскопії, рентгеноструктурного і мікрорентгеноспектрального аналізів вивчено структуру і склад покриттів.

Досліджена технологія має деякі переваги порівняно з іншими уже відомими технологіями. Однак дана технологія ЕІЛ алюмінієвим електродом виконується в захисному середовищі (аргоні), що істотно збільшує витрати на здійснення процесу, і крім того, зазначена технологія застосовується тільки для деталей з титану.

Отже, актуальним є розробка нової технології алітування, що заснована на методі ЕІЛ, дослідження впливу енергетичних параметрів оброблення на структурно-фазовий стан поверхневого шару, а також властивості, що забезпечує алітований шар.

Перспективними способами є наступні процеси: хромування, борування, алітування, а також різні їх комбінації (карбоборування, борохромування, бороалітування і т.д.). Зазначені способи хіміко-термічного оброблення в значній мірі мають перевагу над традиційними (цементация, азотування, ціанування), але їх застосування часто обмежується різними чинниками (недостатня вивченість процесів, більш високі вимоги до обладнання, умов процесу, в деяких випадках більш високі витрати) [176, 177].

Наприклад, за допомогою борування є можливим підвищити зносостійкість в 3-50 разів у порівнянні з термообробленням, і в 1,5 - 15 разів у порівнянні з традиційними способами ХТО. Крім того, дифузійне борування значно (в 3-5 разів) підвищує жаростійкість сталей [33]. Боридні покриття мають найбільш високу зносостійкість при хорошій їх жаро- і корозійній стійкості порівняно з найбільш поширеними покриттями, що отримують азотуванням і цементациєю.

Процеси борування проводять у різних карбюраторах. Основний недолік будь-якого способу борування є крихкість поверхневого шару. Тому більшість досліджень направлено на пошуки шляхів отримання якісних боридних покриттів [178].

Для зниження крихкості та покращення якості покриття можна застосувати комплексні боридні покриття, а також мікролегування боридного

шару іншими елементами, такими як мідь, хром, алюміній, кремній, вольфрам, ванадій та інші. В свою чергу, кожен із елементів забезпечує певні властивості, тому поверхня може мати нижчу або вищу твердість, кращу стійкість до корозії та інші цінні властивості.

Відомі такі способи борування: борування в порошкових сумішах, рідинне електролізне і безелектролізне борування, борування з насичують обмазок і паст, борування в псевдокиплячому шарі (набагато менше попередніх) [179-184].

Таким чином, традиційними способами отримання борованого шару є методи ХТО. Альтернативними технологіями отримання борованих покриттів, які не мають недоліків, властивих ХТО, є способи борування із застосуванням концентрованих потоків енергії [185-189].

В роботі [187] досліджено спосіб борування з використанням обмазок і лазерного нагріву. Запропоновано спосіб, який передбачає нанесення на поверхню обмазки, що складається з порошку аморфного бору і клею з добавкою ацетону, а потім проведення оброблення лазером.

В [190] запропоновано спосіб електроерозійного борування, що включає нанесення на поверхню борованого покриття борвмісним електродом, виконаного у вигляді стрижня, який обдувають охолоджувачем. Як борвмісний електрод використовують феробор, а як охолоджувач – стиснене повітря або нейтральний газ.

Таким чином, вплив борування на механічні властивості сталей залежить від способу і методу борування, фазового складу, структури та товщини боридного шару, режиму борування і хімічного складу сталі. Незалежно від методу борування корозійна стійкість сталі підвищується в 1,5-2 рази. Висока твердість боридного шару зберігається до температур 600-700°C, що дозволяє застосовувати борування для підвищення стійкості вузлів тертя, що працюють при високій температурі. Незважаючи на високі експлуатаційні показники, борування в деяких випадках не знаходить такого широкого застосування, як воно того заслуговує. Однією з причин цього є

висока крихкість боридного шару, тривалість процесу (до 10 годин), складність і дорожнеча обладнання, що застосовується, необхідність високотемпературного нагріву, погана якість поверхні і неоднорідність шару, екологічна небезпечність і т.д. Усунення недоліків властивих традиційним способам борування, на наш погляд, є можливим в результаті застосування прогресивних способів модифікації поверхні, заснованих на новому методі ЕІЛ із застосуванням СТС, вивченні механізмів формування боридних покриттів, які дозволяють керувати процесом отримання боридних шарів методом ЕІЛ і створювати покриття із заданими складом, структурою і властивостями.

1.3.3. Створення багатокомпонентних покриттів методом ЕІЛ

Найчастіше однокомпонентні покриття одночасно не відповідають декільком вимогам, наприклад, таким як здатність до припрацювання, а також твердістю і зносостійкістю. Водночас необхідною умовою також є підвищена теплостійкість або жаростійкість. Тому актуальним є створення і вивчення структури і властивостей багат шарових або багатокомпонентних покриттів.

Одним з напрямків підвищення якості робочих поверхонь є отримання і нанесення багатокомпонентних і багат шарових покриттів методом ЕІЛ, що містять частинки високої твердості (карбіди, нітриди, бориди та ін.) або частинки антифрикційного матеріалу (графіту, міді, бронзи, срібла, сульфідів заліза, дисульфідів молібдену, нітриду бору і т.д.).

Багатокомпонентні покриття використовують для створення комплексу властивостей поверхні, наприклад, одночасне забезпечення опору зношуванню і антифрикційних властивостей. Покриття забезпечують підвищену адгезію до підкладки. В якості перехідного сполучного шару застосовують матеріал, який буде мати високу адгезію як до підкладки, так і до самого покриття. Іноді цей шар забезпечує необхідну металургійну

сумісність шарів, для того щоб уникнути утворення на межах з підкладкою інтерметалідів, які в свою чергу мають високу крихкість.

Так, в роботі [191] показано, що застосування перехідних шарів з міді, що наноситься методом ЕІЛ на сталеву підкладку, покращує тепловідведення із зони контакту і підвищує міцність з'єднання сталеві підкладки з антифрикційним бабітовим шаром у порівнянні з традиційною технологією на 35%.

Принцип багатокомпонентності і багат шаровості може бути застосований для покращення властивостей покриття – підвищення міцності, зниження пористості, релаксації внутрішніх напружень [192]. Тонкі покриття мають підвищені характеристики щільності і міцності. Нанесення товстих покриттів майже завжди супроводжується формуванням внутрішніх напружень, збільшенням пористості і шорсткості, а також може викликати викривлення деталі. Використання багат шарового нанесення дозволяє отримувати покриття необхідної товщини, позбавленого зазначених вище недоліків.

Багатокомпонентне легування поверхні може проводитися:

- з використанням матеріалів ЛЕ, що містять необхідні компоненти;
- ЛЕ, що створені із дротів різних матеріалів;
- послідовним ЕІЛ різними матеріалами.

Отримання багат шарових покриттів методами ЕІЛ можливо в тих випадках, коли матеріали ЛЕ, що використовуються для отримання окремих шарів, значно відрізняються за теплофізичними властивостями (за опором електричній ерозії). Наприклад, перший шар наноситься ЕІЛ твердим сплавом (ВК6-М, Т15К6), а потім проводиться ЕІЛ легкоплавким ЛЕ (бронзи, латуні, алюміній, олово і т.д.). При такій технології перемішування окремих шарів практично не відбувається і можна отримати покриття шаруватої структури.

Введенням в міжелектродний проміжок речовин, що містять лужний метал (NaOH, KBr, Na_2CO_3 й ін.), можна різко збільшити масоперенесення

з ЛЕ на оброблюваний вироб і забезпечити отримання багат шарових покриттів з більш тугоплавких матеріалів (мідь, срібло, нікель, титан, хром).

В останні роки проводяться роботи по створенню виробів, які б можна було використовувати без зовнішнього змащування. До цих виробів застосовують термін «самозмащувальні», оскільки при їх експлуатації не використовується зовнішнє мастило, а застосовуються в основному композиційні матеріали з дисульфідом молібдену (MoS_2). Формування і дослідження покриттів на основі дисульфиду молібдену є одним з найбільш перспективних напрямків в області створення твердозмащувальних покриттів [193].

Гексагональні кристали MoS_2 мають шарувату структуру. Твердість дисульфиду молібдену за шкалою Мооса складає 1,0-1,5. Кристали MoS_2 мають високу хімічну стабільність і водночас є стійкими до впливу більшості кислот і до радіоактивного випромінювання. У вакуумі при температурі 1100°C розкладається на молібден і сірку, а на повітрі при температурі вище 450°C – на MoO_3 і SO_2 [194].

Змащувальні властивості дисульфиду молібдену забезпечує його кристалічна структура: зв'язки Ван-дер-Ваальса між шарами сірки дозволяють останнім вільно рухатися, в результаті чого тертя зменшується. З іншого боку, іонні зв'язки між Мо і S надають шарам високу міцність, що обумовлює їх здатність протистояти продавлюванню з боку мікровиступів поверхонь, що труться. У змащувальному шарі товщиною 2,5 мкм міститься 4000 шарів (S-Mo-S). Шари сірки, що утворюють поверхню кристала дисульфиду молібдену, забезпечують сильну адгезію до поверхні металу [195, 196].

Дослідженню взаємодії молібдену Мо з сіркою S присвячена низка робіт [197-199]. Виявлено, що в системі Мо-S утворюються два стабільних сульфіди молібдену – Mo_2S_3 і MoS_2 , які можуть бути отримані безпосередньо з елементів. Фаза Mo_2S_3 є нестабільною при температурах нижче 610°C . У фазі MoS_2 може розчинятися до 69% (ат.) S при 1000°C . Температура

плавлення MoS_2 вище $1800\text{ }^\circ\text{C}$. Розчинність S в Mo досягає 1,5% (ат.) при $1100\text{ }^\circ\text{C}$ [200]

Новим напрямком в отриманні сульфідів молібдену є модифікація поверхонь тертя. Відомі також технології сульфоціанування електроосаджених Fe-Mo покриттів [201]. Авторами даної роботи експериментально встановлено найбільш раціональне сульфоціануюче середовище – покриття деталей пастою, що має наступний склад: 35,40% жовтої кров'яної солі, 15,20% сірчаного колчедану, 5,8% шамоту, 25,30% сажі і крохмальним клейстером в якості зв'язувальної речовини. Процес сульфоціанування здійснюється при температурі $823,873\text{ }^\circ\text{K}$, що дозволяє отримати зносостійке покриття з поверхневою карбонітридною зоною, насиченою сульфідами заліза і дисульфідом молібдену. Проте, така технологія є екологічно небезпечною.

Також відомі методи ХТО, що дозволяють при послідовному або одночасному насиченні Mo і S сталевих поверхонь отримувати сульфомолібденові покриття.

Метод CVD дозволяє синтезувати шаруваті сполуки MoX_2 . В роботі [202] представлені результати дослідження щодо отримання молекулярно тонкого MoS_2 при випаровуванні Mo і відпалі під сірководнем (H_2S). Пряме сульфування Mo, що випарувався, або порошку $\alpha\text{-MoO}_3$ також можна розглядати як підхід для синтезу шаруватого MoS_2 [203, 204].

Метод EIL розширює можливості отримання трибологічних покриттів. В роботі [205] запропоновано спосіб нанесення зносостійкого і антифрикційного покриття на робочі поверхні поршневого кільця. Він полягає в отриманні покриття з молібдену товщиною 30 мкм, мікротвердістю 6400 МПа і шорсткістю Rz від 1,5 до 1,1 мкм. Легована поверхня піддавалася ручному шліфуванню наждачним папером, після чого на неї наносили покриття з міді, яке обробляли ППД, а потім наносили мастило, що містить дисульфід молібдену і графіт для поліпшення припрацювання вузлів тертя. Проте, така технологія має істотні недоліки, які полягають у збільшенні

технологічних операцій, наявність консистентної змазки на поверхні і можливість забруднення нею робочого середовища деталі, що є вкрай небажаним, наприклад, у вузлах тертя харчової промисловості та ін.

Таким чином, останнім часом збільшується кількість досліджень щодо вивчення процесу ЕІЛ з метою збільшення твердості і зносостійкості робочих поверхонь – цементація, борування, нанесення твердих сплавів і твердих зносостійких матеріалів. Технологія ЕІЛ може ефективно конкурувати, а в деяких випадках і замінювати такі технології ХТО як цементація, дифузійна металізація алюмінієм, хромом, титаном та ін., які потребують дорогого і громіздкого обладнання, є трудомісткими, тривалими за часом, екологічно небезпечним. Метод ЕІЛ дозволяє створювати якісні покриття із заданим комплексом фізико-механічних властивостей.

У значно меншій мірі досліджені процеси отримання методом ЕІЛ різних функціональних покриттів: м'яких припрацювальних (сульфідування, сульфоцементация, комплексні покриття), захисних (алітування, сульфоалітування, комплексні покриття), зносостійких (борування, бороалітування, бороцементация) та ін. Майже недослідженими є процеси структуро- і фазоутворення, відсутні експериментальні та розрахункові дані, щодо впливу параметрів ЕІЛ на якість електроіскрових покриттів. Особливий інтерес мають методи насичення поверхні одним або одночасно кількома елементами з використанням нової технології – нанесення на поверхню, що обробляється, СТС з подальшим ЕІЛ. Цей новий екологічно чистий і прогресивний метод потребує глибокого вивчення з позицій матеріалознавства, проведення досліджень щодо впливу складу СТС, режимів ЕІЛ на структуру, фазовий склад, фізико-механічні та трибологічні властивості поверхонь, що обробляються, встановлення найбільш ефективного і обґрунтованого поєднання «склад СТС – легуючий електрод – режими ЕІЛ - матеріал, що підлягає обробленню».

1.4. Застосування методів фінішного оброблення з метою підвищення якості електроіскрових покриттів

В останні роки, для підвищення якості поверхневих шарів деталей машин, все більшого значення набуває метод електроіскрового легування (ЕІЛ) – процес взаємодії матеріалу анода і катода при уніполярному перенесенні з анода на катод, який є деталлю, що обробляється [206, 207]. Його специфічними особливостями, які приваблюють технологів, є: локальність дії, мала витрата енергії, відсутність об'ємного нагріву матеріалу, міцне з'єднання нанесеного матеріалу з основою, простота автоматизації, можливість поєднання операцій та ін. В той же час метод електроіскрового легування має ряд недоліків, таких як низька якість мікрорельєфу поверхні, наявність пор і тріщин, зниження втомної міцності, обмеження товщини формованого шару, а також наявність залишкових розтягуючих напружень у покритті [12, 165, 208].

Використання технологій фінішної обробки дозволяє підвищити якість поверхні, зменшити пористість, сформувати стискаючі напруження в поверхневому, підвищити якість поверхні.

Як відомо, вибір того чи іншого методу оброблення пов'язаний з формою поверхні деталі. Класифікація методів фінішного оброблення поверхонь докладно описані в [209]. Характеристики методів, які найчастіше застосовуються, представлені в табл. 1.2.

Застосування після ЕІЛ шліфування не є раціональним, оскільки в даному випадку видаляється, як мінімум 50-100 мкм поверхневого шару, причому тієї його частини, що має необхідні властивості (наприклад, низька або висока твердість), що забезпечує необхідні триботехнічні характеристики.

З метою впливу на мікротопографію та якість покриттів найбільшого поширення набули методи, засновані на поверхневому пластичному деформуванні [110]. Слід зазначити, що застосування методів ППД не завжди призводить до бажаних результатів. Так, при обкатці кулькою, незначне

Таблиця 1.2 – Характеристика методів фінішного оброблення

Метод оброблення	Переваги	Недоліки
Шліфування [210-212]	<ul style="list-style-type: none"> – найбільш поширений метод, – дозволяє отримати високу геометричну точність і шорсткість до $Ra = 1 - 0,32$ мкм, – використовується універсальне устаткування 	<ul style="list-style-type: none"> – нерівномірне зношування інструменту, – необхідність частої заміни інструменту, – висока теплонапруженість процесу, – наявність залишкових розтягуючих напружень
ППД (обкатування, алмазне вигладжування) [213]	<ul style="list-style-type: none"> – зміцнення поверхневого шару, – в поверхневому шарі виникають залишкові напруження стискання, – виключається шаржування обробленої поверхні абразивними та іншими частинками; – стає можливим утворення частково і повністю регулярних мікрорельєфів, – висока продуктивність, – надійність і простота здійснення операцій ППД, – $Ra = 0,05 \dots 1$ мкм , – відсутні термічні дефекти 	у зв'язку з пластичною течією металу на кромках поверхонь, що обробляються, утворюються рівномірні напливи металу товщиною від 0,03 до 0,3 мм
Струменеве оброблення [214]	<ul style="list-style-type: none"> – висока продуктивність, – можливість оброблення складної зовнішньої поверхні, – дозволяє отримати шорсткість до $Ra =$ мкм 	<ul style="list-style-type: none"> – складність вибору режимів оброблення, – можливість перенаклепу поверхневого шару, – зниження якості поверхні, – безрозмірний спосіб оброблення , – шаржування поверхні
Вібраційне оброблення [209, 215, 216]	<ul style="list-style-type: none"> – низька вартість обладнання та інструменту, – універсальність обладнання, – висока продуктивність, – одночасне оброблення великої кількості деталей, – якість оброблення і продуктивність процесу не залежать від складності поверхні, що підлягає обробленню 	<ul style="list-style-type: none"> – безрозмірний спосіб оброблення , – відносна складність вибору режимів оброблення
Безабразивне ультразвукове фінішне оброблення [2, 110, 217]	<ul style="list-style-type: none"> – висока продуктивність – геометрична точність – якість поверхні – універсальність обладнання 	<ul style="list-style-type: none"> – висока вартість обладнання – висока енергоємність – складність вибору режимів оброблення

перевищення (на 10%) необхідного питомого зусилля обкатки, зумовлює виникнення мікротріщин у цементованому методом ЕІЛ поверхневому шарі [19], які можуть стати причиною руйнування деталей.

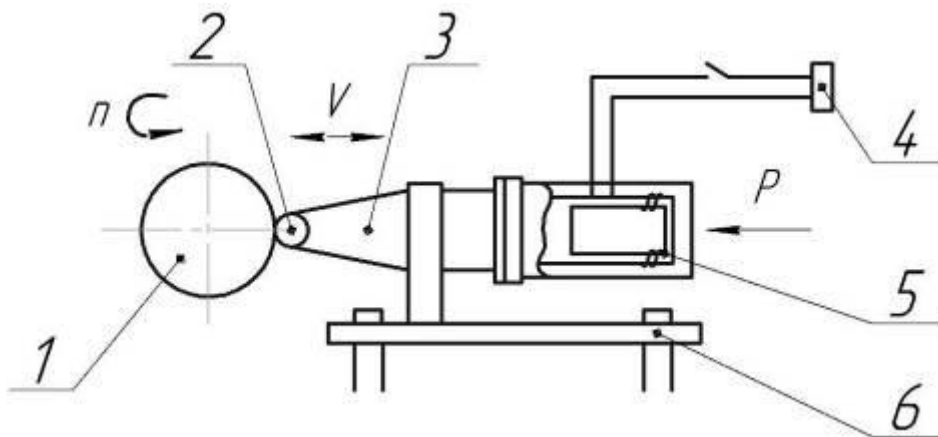
В роботі [146] зазначено, що для зниження шорсткості поверхні покриття, що отримані методом ЕІЛ, достатньо в якості заключної операції після легування відповідним матеріалом провести «м'яке» легування графітом. В цьому випадку утворюється не шар графіту, а деякий дифузійний шар, причому відбувається викид металу катода (деталі) в місцях прикладання імпульсів, тобто розпилення найбільш виступаючих частин поверхні. В результаті відбувається згладжування гребінців і, отже, знижується шорсткість поверхні. Як показано в роботі В. Б. Терельніка [142] така технологія є ефективною. Однією з технологій, за допомогою якої реалізується ППД, є безабразивне ультразвукове фінішне оброблення (БУФО).

В ультразвуковій установці з деформуючим інструментом у вигляді напівсфери генератором ультразвукових коливань створюються електромагнітні коливання необхідної частоти, які магнітострикційним перетворювачем перетворюються в механічні. Коливання по хвилеводу поширюються до виробу. Амплітуда цих коливань збільшується концентратором, і завдяки спеціальній його конструкції, відбувається передача енергії різним за формою і геометричними розмірами ділянкам виробів (рис. 1.10).

Результати застосування методу БУФО з метою покращення поверхневого шару деталей поєднують в собі найкращі показники окремих, класичних, способів оброблення [110]:

- мікротвердість поверхні, у порівнянні з початковим значенням, зростає на 30-300%;
- шорсткість знижується з 5 до 9-14 класу;
- товщина наклепу може бути до 0,1 мм, в окремих випадках можливо реалізувати режим холодної проковки з товщиною наклепу до 15-20 мм;

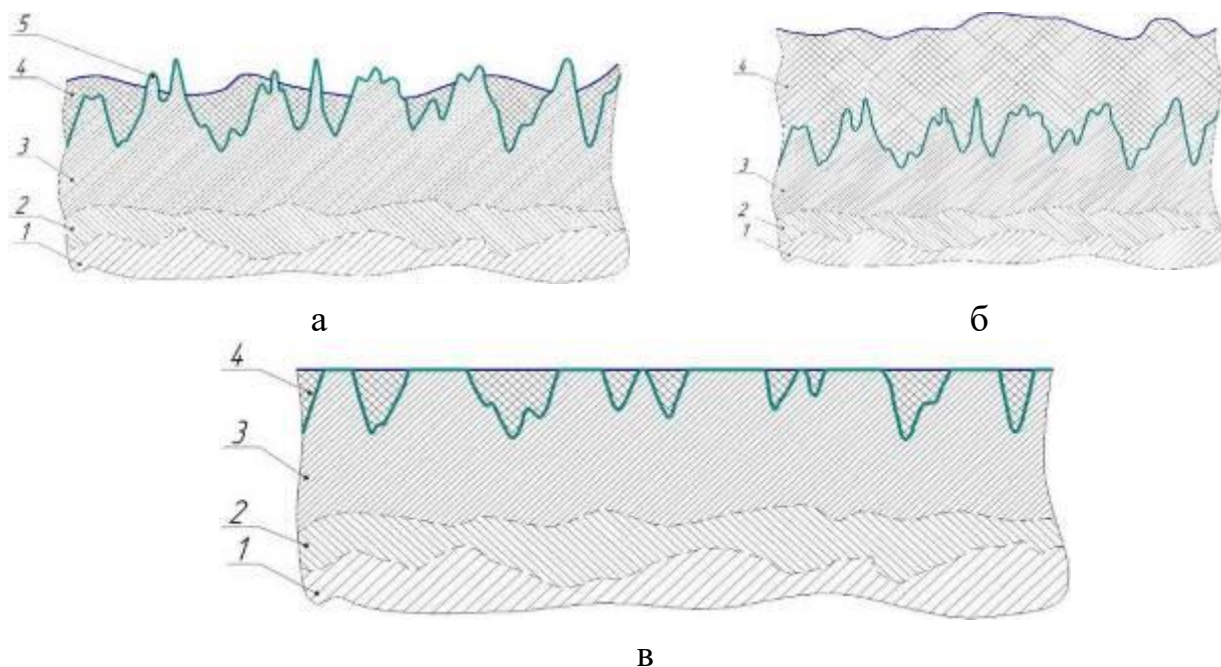
- оптимально поєднуючи статичну і динамічну складову сили ультразвукового оброблення, можна перевищити межу текучості металу, що обробляється, і, тим самим, проводити корекцію геометрії оброблюваної деталі;
- межа контактної витривалості підвищується на 10-20%;
- відсутність шаржованих в поверхню зерен абразиву збільшує до 2 разів термін служби спряжених деталей (пар ковзання, ущільнюючих сальників, сальникової набивки і т.д.), з'являється можливість за допомогою ультразвукового оброблення виготовляти деталі для харчової, текстильної промисловості, а також для будь-яких машин і механізмів, у яких наявність абразиву в технологічній зоні є неприйнятним;
- створення регулярного мікрорельєфу на поверхні (РМР) сприяє утриманню обробленою поверхнею мастильних матеріалів;
- РМР додатково знижує зношування спряжених деталей при зворотно-поступальному русі одна відносно іншої;
- підвищується корозійна стійкість обробленої поверхні.



1 – деталь, що обробляється; 2 – індентор; 3 – концентратор-хвилевід;
 4 – генератор; 5 – магнітострикційний перетворювач; 6 – напрямні
 Рисунок 1.10 – Схема вузлів технологічного обладнання для БУФО

В результаті цього, деталі машин і механізмів після ультразвукового імпульсного зміцнюючого чистового оброблення, мають більшу зносостійкість, циклічну міцність, контактну втому і т.д., ніж після шліфування, обкатки і багатьох інших фінішних способів оброблення поверхні.

В роботах [218, 219] проведено аналіз можливостей застосування методу БУФО електроіскрових покриттів з метою забезпечення підвищення корозійної стійкості. Показано, що у порівнянні з методами ППД, зазначений метод дає можливість підвищити корозійну стійкість деталей машин.



1 – матеріал деталі; 2 – перехідний шар; 3 – шар покриття, нанесеного ЕІЛ;
4 – шар з МПМ; 5 – вершини шорсткості;

а – нанесення одного шару МПМ з подальшим ЕІЛ графітовим електродом з метою зниження шорсткості; б – нарощування шару МПМ з наступним механічним обробленням; в – покриття після механічного оброблення

Рисунок 1.11 – Схеми структури поверхневого шару деталі, сформованого в послідовності ЕІЛ → МПМ

Останнім часом в ремонтному виробництві набувають більшого застосування нові технології ремонту обладнання за допомогою металополімерних матеріалів (МППМ). Вони мають наступні властивості: добру адгезію з металом; близькі до металу деформаційні характеристики; незначна зміна властивостей при зміні температури; мінімальна усадка при твердінні; стійкість до дії зовнішніх чинників; відсутність зовнішніх виділень, що впливають на метал; мінімальною підготовкою поверхні; твердінням без тиску і без підвищених температур; тривалим терміном експлуатації без зміни механічних властивостей; екологічною безпекою [17, 220].

Слід зазначити, що для того, щоб досягти доброї адгезії пластика з поверхнею виробу, що обробляється, необхідно створити на ній певну (необхідну) шорсткість. Варіюючи режимами легування, можна в широких межах змінювати шорсткість поверхні (Rz) – від 1 до 200 мкм і більше. Для відновлення і зміцнення деталей в роботі [221] запропонована інтегрована технологія, що включає в себе метод ЕІЛ з подальшим нанесенням МППМ (рис. 1.11).

В даному випадку кожна з технологій – ЕІЛ і нанесення МППМ не знижує переваг іншої, а навпаки – вони доповнюють одна одну і усувають недоліки, притаманні кожній з них. Переваги інтегрованої технології ЕІЛ + МППМ є очевидними: суцільність поверхні 100%; шорсткість значно нижча, ніж при ЕІЛ; твердість значно вища, ніж у МППМ. Також, завдяки можливості нанесення методом ЕІЛ покриття з використанням великої гами матеріалів, можна в широких межах змінювати механічні, термічні, електричні та інші властивості робочих поверхонь деталей. Водночас потрапляння МППМ у западини і мікронерівності, утворені методом ЕІЛ поверхні, виключає ймовірність формування в них осередків корозії. Тому, зносостійкість, надійність та довговічність зміцнених і/або відновлених за допомогою поєднання двох

технологій (ЕІЛ та МПМ) деталей вище, ніж з використанням кожної з них окремо.

Таким чином, застосування методів фінішного оброблення електроіскрових покриттів, з метою підвищення їх якості, є резервом при використанні технології ЕІЛ із застосуванням СТС для виготовлення та ремонту більш широкого кола відповідальних деталей ДО. Аналіз літературних джерел, в яких представлені методи фінішного оброблення деталей, що найбільш часто використовуються, їх переваги і недоліки (табл. 1.3), дозволяє рекомендувати для зниження рівня шорсткості поверхні і зміни виду наявних у поверхневому шарі, що піддіється ЕІЛ, розтягуючих напружень на стискаючі застосовувати в заключній операції методи ППД: ОК, АВ і БУФО. Віддаючи перевагу БУФО, виключається негативний вплив оператора на якість формованої поверхні. При цьому м'які покриття (<2000 МПа) рекомендується зміцнювати ОК. Покриття середньої твердості (2000-3000 МПа) і тверді (>3000 МПа) можна зміцнювати ОК, АВ і БУФО, з огляду на те, що шорсткість (R_a) вихідної поверхні не повинна перевищувати 12 мкм для ОК та 5 мкм для АВ і БУФО [9-11].

При відновленні поверхневого шару деталей ДО або зниженні високого рівня шорсткості поверхневого шару, що утворилася в результаті застосування технології ЕІЛ + СТС, найбільш доцільним є подальше нанесення МПМ і лезове оброблення різцем, фрезою або іншим інструментом.

1.5. Моделювання процесу формування покриття методом ЕІЛ

Механізм формування поверхневого шару підкладки (катода) і фізична модель процесу ЕІЛ була викладена в роботах основоположників методу ЕІЛ Б.Р. Лазаренко і Н.Й. Лазаренко [113, 119, 146, 222]. Автори описують процес ЕІЛ з позицій ерозії матеріалу анода тільки в рідкій фазі, розглядають процес дифузії в електродах і «проковування» легованого шару (ЛШ).

Аналіз літературних та експериментальних даних закономірностей ерозії і формування ЛШ для різних класів матеріалів в широкому діапазоні режимів, видів ЕІЛ і міжелектродних середовищ [223-225] обумовив розробку узагальненої моделі А. Д. Верхотурова [226]. Модель процесу ЕІЛ відрізняється від моделі Лазаренко кінетикою процесу та урахуванням поверхневих явищ на аноді і катоді, які включають: руйнування електродів в рідкій, паровій та твердій фазах; схоплювання їх в момент контакту; зміна властивостей робочих поверхонь за рахунок перенесення матеріалу та імпульсних навантажень; наявність на катоді в зоні дії іскри мікрованни, що забезпечує перекристалізацію матеріалів і їх фізико-хімічну взаємодію; обмеження товщини шару за рахунок внутрішніх напружень і термовтоми; дискретний характер формування легованого шару [227].

В роботі [12] запропонована математична модель управління параметрами якості сформованих покриттів (кількістю перенесеного матеріалу з електрода на виріб, товщиною, шорсткістю і мікротвердістю нанесеного шару). Модель заснована на енергетичному підході, який полягає в можливості інтегрального опису за допомогою енергетичних критеріїв впливу численних параметрів на показники якості. Автором запропоновано за критерій масопереносу приймати енергію активації процесу масопереносу, за енергію активації процесу зношування – критерій зносу і т.д. Зазначена математична модель дозволяє прогнозувати з високою точністю параметри якості сформованих покриттів.

Важливу роль при розгляді процесу ЕІЛ має термодинамічне моделювання синтезу покриттів, що дозволяє оцінити склад продуктів взаємодії у багатофазних багатокомпонентних системах [228].

Фізична природа електроіскрового оброблення під дією потоків енергії являє собою комплекс складних механо-фізико-хімічних процесів, що протікають на поверхні контакту, в об'ємі поверхневого шару деталі, що обробляється. Ці процеси, що пов'язані з такими явищами як деформація, тертя,

фізико-хімічні перетворення, адгезійні явища, перенесення тепла, дисипація енергії, кавітація, хвильові процеси, зношування і руйнування матеріалу і т.д., мають істотний вплив на оброблювану деталь, і в комплексі призводять до якісно нової поведінки технологічної системи (ТС). Процеси ЕІЛ є складними ТС, в яких можливі процеси самоорганізації.

У науковій літературі зустрічається незначна кількість робіт, присвячених дослідженню процесів оброблення КПЕ з позиції синергетики. Серед небагатьох можна відзначити роботи [229-232], в яких розглядалися механізми еволюції та самоорганізації у взаємопов'язаних і взаємозалежних фізичних процесах, що супроводжують процес поверхневого оброблення. Аналіз цих робіт, з одного боку дає можливість зробити висновок щодо перспективності досліджень оброблення КПЕ з позиції синергетики, а з іншого – вказує на недостатню вивченість механізмів самоорганізації й еволюції в ТС оброблення КПЕ, особливо ЕІЛ. Незважаючи на досягнуті позитивні результати синергетичного підходу до зазначених процесів, до теперішнього часу відсутня єдина теорія, що комплексно описує процеси самоорганізації в ТС електроіскрового легування.

Таким чином, незважаючи на значну кількість різнопланових і глибоких робіт, багато питань щодо моделювання процесу ЕІЛ залишається відкритими. Так, наприклад, відсутня єдина фізична модель, що пов'язує анодний масовий потік, формування зміцненого покриття і умови його формування. Також, відсутні залежності, що дозволяють оптимізувати і прогнозувати якість і властивості покриття. Ми можемо назвати умови, за яких протікають процеси, що визначають ЕІЛ, як нерівноважні. До них відносять ерозію легуючого електрода, розвиток анодного масового потоку, формування покриття та утворення зміненого поверхневого шару. Аналізуючи процеси ЕІЛ, доводиться мати справу зі складною фізичною системою, якій притаманні і динамічні і стохастичні складові, які призводять до самоорганізації. Спрогнозувати її

поведінку можливо завдяки модифікованій системі Лоренца, яка і призначена для роботи з подібного роду складовими [233]. Відомо, система Лоренца складається з поля, параметра порядку і керуючого параметра [234]. Тому актуальним є застосування синергетичних законів до такого фізичного прикладу самоорганізації, як ЕІЛ, на основі вивчення фазових переходів динамічних складових цього процесу за допомогою методу фазової площини та дослідження розв'язань рівняння Ланжевена [235].

1.6. Висновки до розділу

1. Результати аналізу щодо причин втрати працездатності різних класів деталей машин ДО, які працюють у важких умовах експлуатації вказують, що, незважаючи на те, що до них застосовується значна кількість відповідних методів захисту, вони піддаються різноманітним видам зношування і наразі складно віддати перевагу будь-якому способу захисту або їх комбінації без додаткових досліджень.

2. Основним завданням методів, що застосовуються, є підвищення якісних параметрів поверхневого шару, а саме: підвищення твердості і мікротвердості, зниження шорсткості, підвищення зносостійкості і відновлення зношених ділянок поверхонь, зміна величини і знаку залишкових напружень, збільшення втомної міцності і т.д. Крім того, при виборі методу або комбінації з декількох методів необхідно віддавати перевагу таким, що є економічно вигідними й екологічно безпечними.

3. Основними методами управління якістю поверхневого шару, що застосовуються для деталей ДО є: поверхневе пластичне деформування (обробка дробом, обкатка кулькою, обкатка роликом, алмазне вигладжування та ін.), хіміко-термічне оброблення (цементация, азотування, нітроцементация і ін.), поверхневе термічне оброблення (гартування СВЧ, контактне, газополум'яне, в електроліті й ін.), наплавка, напилення (PVD, CVD, магнетронне розпилення та

ін.), оброблення концентрованими потоками енергії (лазерна, електронним і іонним пучками, електроіскрове легування та ін.).

4. Проведений аналіз особливостей формування поверхневого шару при ЕІЛ. Показано, що ЕІЛ є процесом складним і багатопараметричним. Властивості поверхневого шару, який формується при ЕІЛ, залежать від структури, фазового та хімічного складу анодних матеріалів. У разі одноразового впливу іскрового розряду на поверхню електродів процес формування поверхневого шару буде визначатися співвідношенням теплофізичних характеристик матеріалу анода і катода.

5. Аналіз літератури показав, що ЕІЛ широко застосовується для здійснення процесу цементації, металізації, нанесення твердих сплавів на поверхню. У значно меншій мірі досліджені процеси отримання методом ЕІЛ різних функціональних покриттів: м'яких припрацювальних (сульфідування, сульфоцементация, комплексні покриття), захисних (алітування, сульфоалітування, комплексні покриття), зносостійких (борування, бороалітування, бороцементация) та ін. Майже недослідженими є процеси структуро- і фазоутворення, відсутні експериментальні та розрахункові дані, щодо впливу параметрів ЕІЛ на якість електроіскрових покриттів.

6. Особливий інтерес мають методи насичення поверхні одним або одночасно кількома елементами з застосуванням нової технології – ЕІЛ з використанням спеціального технологічного середовища. Цей новий екологічно чистий і прогресивний метод потребує глибокого вивчення.

7. Проведений аналіз підходів, що застосовуються для моделювання процесу формування покриття методом ЕІЛ. Незважаючи на значну кількість різнопланових і глибоких робіт, багато питань щодо моделювання процесу ЕІЛ залишається відкритими. Відсутні залежності, що дозволяють оптимізувати і прогнозувати якість і властивості покриття. Актуальним є застосування синергетичних законів до такого фізичного прикладу самоорганізації, як ЕІЛ, на

основі вивчення фазових переходів динамічних складових цього процесу за допомогою методу фазової площини та дослідження розв'язань рівняння Ланжевена.

8. Основні наукові та практичні результати, подані в цьому розділі, в повній мірі відображені в публікаціях автора [9-11, 14, 17, 18, 24, 41, 59, 133, 149, 178, 236].

1.7. Мета та завдання дослідження

У розділі виконано детальний аналіз літературних джерел і патентів щодо відомих методів підвищення якості поверхневих шарів динамічного обладнання (ДО). Показано, що електроіскрове легування (ЕІЛ) є екологічно чистим та економічним методом підвищення якості робочих поверхонь ДО. Ряд положень, виявлених в публікаціях, у тому числі, дослідження, опубліковані раніше в роботах за участю автора, показали, що особливий інтерес мають методи насичення поверхні одним або одночасно кількома елементами з використанням нової технології – нанесення на поверхню, що обробляється, спеціального технологічного середовища (СТС) з подальшим ЕІЛ. Цей новий екологічно чистий і прогресивний метод потребує глибокого вивчення з позицій матеріалознавства, проведення досліджень щодо впливу складу СТС, режимів ЕІЛ на структуру, фазовий склад, фізико-механічні та трибологічні властивості поверхонь, що обробляються, встановлення найбільш ефективного і обґрунтованого поєднання «склад СТС – легуючий електрод – режими ЕІЛ – матеріал, що підлягає обробленню». Актуальним є розроблення термодинамічної моделі управління якістю поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ, застосування синергетичних законів до такого фізичного прикладу самоорганізації, як ЕІЛ, на основі вивчення фазових переходів динамічних складових цього процесу за допомогою методу фазової площини.

Мета роботи є підвищення довговічності деталей динамічного

обладнання шляхом керування структурою та властивостями сталених поверхонь за рахунок комплексного впливу електроіскрового легування із застосуванням СТС.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- проаналізувати і систематизувати способи підвищення якості робочих поверхонь деталей ДЮ;
- розробити методологію управління структуроутворенням сталених поверхонь під час їх оброблення методом ЕІЛ із застосуванням СТС;
- дослідити особливості формування структури та властивостей однокомпонентних покриттів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС за різних режимів оброблення;
- встановити вплив складу СТС та режиму ЕІЛ на особливості формування структурно-фазового стану багатоконпонентних покриттів;
- розробити адекватну математичну модель прогнозування якості поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ з використанням СТС;
- розробити математичну модель формування електроіскрового покриття, що ґрунтується на методі фазової площини й статистичного аналізу, яка враховує параметри процесу ЕІЛ, а також перевірити її адекватність;
- дослідити залежності механічних і трибологічних властивостей модифікованих поверхонь від матеріалу легувальних електродів-інструментів, складу СТС, а також енергетичних режимів ЕІЛ і встановити найбільш ефективне їх поєднання;
- розробити наукові принципи практичної реалізації енергоефективних та екологічно безпечних технологій одержання функціональних покриттів, що базуються на методі ЕІЛ з використанням СТС, в поєднанні з іншими методами підвищення якості поверхневих шарів деталей для подальшого впровадження у виробництво.

РОЗДІЛ 2

МОЛОГІЯ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Методологія досягнення мети дослідження

В основі сучасної теорії модифікування поверхні металів (інженерії поверхні) лежить методологія управління структуроутворенням, яка дозволяє контролювати структурний стан металу. При розробці регульованих процесів, що відбуваються при ЕІЛ, основним завданням є оптимізація технологічних параметрів, що досягається шляхом поєднання процедури моделювання з експериментальним встановленням кореляційних залежностей між цими параметрами і характеристиками структури і властивостей модифікованих шарів. Багато фізичних і більшість механічних властивостей металів залежать від особливостей їх будови, тому структурні параметри і макровластивості матеріалів необхідно вивчати у взаємозв'язку. З цією метою експериментальні методи дослідження об'єднані в єдиний аналітичний комплекс, що дозволяє виконувати повний цикл досліджень матеріалів. Поєднання теоретичних та експериментальних досліджень дає можливість розробити і впровадити у виробництво ряд ефективних технологічних процесів ЕІЛ для модифікування робочих поверхонь ДО.

Виходячи зі специфіки роботи деталей динамічного обладнання формуються вимоги до їх робочих поверхонь для забезпечення яких необхідно підібрати методи отримання поверхневого шару із заданою структурою та властивостями.

Так як завдання формування властивостей поверхневого шару деталі є інваріантним, тобто реалізується різними методами або їх комбінацією, на першому етапі формуємо матрицю досяжності рішення задачі $R = [r_i]$, яка визначається наступним чином:

$$r_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо вершина } P_0 \text{ досяжна з } P_i \\ 0, & \text{в протилежному випадку} \end{cases},$$

де P_0 - рішення задачі; P_i - елемент рішення.

Таким чином відбувається усунення всіх варіантів, які не дозволяють досягти необхідних вимог (тупикові варіанти).

Варіанти, що залишились, є сукупністю можливих рішень. Дані варіанти реалізації завдання формування властивостей поверхневого шару деталі представляємо у вигляді графа (рис. 2.1).

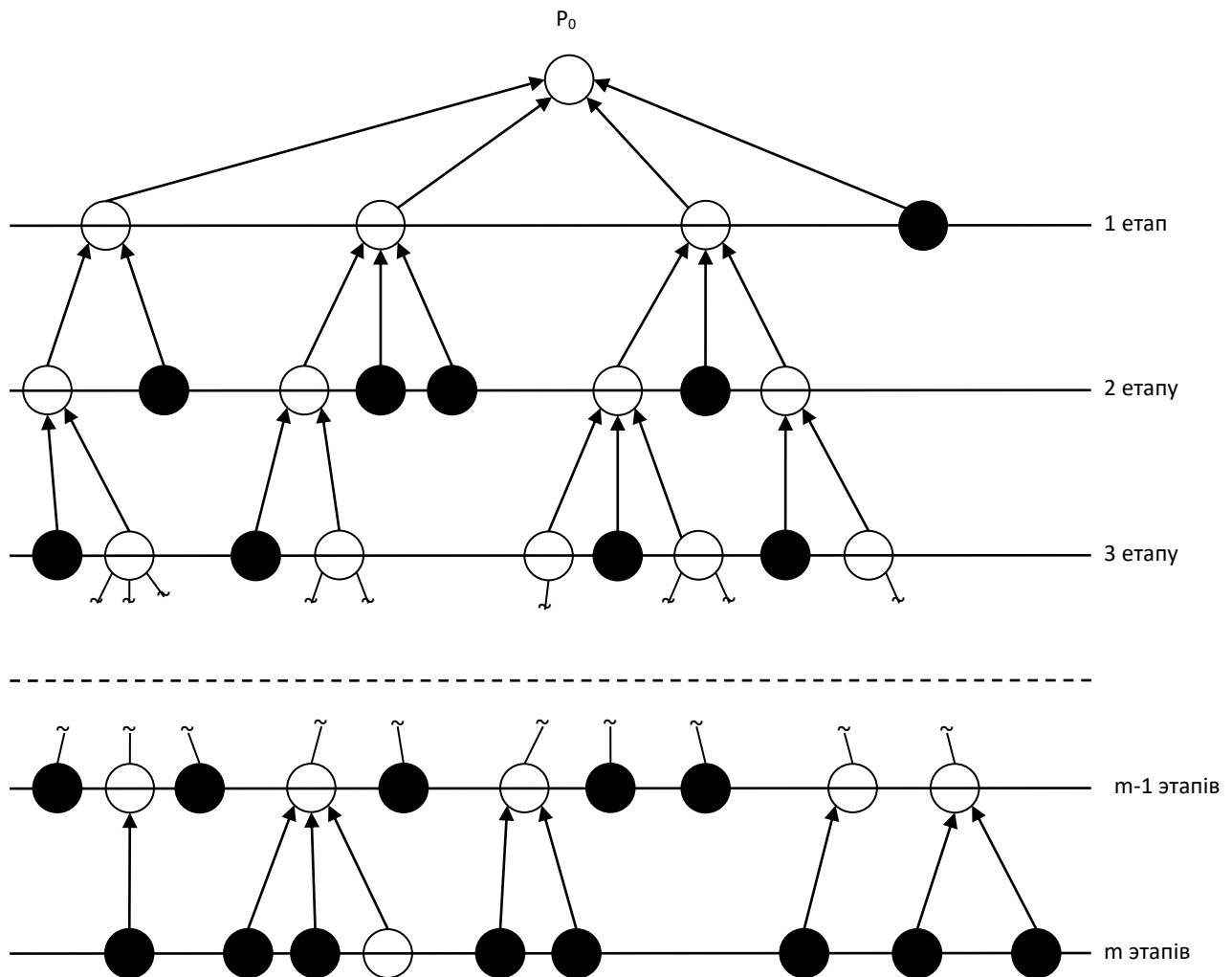


Рисунок 2.1 – Граф реалізації завдання (дерево рішень)

Граф є орієнтованим, вершина якого P_0 є рішенням задачі, рівні графа відповідають етапам рішення, тобто кількості задіяних методів з можливих «m» варіантів комбінацій. Вузли графа - методи досягнення необхідних вимог. Ребра графа - технології, що дозволяють реалізувати методи. У графі є висячі вершини - нижній рівень розбиття завдання.

Граф будується згідно матриці досяжності R , в якій множина вершин $R(P_i)$ графа досяжних з вершин P_0 складається з таких елементів P_i , Для яких i -й елемент в матриці дорівнює 1.

Так як вершина графа P_0 , яка досяжна з P_i може бути досягнута з використанням шляху довжин 1, 2, ..., m, то множина варіантів вирішення завдання можна представити у вигляді:

$$R(P_i) = G\{P_i\} \cup G^2\{P_i\} \cup \dots \cup G^{m-1}\{P_i\} \cup G^m\{P_i\},$$

де $G\{P_i\}$ - множина вершин графа для яких існують дуги (P_i, P_0) . При цьому необхідною умовою формування множини є:

$$\{P_0\} = \bigcup \{P(j) \mid P(j)^*\},$$

де $P(j)^*$ - висяча вершина графу.

Пошук рішень завершується тоді, коли будуть розглянуті всі висячі вершини.

В реальних умовах виробництва собівартість методів формування технологічних властивостей поверхневого шару деталі істотно відрізняється один від одного, тому завдання оптимізації доцільно вирішувати у вигляді графа спрямованого вибору технологій (рис. 2.2), що реалізується n-м кількістю методів. P_0 - початковий стан поверхні; P_n - поверхня із заданими технологічними властивостями; $M_1..M_n$ - методи досягнення (рівні графа) властивостей; вершини графу – обладнання, що здатне реалізувати конкретний метод; ребра графу - трудомісткість реалізації методу.

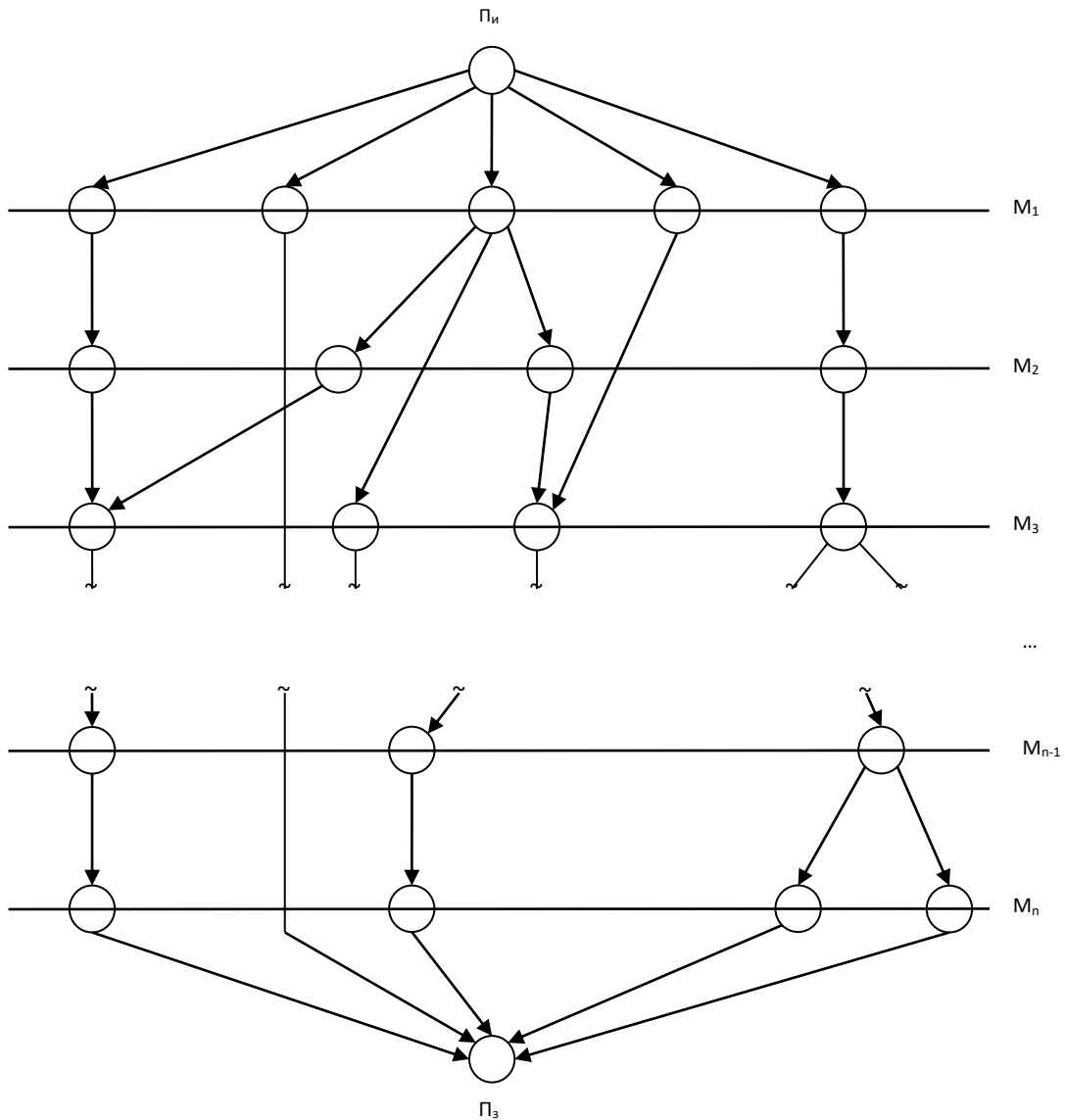


Рисунок 2.2 – Граф технологій забезпечення властивостей поверхневого шару деталі

Дана модель дозволяє побудувати матрицю суміжності методів $A = [a_{i,j}]$ (рис. 2.3), яка визначається наступним чином:

$a_{i,j} = 1$, Якщо існує зв'язок між методами (M_i, M_j)

$a_{i,j} = 0$, якщо зв'язку немає.

Матриця має розмірність $n \times n$ по числу методів, що аналізуються.

$A =$	0	0	0	1	0	...	0	1
	0	0	1	0	0	...	0	2
	1	0	0	0	0	...	0	3
	0	0	0	0	1	...	0	4
	0	0	0	0	0	...	1	5

	0	1	0	0	0	...	0	n
	M1	M2	M3	M4	M5	...	Mn	

Рисунок 2.3 – Матриця суміжності методів задіяних для формування технологічних властивостей поверхневого шару деталі.

Заповнення матриці відбувається по рядках. Згідно графу реалізації завдань (рис. 2.1) рядок матриці відповідає набору методів, а стовпець визначає складність вирішення задачі (кількістю етапів). Матриця суміжності методів будується під кожен гілку графу з висячою вершиною. Останній рядок, в якому є «1» відповідає нижньому рівню розбиття завдання.

Згідно матриць суміжності будуюмо мережеву модель процедури формування технологічних властивостей поверхневого шару деталі (рис. 2.4).

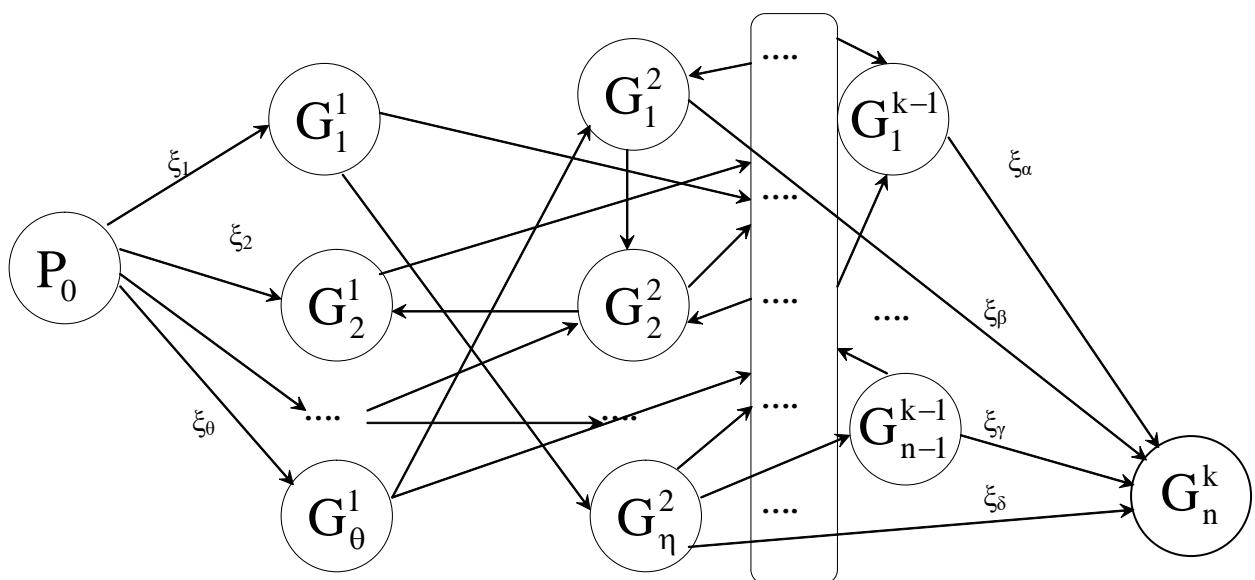


Рисунок 2.4 – Мережева модель пошуку варіанту розв'язання задачі

Мережева модель подана орієнтованим графом, вузлами якого є етапи розв'язання задачі, а ребрами трудомісткість їх розв'язання. Необхідно визначити найкоротший шлях із вершини P_0 до вершини G_n^k . Для цього складаються плани проходження шляху, що дозволяють розв'язати задачу різними методами. На першому етапі розбивається множина усіх шляхів, які ведуть із вершини P_0 до вершини G_n^k , на підмножини, що не перетинаються. За оцінку ξ беремо довжину ребер графа, що є частиною шляху, в цьому разі довжина повного шляху завжди буде $\geq \xi \cdot i$, де i – номер конкретного етапу. З цих підмножин формуємо плани реалізації завдання залежно від специфіки роботи деталей динамічного обладнання.

Далі результат пошуку реалізується за допомогою оптимізаційного методу «гілок і меж» [1-3].

Для цільової функції $f(x)$ необхідно знайти умову:

$$f(x) \rightarrow \min .$$

$$X \in G ,$$

де G – деяка кінцева множина.

Згідно [3] процедура пошуку реалізується за наступним алгоритмом:

0-й крок: вираховуємо $\xi(G) = \xi(G^0)$, якщо при цьому вдається знайти такий план X , що $f(X) = \xi(G)$, то $X \equiv X^*$ – оптимальний план. Якщо оптимальний план не знайдений, то певним способом розбиваємо $G = G^0$ на кінцеве число підмножин: $G^0 = G_1^1 \cup G_2^1 \cup \dots \cup G_{r_1}^1$, і переходимо до кроку 1;

1-й крок: вираховуємо $\xi(G_i^1)$, $i = \overline{1, r}$. Якщо при цьому вдається знайти такий план X , що $X \in G_r^1$, для деякого r ($1 \leq r \leq r_1$) та

$f(x) = \xi(G_r^1) \leq \xi(G_i^1)$, $i = \overline{1, r}$, то $X \equiv X^*$ – оптимальний план.

Якщо ж оптимальний план не знайдений, то вибирається «найбільш перспективне» для подальшого розбивання множин $C_{U(1)}^1$, за таким правилом:

$$\xi(G_{U(1)}^1) = \min_{i = \overline{1, r_1}} \xi(G_i^1) \cdot$$

Розбиваємо множину $C_{U(1)}^1$ на декілька підмножин:

$G_{U(1)}^1 = G_{U(1),1}^1 \cup G_{U(1),2}^1 \cup \dots \cup G_{U(1),S(1)}^1$. Множини, які не підлягали розбиттю:

$G_1^1, G_2^1, \dots, G_{U(k)-1}^1, G_{U(k)+2}^1, \dots, G_{r_1}^1, G_{U(1),1}^1, G_{U(1),2}^1, \dots, G_{U(1),S(1)}^1$, знову позначаємо через $G_1^2, G_2^2, \dots, G_{r_2}^2$ і переходимо до кроку 2;

k -й крок ($k \geq 2$): вираховуємо оцінки $\xi(G_i^k), i = \overline{1, r_k}$. Якщо в цьому разі вдається знайти такий план X , що $X \in G_r^k$, для деякого r ($1 \leq r \leq r_k$) та $f(x) = \xi(G_r^k) \leq \xi(G_i^k), i = \overline{1, r_k}$, то $X \equiv X^*$ – оптимальний план. Якщо ж оптимальний план не знайдений, то знову вибираємо найбільш перспективну множину $G_{U(k)}^k$ за правилом

$$\xi(g_{U(k)}^k) = \min_{i = \overline{1, r_k}} \xi(G_i^k) \cdot$$

Розбиваємо цю множину на декілька підмножин, що не перетинаються:

$G_{U(k)}^k = G_{U(k),1}^k \cup G_{U(k),2}^k \cup \dots \cup G_{U(k),S(k)}^k$. Потім ті множини, які ще не підлягали

розбиттю: $G_1^k, G_2^k, \dots, G_{U(k)-1}^k, G_{U(k)+2}^k, \dots, G_{r_k}^k, G_{U(k),1}^k, G_{U(k),2}^k, \dots, G_{U(k),S(k)}^k$, знову позначаємо

через $G_1^{k+1}, G_2^{k+1}, \dots, G_{r_{k+1}}^{k+1}$ і переходимо до $(k+1)$ -му кроку.

На рівні реалізації задача розв'язується згідно з таким виразом (необхідна умова):

$$\exists_{\xi \in \theta} P_{0\xi} = \bigcap_{\psi=1}^k G^{\psi} \{P_i\} \vee \exists_{\phi=1}^{\phi} M_{\phi} \vee \exists_{\zeta=1}^{\chi} O_{\zeta},$$

де $\exists_{\xi \in \theta} P_{0\xi}$ – існуючий варіант розв'язання задачі;

$\bigcap_{\psi=1}^k G^{\psi} \{P_i\}$ – сукупність планів розв'язання задачі;

$\exists_{\phi=1}^{\phi} M_{\phi}$ – наявність методів розв'язання задачі в кожному плані;

$\exists_{\zeta=1}^{\chi} O_{\zeta}$ – наявність обладнання, що здатне реалізувати метод.

При цьому множина розв'язків на рівні керування властивостями матеріалів подана таким рівнянням (достатня умова):

$$\forall_{k \in X} P_{0k} = \{P_0 \mid \lambda_{P_0}^{\min} \leq \lambda_{P_0} \leq \lambda_{P_0}^{\max}\},$$

тобто для всіх існуючих варіантів розв'язання задачі критерії за якістю процесу повинні знаходитися в діапазоні припустимих значень $\lambda_{P_0}^{\min} \leq \lambda_{P_0} \leq \lambda_{P_0}^{\max}$.

У цьому разі загальна модель формування шару із заданими властивостями буде мати вигляд:

$$\{T_{P_0}\} = \bigcup_{k \in X} \left\{ T_{P_0}(k) \left[\begin{array}{l} \exists_{\xi \in \theta} P_{0\xi} = \bigcap_{\psi=1}^k G^{\psi} \{P_i\} \vee \exists_{\phi=1}^{\phi} M_{\phi} \vee \exists_{\zeta=1}^{\chi} O_{\zeta}, \\ \forall_{k \in X} P_{0k} = \{P_0 \mid \lambda_{P_0}^{\min} \leq \lambda_{P_0} \leq \lambda_{P_0}^{\max}\} \end{array} \right. \right\}.$$

Оптимізаційне завдання за економічним критерієм мінімуму трудомісткості реалізації можна подати виразом:

$$P_0^{opt} = \lim_{T_{загальна} \rightarrow \min} P_0 | T_{загальна} \in \{T_{P_0}\}.$$

Обґрунтування вибору технологічного процесу ЕІЛ підвищення працездатності деталей ДО повинно бути обумовлено ресурсозбереженням, технологічністю, економічністю, екологічністю й ін.

На рисунку 2.5 представлена методологічна схема модифікування поверхні методом ЕІЛ із застосуванням СТС. Вирішенню завдання встановлення взаємозв'язку «склад електродних матеріалів і СТС – властивості» передують рішення двох паралельно пов'язаних функціональних завдань: створення (вибір) і використання СТС, матеріалів катода і анода. Результати розв'язання сходяться на етапі ЕІЛ-технології.

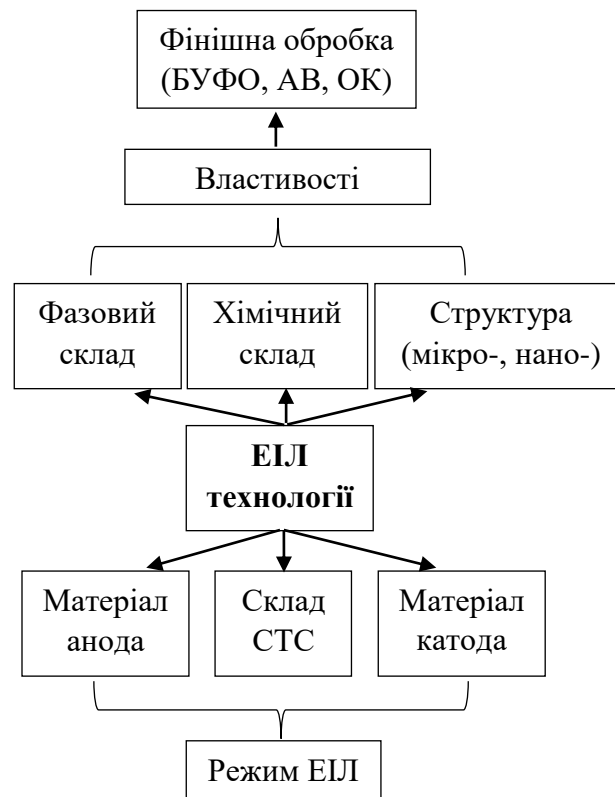


Рисунок 2.5 – Методологічна схема модифікування поверхні методом ЕІЛ із застосуванням СТС

В ідеальному випадку для кожного покриття відповідно до його функціонального призначення і умов експлуатації існує тільки одне оптимальне співвідношення властивостей. При цьому властивості покриття залежать від хімічного, фазового складу і структури покриття. Успіх вибору прогнозованих властивостей залежить від формулювання і уточнення умов експлуатації покриття, накопичених наукових даних, глибини аналізу та здійснення технології у взаємозв'язку «склад електродних матеріалів і СТС – структура покриття – технологія отримання – властивості». На рисунку 2.6 представлені методи досягнення необхідної якості поверхонь деталей ДО. Як електродні матеріали для ЕІЛ, як правило, застосовують тверді зносостійкі матеріали (хром, молібден, тверді сплави тощо) і «м'які» сплави, що наносяться на оброблювану поверхню з метою забезпечення антифрикційних властивостей, проте вони не завжди задовольняють вимогам, що ставляться до поверхонь і електродних матеріалів. Крім того, формування покриття зі не струмопровідних матеріалів шляхом ЕІЛ утруднене.

Нами розроблені нові способи управління структурою поверхневого шару шляхом ЕІЛ із застосуванням СТС, в склад якого можна вводити не тільки елементи струмопровідного матеріалу анода, що складається, наприклад, з металу або графіту, а й діелектрики, наприклад, сірку, бор і ін. шляхом введення їх в рідку мікророзчинку, що утворюється при локальних електроіскрових розрядах. Це однокомпонентні (алітування, цементация, сульфідуювання, азотування) та багатокомпонентні ($S+C$, $S+Al$, $Al+C+S$, $Al+C+B$, $Mo+S$, $N+C$ тощо). Особливістю пропонованого способу є те, що СТС містить необхідний елемент у вільному вигляді чи у сполуці, що під час проходження електричного розряду дифундує у поверхню, а процес ЕІЛ здійснюють електродом-інструментом зі струмопровідного матеріалу (метал, сплав, графіт). В результаті залежно від складу електродних матеріалів та СТС формуються покриття необхідного складу і заданими властивостями.



Рисунок 2.6 – Методи досягнення необхідної якості поверхонь деталей ДО

Таким чином, розроблена методологія керування якістю поверхневих шарів (мікроструктура, товщина шару, мікротвердість, суцільність, шорсткість), синтезованих методом ЕІЛ із застосуванням СТС, що використовується для отримання покриттів на сталевих виробах. Показана важлива роль вихідних матеріалів, СТС, матеріалу анода у взаємозв'язку з матеріалом катода в процесі створення методології функціональних покриттів методом ЕІЛ.

2.2. Устаткування для проведення електроіскрового легування

ЕІЛ провадилося на установках «ЕІЛ-8А», «ЕІЛ-9» і «Елітрон-52А» (рис. 2.7) в діапазоні енергій розряду (W_p) від 0,04 до 6,8 Дж.

Режими роботи установок подані в таблицях 2.1 – 2.3. Енергія розряду (W_p), згідно з даними таблиць, обчислюється за формулою:

$$W_p = k \cdot \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (2.1)$$

де k – коефіцієнт, що враховує втрати в колі ($k = 0,6-0,7$);

C – ємність накопичувального конденсатора, Ф;

U – напруга холостого ходу, В.



а



б

а – установка «ЕІЛ-8А»; б – «Елітрон-52А»

Рисунок 2.7 – Устаткування для проведення ЕІЛ

Таблиця 2.1 – Режими роботи установки моделі «ЕІЛ – 8А»

Номер режиму	Напруження холостого ходу, $U_{x,x}$, В	Робочий струм, I_p , А		Енергія розряду, W_p , Дж	
		$C = 150$ мкФ	$C = 300$ мкФ	$C = 150$ мкФ	$C = 300$ мкФ
1	16	0,2-0,4	1,0-1,4	0,01	0,02
2	23	0,3-0,5	1,4-1,6	0,02	0,05
3	30	0,5-0,6	1,6-2,0	0,04	0,08
4	37	0,6-0,7	1,8-2,0	0,06	0,12
5	47	0,7-0,8	2,0-2,2	0,10	0,20
6	57	0,8-0,9	2,2-2,4	0,15	0,30
7	67	0,9-1,0	2,4-2,7	0,20	0,40
8	77	1,0-1,2	2,6-2,8	0,27	0,55
9	87	1,1-1,3	2,6-3,5	0,34	0,68

Таблиця 2.2 – Режими роботи установки моделі «ЕІЛ-9»

Номер режиму	Ємність накопичувальних батарей, C , мкФ	Напруга холостого ходу, $U_{x,x}$, В	Енергія розряду, W_p , Дж
1	1200	58	1,41
2	2400	58	2,83
3	1200	90	3,4
4	2400	90	6,8

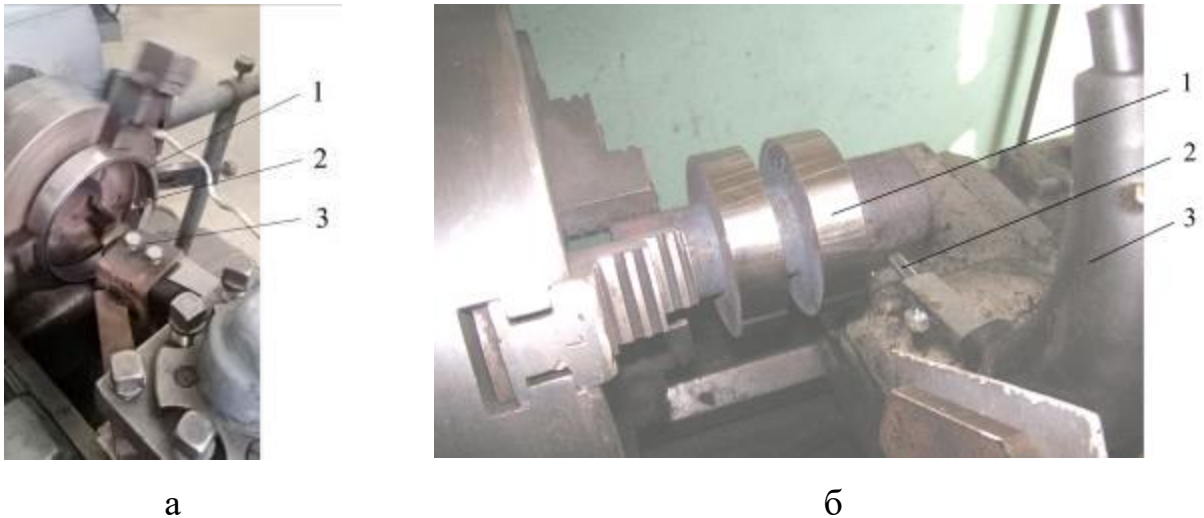
Таблиця 2.3 – Режими роботи установки моделі «Елітрон 52-А»

Тип генератору	Номер режиму	Ємність, С, мкФ	Напруження, U, В	Енергія розряду, W_p , Дж
Транзисторно-теристорний (ТТ)	1	120	35	0,05
	2		75	0,20
	3		100	0,36
	4	300	35	0,11
	5		75	0,60
	6		100	0,90
	7	1560	35	0,60
	8		75	2,6
	9		100	4,60
RC	10	480	80	0,90
	11		95	1,30
	12		110	1,70
Суміщення ТТ+RC	13	120+480	80+100	1,3
	14	300+480	95+100	2,2
	15	1560+480	110+100	6,8

Зміцнення проводилося на токарно-гвинторізному верстаті мод. 16К20. Вібратор кріпився в резцетрімачі (рис. 2.8). Підведення електрода здійснювалося механізмами верстата. Вибір режимів зміцнення (частота обертання шпинделя, подача) проводився, виходячи із заданої продуктивності процесу.

Живлення установки здійснювалося від мережі змінного струму напругою $220В \pm 10\%$. При частоті 50 Гц із обов'язковим заземленням.

ЕІЛ здійснювалося на зразках типу тіл обертання з обробкою внутрішніх та зовнішніх поверхонь (рис. 2.8).



а – обробка внутрішньої поверхні зразка; б – обробка зовнішньої поверхні зразка; 1 – зразок; 2 – електрод; 3 – вібратор

Рисунок 2.8 – Схема зміцнення поверхні в автоматизованому режимі

2.3. Обґрунтування вибору досліджуваних матеріалів

Деталі ДО виготовляються із різних класів сталей. Вали, шестерні – з низьковуглецевих, що піддаються цементації (сталь 20, 18ХГТ тощо), поліпшуваних (сталь 40, 45, 40Х, 38Х2МЮА тощо), робочі колеса, лопатки, диски насосів, муфти, ущільнюючі кільця тощо, що працюють в екстремальних умовах (агресивні середовища, підвищені температури, зношування тощо) виготовляють із спеціальних сталей, типу 30Х13, 12Х18Н10Т, що є високолегованими, відповідно, мартенситного та аустенітного класу. Хімічний склад матеріалів катода, їх фізико-механічні властивості подані у табл. 2.4 та 2.5 відповідно.

При формуванні методом ЕІЛ покриттів використовували електроди із алюмінію (при алітуванні) і молібдену (при формуванні молібденвмісних покриттів), також графіту. Електроди виготовлялись із дроту або смуги. Фізико-механічні властивості матеріалів, що застосовуються при ЕІЛ в якості анода подані у табл. 2.6.

Кращі результати процесу легування досягаються з використанням електрода з вершиною у вигляді усіченого конуса. Цей електрод повинен мати верхній діаметр 2,5-3,0 мм, нижній – 1,5-2,0 мм і довжину не менш 20 мм.

Таблиця 2.4 – Хімічний склад матеріалів катода

Марка сплаву	Хімічний склад, %								
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Інші елементи
Сталь 20 (ГОСТ 1050-88)	0,17 – 0,24	0,17 – 0,37	0,35 – 0,65	до 0,3	до 0,04	до 0,035	до 0,25	до 0,3	As до 0,08
Сталь 40 (ГОСТ 1050-88)	0,37 - 0,45	0,17 - 0,37	0,5 - 0,8	до 0,25	до 0,035	до 0,035	до 0,25	до 0,3	As до 0,08
40X (ДСТУ 7806:2015)	0,36 - 0,44	0,17 - 0,37	0,5 - 0,8	до 0,3	до 0,035	до 0,035	0,8 - 1,1	до 0,3	
38X2МЮА (ДСТУ 7806:2015)	0,35 – 0,42	0,2 – 0,45	0,3 – 0,6	до 0,3	до 0,025	до 0,025	1,35 – 1,65	до 0,3	Mo 0,15 – 0,25; Al 0,7 – 1,1
30X13 (ГОСТ 5632-72)	0,26 - 0,35	до 0,8	до 0,8	до 0,6	до 0,025	до 0,03	12 - 14	до 0,3	Ti до 0,2
12X18Н10Т (ГОСТ 5632-72)	до 0,12	до 0,8	до 2	9 – 11	до 0,02	до 0,035	17 – 19	до 0,3	(5 C – 0,8) Ti, інше Fe

Таблиця 2.5 – Фізико-механічні властивості матеріалів, що застосовуються при ЕІЛ в якості катода (деталі)

Марка сплаву	Вид обробки	Мікроструктура*	Твердість
Сталь 20	Стан поставки	Ф + П	163 НВ
Сталь 40	Стан поставки	Ф + П	187 НВ
40X	Стан поставки	Ф + П	156-197 НВ
38X2МЮА	Повний відпал	Ф + П	229 НВ
30X13	Стан поставки	С	235-277 НВ
12X18Н10Т	Стан поставки	А	179 НВ

* Ф – ферит, П – перліт, А – аустеніт, С – сорбіт

Таблиця 2.6 – Фізико-механічні властивості матеріалів, що застосовуються при ЕІЛ в якості анода (легуючого електрода)

Марка матеріалу	Температура плавлення, °С	Твердість	Кристалічна ґратка	Теплопровідність, Вт / (м·К)	Коефіцієнт лінійного розширення, 10 ⁻⁶ , град ⁻¹
Твердий сплав ВК8	-	88,5 НРА	Гексагональна	5,0	5,1
Твердий сплав Т15К6	-	90,2 НРА	Гексагональна / кубічна	12,5	5,6
Графіт (С)	3747	3,06 НV	Гексагональна	268	27
Алюміній	660	300НВ	ГЦК	237	22,2
Молібден	2620	55 НРА	ОЦК	138	5

В таблиці 2.7 подані досліджувані склади СТС та електродних матеріалів для отримання функціональних покриттів методом ЕІЛ.

Таблиця 2.7 – Склад СТС та електродних матеріалів для отримання функціональних покриттів методом ЕІЛ [8, 9, 11, 14, 17, 18, 140, 149, 254-258, 260-268, 286-323]

Покриття	Склад СТС	Легуючий електрод (анод)	Матеріал катоду	Режими ЕІЛ, W _p , Дж	Установка ЕІЛ
1	2	3	4	5	6
Al	Порошок Al-пудри	Al	сталі 20 і 40	0,52-6,8	«Елітрон-52А»
С	Графіт + вазелін	Графіт	20, 40Х		
S	сірчана мазь з додаванням колодної сірки	Сталь	сталі 20, чавун ВЧ60	0,55-1,7	«ЕІЛ-9»
S-C	сірчана мазь з додаванням колодної сірки	Графіт	сталі 20 і 40	0,13-3,4	«Елітрон-52А»

Продовження таблиці 2.7

1	2	3	4	5	6
S+Al	сірчана мазь з додаванням колодної сірки + 56% алюмінієвої пудри	Al	сталі 20 і 40	0,13-3,4	«Елітрон-52А»
Al+C+S	сірчана мазь з додаванням колодної сірки + 56% за масою алюмінієвої пудри	Графіт	сталі 20 і 40, 38Х2МЮА	0,13-6,8	
Al+C+B	вазелін, алюмінієва пудра 56% за масою, порошок аморфного бору 5% за масою	Графіт	сталі 20 і 40	0,13-4,9	
Mo+S	сірчана мазь з додаванням колодної сірки	Mo	сталі 20 і 40	0,13 - 3,4	
N	45% сечовини + 45% жовтої кров'яної солі + 10% вазеліну	Сталь	сталі 20 і 40	0,13-3,4	
N+C		Графіт			

2.4. Методика формування однокомпонентних поверхневих шарів, отриманих методом електроіскрового легування, із застосуванням СТС

Алітування (патенти на корисну модель №119316 UA та 119707 UA, ДОДАТОК Б.1)

В якості основи використовували зразки зі сталей 20 і 40 розміром 15x15x8 мм, на які наносили алюмінієві покриття методом ЕІЛ на установці з ручним вібратором моделі «Елітрон-52А». В якості електрода використовували стрижні діаметром 4 мм і довжиною 45 мм з алюмінієвого дроту марки СВА99 (ГОСТ 7871-75). Легування здійснювалося на різних режимах, кожному з яких відповідає своя енергія розряду і продуктивність – площа сформованого покриття в одиницю часу (табл. 2.8).

Таблиця 2.8 – Залежність продуктивності ЕІЛ від енергії розряду

Енергія розряду (W_p), Дж	0,52	1,3	2,6	4,6	6,8
Продуктивність, $\text{см}^2 / \text{хв}$	1,0-1,3	1,3-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0

Слід зазначити, що при зниженні продуктивності ЕІЛ відбувається погіршення якісних параметрів поверхневого шару (з'являються прижоги, а головне руйнування сформованого шару), що особливо позначається на більш «грубих» режимах при енергії розряду (W_p) > 1 Дж. У свою чергу, збільшення продуктивності призводить до зниження суцільності покриття.

Цементация (патенти на корисну модель №141992 UA та 142822 UA, ДОДАТОК Б.2)

Цементация методом ЕІЛ (ЦЕІЛ) виконувалася на установці з ручним вібратором моделі «Елітрон-52А», що забезпечує енергію розряду в діапазоні 0,1-6,8 Дж.

Для досліджень використовували зразки зі сталі 20, 40Х розміром 15x15x8 мм після шліфування ($R_a = 0,5$ мкм).

Для досліджень використовували дві серії зразків.

У першій серії зразки обробляли за традиційною технологією – на одному режимі і з однаковою продуктивністю при ЦЕІЛ компактним електродом-інструментом.

У другій серії зразки обробляли поетапно:

– на першому етапі здійснювали ЦЕІЛ поверхні зразка компактним електродом-інструментом, відповідно до обраної енергії розряду і з продуктивністю $1 \text{ см}^2 / \text{хв}$;

– на другому етапі на сформовану на першому етапі поверхню деталі наносили СТС, що складалося з порошку графіту і вазеліну, у співвідношенні 4:1. При збільшенні вмісту порошку графіту знижується його змочування вазеліном (прилипання) і утримування його на поверхні зразка;

– на третьому етапі, не чекаючи висихання СТС, проводили ЦЕІЛ компактним електродом-інструментом, сформованої на другому етапі поверхні, причому на тому ж режимі і з такою ж продуктивністю, як на першому етапі.

При ЦЕІЛ зразків використовували графітові електроди марки ЕГ-4 ОСТ 229-83. Процес ЦЕІЛ проводили при різних енергіях розряду з продуктивністю $1 \text{ см}^2 / \text{хв}$.

Сульфидування (патенти на корисну модель №115059 UA, 117528 UA та 119317 UA, ДОДАТОК Б.3)

При здійсненні способу, на заготовку електрода у вигляді дроту, прутка і т.п., наносили заглиблення будь-яким відомим способом (накернюванням, протягуванням через філь'єру, нанесенням різьби і т.п.).

На рис. 2.9 показані електроди з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т $\varnothing 3$ мм, на які нанесена різьба. Ці електроди призначені для сульфидування поверхонь деталей методом ЕЕЛ на механізованій установці моделі «ЕІЛ-9». У заглиблення різьби вносили СТС, у вигляді рідкої пасти (наприклад, у вигляді сірчаної мазі), із вмістом сірки 33,3%. Кількість сірки можна збільшити за рахунок її додавання в мазь, наприклад, у вигляді колоїдної сірки. Після видалення надлишків і, не чекаючи висихання мазі на електродах, здійснювали ЕІЛ заданих поверхонь деталей.

Для насичення сіркою поверхні зразка зі сталі 20 розміром 15x15x8 наносили покриття методом ЕІЛ спеціальним електродом-інструментом з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т на установці моделі «Елітрон-22А» з енергією розряду $W_p = 0,55$ Дж.

Електрод-інструмент довжиною 30-35 мм виготовляли з дроту $\varnothing 3$ мм зі сталі 12Х18Н10Т шляхом нарізування різьби М3 на довжину 25 мм. Заглиблення, отримані на поверхні електрода, заповнювали СТС – сірчаною маззю, концентрація сірки в якій становила 33,3%. Надлишки СТС видаляли серветкою.



Рисунок 2.9 – Електроди з нанесеним СТС – консистентною речовиною у вигляді сірчаної мазі з додаванням колодної сірки

Азотування і нітроцементация (патенти України на корисну модель, номери заявок u202005096 і u202005065, ДОДАТКИ Б.4 та Б.5)

Для забезпечення процесів азотування і нітроцементации використовували установку ЕІЛ моделі «Елітрон-52А» при енергії розряду $W_p = 0,13; 0,52$ і $3,4$ Дж.

Для насичення поверхні азотом використовували СТС, що складалось з 45% сечовини і 45% жовтої кров'яної солі, з додаванням вазеліну (10%).

СТС у вигляді пасти наносили на поверхню зразків стали 20 і 40, розміром $15 \times 15 \times 8$ мм і, не чекаючи висихання, проводили обробку методом ЕІЛ. Для здійснення процесу азотування використовували електрод-інструмент у вигляді дроту $\varnothing 2,0 \times 25$ мм ГОСТ 5663-79, а для нітроцементации (карбонітрації) електрод-інструмент у вигляді графітового стержня марки ЕГ-4 і розміром $3 \times 3 \times 25$ мм.

2.5. Методика формування багатокомпонентних поверхневих шарів, отриманих методом електроіскрового легування із застосуванням СТС

Сульфоцементация (патенти на винахід №2663799 RU, на корисну модель № 117867 UA, 119318 UA, ДОДАТОК Б.6)

Безпосередньо перед легуванням графітовим електродом на поверхню сталеві деталі наносили СТС – консистентна речовина, що містить сірку. Як консистентну речовину застосовували сірчану пасту і/або сірчану мазь. Кількість сірки в консистентній речовині збільшували додаванням до неї колоїдної сірки. ЕІЛ проводили на установці моделі «Елітрон -22А» при енергії розряду $W_p=0,13-3,4$ Дж. Нанесення безпосередньо перед легуванням графітовим електродом на поверхню сталеві деталі СТС (консистентної речовини, що містить сірку – сірчану пасту і/або сірчану мазь з можливим додаванням колоїдної сірки), дозволяє отримати сталеві деталі з підвищеним притиранням і високою зносостійкістю.

Сульфолітування (патенти на винахід №121343 UA та 2696616 RU, корисну модель №130157 UA, ДОДАТОК Б.7)

Для дослідження виготовляли зразки зі сталі 20 і 40 розміром 15x15x8 мм на які наносили СТС (консистентну речовину у вигляді сірчаної мазі, з вмістом сірки 33,3%). Перед нанесенням до СТС додавали алюмінієву пудру марки ПАД-0 (ГОСТ 5494-95). Максимальна кількість пудри складала 56%. Подальше збільшення кількості пудри призводило до зниження адгезії з поверхнею, що підлягає алітуванню.

Після цього, не чекаючи висихання СТС, виконували ЕІЛ алюмінієвим електродом на установці моделі «Елітрон-52А» з використанням різних режимів. Причому, кожному режиму ЕІЛ відповідає своя енергія розряду і продуктивність – площа сформованого покриття в одиницю часу (табл. 2.8).

Як електрод-інструмент використовували стрижні $\varnothing 4$ і довжиною 45 мм з алюмінієвого дроту марки СвА99 (ГОСТ 7871-75).

Al+C+S – покриття (патенти на винахід № 121346 UA и 2707776 RU, корисну модель №130866 UA, ДОДАТОК Б.8)

Для дослідження виготовляли зразки зі сталі 20 і 40 розміром 15 × 15 × 8 мм, на які наносили СТС складу: сірчана мазь з вмістом сірки 33,3 % і 56%

алюмінієвої пудри марки ПАД-0 (ГОСТ 5494-95). Подальше збільшення кількості пудри призводило до зниження адгезії з оброблюваною поверхнею. Після цього, не чекаючи висихання консистентної речовини, виконували процес ЕІЛ графітовим електродом на установці моделі "Елітрон-52А" із застосуванням різних режимів. Причому, кожному режиму ЕІЛ відповідала своя енергія розряду і продуктивність – площа сформованого покриття в одиницю часу (табл. 2.8).

Слід зазначити, що зниження продуктивності ЕЕЛ тягне за собою зниження якісних параметрів поверхневого шару, тобто, появу припалів, а головне, руйнування сформованого шару, що особливо позначається на більш "жорстких" режимах при енергії розряду $W_p > 1$ Дж.

Збільшення продуктивності призводить до зниження суцільності покриття. Для вивчення впливу вуглецю на властивості покриття, що формується, легування консистентної речовини описаного вище складу проводили електродом з графіту марки ЭГ-4.

Al+C+B – покриття

Для дослідження використовували зразки зі сталі 20 і 40 (ГОСТ 1050-88) розміром 15x15x8 мм, на які наносили СТС (вазелін, алюмінієва пудра марки ПАД-0 (ГОСТ 5494-95) 56% за масою, порошок аморфного бору близько 5% за масою). Не чекаючи висихання СТС, здійснювали ЕІЛ поверхонь зразків графітовим електродом марки ЕГ-4 ОСТ 229-83 на установці моделі «Елітрон-52А» з енергією розряду: 0,13, 0,55 і 4,9 Дж.

Mo+S – покриття (патент України на корисну модель №144932 UA, ДОДАТОК Б.9)

Для дослідження використовували зразки зі сталі 20 і 40 (ГОСТ 1050-88) розміром 15x15x8 мм, на які наносили СТС (сірчана мазь з додаванням колодної сірки). Не чекаючи висихання СТС, здійснювали ЕІЛ електродом інструментом з молібдену при енергії розряду $W_p = 0,13 - 3,4$ Дж і продуктивності 0,8 -

2,5см²/хв. на установці моделі «Елітрон-22А». Як електрод-інструмент застосовують стрижень з молібдену діаметром 4 мм і довжиною 45 мм.

Комбіновані С-Al-T15К6 покриття (патент на корисну модель №142338 UA, ДОДАТОК Б.10)

З метою отримання комбінованих покриттів на сталі 12Х18Н10Т легування здійснювали в такій послідовності:

- ЦЕІЛ при $W_p = 3,4$ Дж з наступним алітуванням алюмінієвим електродом марки СвА99 при $W_p = 3,4$ Дж;
- ЦЕІЛ при $W_p = 3,4$ Дж з наступним ЕІЛ твердим сплавом Т15К6 при $W_p = 3,4$ Дж;
- ЦЕІЛ при $W_p = 3,4$ Дж з наступним алітуванням алюмінієвим електродом марки СвА99 при $W_p = 3,4$ Дж і ЕІЛ твердим сплавом Т15К6 при $W_p = 3,4$ Дж.

ЦЕІЛ проводили на зразках зі сталі 12Х18Н10Т розміром 10х10х8 на установці з ручним вібратором «Елітрон-52А». Тривалість процесу легування становила 1,0 хв.

Значне збільшення енергії розряду з $W_p = 3,4$ до 6,8 Дж не призводить до істотного збільшення товщини і мікротвердості цементованого шару, хоча шорсткість поверхні істотно зростає. Тому зразки зі сталі 12Х18Н10Т піддавали ЦЕІЛ при $W_p = 3,4$ Дж.

Як електрод для проведення ЦЕІЛ використовували графіт марки ЕГ-4.

2.6. Методика визначення шорсткості поверхні

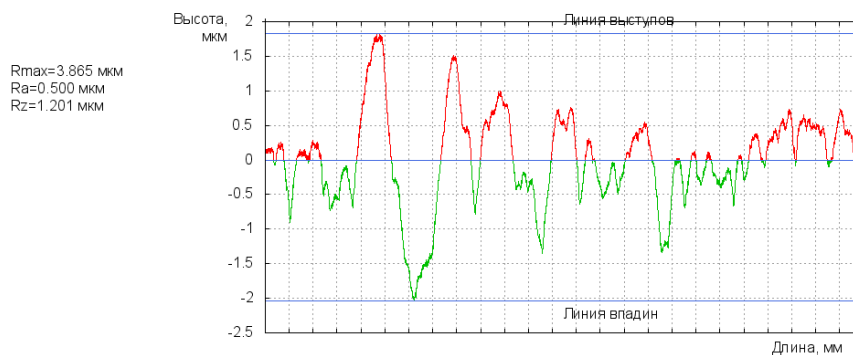
На всіх етапах обробки визначалась шорсткість поверхні на приладі профілограф - профілометр мод. 201 заводу «Калібр» (рис. 2.5, а). При цьому результати через спеціальний пристрій видавалися на монітор комп'ютера у вигляді графіків (рис. 2.5, б).

2.7. Проведення металографічних, дюрOMETричних досліджень зміненого поверхневого шару

Дослідження макро- та мікроструктурних параметрів електродних матеріалів, проводили з використанням: оптичних мікроскопів «МИМ-7», «Неофот-2», растрового електронного мікроскопа РЕММ-102, скандувального електронного мікроскопа Jeol JSM-5400, оснащеного мікроаналізатором ISIS 300 Oxford instruments, скандувального електронного мікроскопа SEO-SEM Inspect S50-B, оснащеного енергодисперсійним спектрометром AZtecOne з детектором X-MaxN20 (виробник Oxford Instruments plc).



а



б

а – фото приладу; б – профілограма шорсткості вихідного зразка

Рисунок 2.10 – Визначення шорсткості на приладі профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр»



Рисунок 2.11 – Фото скандувального електронного мікроскопа
SEO-SEM Inspect S50-B



Рисунок 2.12 – Фото зразків для металографічних досліджень

Для ідентифікації структурних складових методами металографії з матеріалів електродів після ЕІЛ виготовлялися шліфи в різних перетинах (поперечні, поздовжні, косі) в основному відносно поверхні обробки. З метою збільшення оптичного контрасту між різними структурними складовими,

вибіркового забарвлення проводилося хімічне травлення шліфів з використанням спеціальних реактивів. Виготовлення шліфів, підготовку поверхонь та металографічні дослідження проводили відповідно до відомих методик [324]. У якості реактиву для хімічного травлення сталей 20, 40, 38Х2МЮА, чавунів використали 3...5 %-й розчин азотної кислоти в етиловому спирті, для сталей 30Х13 та 12Х18Н10Т – реактив «царська горілка».

ДюрOMETричні дослідження складових шару проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 вдавлюванням алмазної піраміди під навантаженням 0,05 Н [325, 326]. Мікротвердість визначалася як середньоарифметичне значення вимірів діагоналей відбитків без видимих тріщин і сколів.

Суцільність покриття визначали з використанням методу L [327] за формулою:

$$S = \frac{b \sum a_i m_i}{l}$$

де b – ціна поділу окулярної шкали, мкм;

a_i – середні значення розмірів включень, мкм;

m_i – кількість включень даної групи;

l – довжина підрахунку, мкм.

Гранична похибка при визначенні суцільності методом L обчислюють за формулою:

$$\sigma_{пред} = \pm t \cdot \mu$$

де t – коефіцієнт довіри;

μ – середня похибка вибірки:

$$\mu = \frac{\sigma_b}{\sqrt{n-1}},$$

$$\sigma_b = \sqrt{\sigma_b^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}{n}}$$

де σ_b – середнє квадратичне відхилення;
 n – кількість елементів вибірки;
 \bar{x} – середнє арифметичне елементів вибірки.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{n},$$

P – задана вірогідність ($P = 0,9$), $t = t(P)$, $P = 2C(t) - 1$, где $C(t)$ – функція розподілу Стюдента:

$$C(t) = \frac{P+1}{2} = 0,975.$$

З табульованих значень при $n=10$ и $t=2,25$

$$P(\bar{x} - 2,25\mu \leq \bar{x} \leq \bar{x} + 2,25\mu) = 0,9.$$

Необхідно відмітити, що металографічні дослідження виконані у Науково-дослідній лабораторії прикладного матеріалознавства Сумського державного університету, що має свідоцтво про атестацію (Додаток В).

2.8. Дослідження фазового і хімічного складів поверхневих шарів

Рентгеноструктурний аналіз базується на тому, що кожна фаза має свою специфічну кристалічну ґратку з певними періодами, якій на дифрактограмі відповідає певний набір ліній. Провівши ідентифікацію ліній можна отримати точні дані по якісному та кількісному фазовому складу досліджуваного матеріалу. Інтенсивність ліній різноманітних фаз залежить від багатьох факторів, в тому ж числі і від кількості фази.

Рентгенографічні дослідження проводили в $\text{CuK}\alpha$ та $\text{CoK}\alpha$ випромінюванні на дифрактометрах ДРОН-3 та AXRD Benchtop (виробник Proto Manufacturing Inc., США). Дифрактограми знімали методом покрокового сканування. Крок сканування становив 0.05° , час експозиції у точці – 3с.

Як приклад, дифрактограма сталі 12Х18Н10Т до поверхневої обробки подана на рис. 2.14. Фазовий склад обраної сталі аустенітного класу представляє собою ГЦК твердий розчин з періодом ґратки $a = 35,936$ нм.



а

б

а – AXRD Benchtop; б – ДРОН-3

Рисунок 2.13 – Обладнання для проведення рентгенографічних досліджень

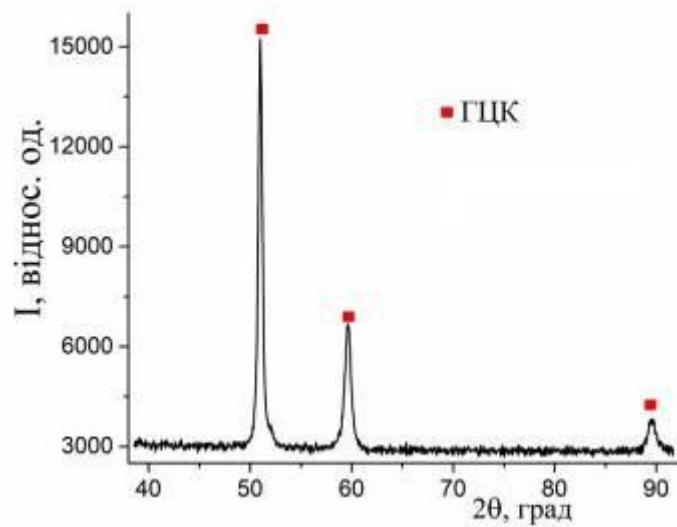


Рисунок 2.14 – Дифрактограма поверхні сталі 12Х18Н10Т

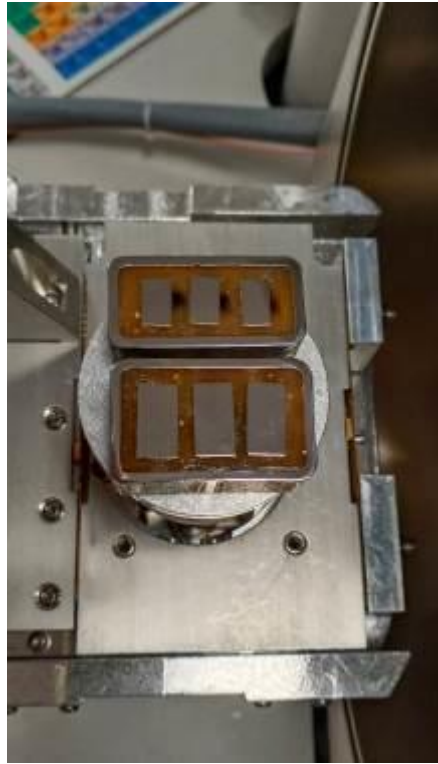


Рисунок 2.15 – Фото зразків для дослідження на мікроскопі SEO-SEM
Inspect S50-B

Обробку дифрактограм виконували за допомогою програми для повнопрофільного аналізу рентгенівських спектрів від суміші полікристалічних складових PowderCell 2.4. Суть обробки полягала в розрахунку дифракційного спектру по заданій моделі структури і заданій формі профілів дифракційних ліній. Потім параметри моделі уточнювалися шляхом порівняння інтенсивностей безпосередньо в кожній точці 2θ -простору дифрактограми, яке здійснюється варіюванням структурних параметрів моделі методом найменших квадратів.

З метою визначення елементного складу покриття проводився якісний і кількісний локальний аналіз. Для цього використовувалися мікроскопи: растровий мікроскоп РЕММ-102, оснащений приставкою з рентгенівським мікроаналізатором, скануючий електронний мікроскоп Jeol JSM-5400, оснащеного мікроаналізатором ISIS 300 Oxford instruments, скануючий

електронний мікроскоп SEO-SEM Inspect S50-B, оснащений енергодисперсійним спектрометром AZtecOne з детектором X-MaxN20 (виробник Oxford Instruments plc). В якості об'єктів для електронної мікроскопії використовувалися зразки, підготовлені за технологією для металографічних досліджень.

2.9. Випробування покриттів на жаростійкість

Як відомо, жаростійкість (або окалиностійкість) характеризує здатність металів та сплавів чинити опір окисленню і газовій корозії при підвищених температурах.

Випробування на жаростійкість металів і сплавів проводиться згідно до стандарту [328], який визначає методи дослідження жаростійкості в умовах впливу газових середовищ і повітря при високих температурах.

Жаростійкість визначалася після витримки зразків у печі протягом заданого часу при постійній температурі, ваговим методом по збільшенню маси зразків.

Ваговий метод по збільшенню маси зразка полягає у визначенні товщини шару металу, що піддався корозії в процесі випробування, по збільшенню маси зразка, яка визначається безпосередньо в процесі випробування.

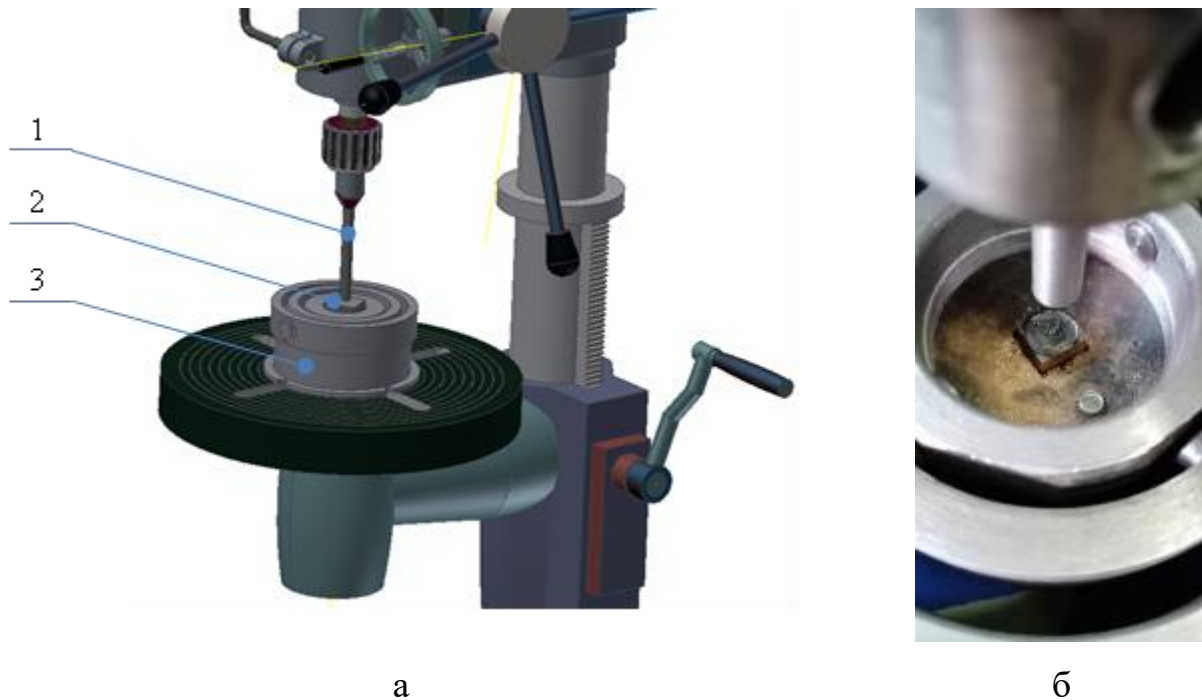
При випробуванні на жаростійкість необхідно забезпечити рівномірне омивання поверхні зразків газовим середовищем, зразки розміщувати в печі на жаростійких керамічних підставках або в керамічних тиглях; зразки повинні контактувати з підставкою або тиглем тільки в окремих точках [328].

Перед випробуванням зразки були просушені і зважені на аналітичних вагах з точністю до $\pm 0,1$ мг. Поверхня зразків знежирювалася. Також вимірювалася площа їх поверхні. Після цього зразки в тиглях з окису алюмінію поміщали в піч. Кожен зразок знаходився в окремому тиглі. Нагрівання зразків до температури 980°C проводилося в електричній печі опору (температура

контролювалася термопарою), витримка становила 50-100 годин. Жаростійкість сплаву визначали по збільшенню ваги зразка після кожних 3-7 годин витримки в печі, віднесеного до його площі поверхні. Збільшення маси зразка визначалося за різницею результатів зважування холодного зразка до і після витримки в печі [329].

2.10. Методика дослідження трибологічних властивостей

Для експрес оцінки величини лінійного зносу зразків з покриттям було виготовлено установку на базі свердлильного верстата мод. 2М-112 (рис. 2.16).



а – схема установки: 1 – порожній циліндр, 2 – прямокутний зразок, 3 – пристосування для самоустановлення зразка; б – фото установки при випробуванні зразка

Рисунок 2.16 – Визначення лінійного зносу зразків при торцевому терті

Зразки закріплювали у пристосуванні, розташованому на столі верстата, що забезпечувало їх самовстановлення. Контрзразком слугував порожнистий

циліндр (вуглеграфіт, $D_{зовн.} = 12$ мм; $d_{вн} = 4$ мм; $l = 60$ мм), що закріплювався в шпинделі верстата.

Дослідження зносостійкості зразків, після термооброблення і зміцнення різними способами, проводили на прямокутних зразках розміром 15x15x8 мм.

Лінійний знос визначався методом штучних баз по різниці глибин відбитків, нанесених на приладі Віккерса і виміряних до і після проведення випробувань.

Час випробування зразків на один кілометр шляху при 2500 об / хв шпинделя, яке встановлюється за допомогою реле часу, становило 16 хв. Випробування проводили протягом 320 хв при швидкості ковзання 1 м / с і питомому тиску 4,0 МПа. Величина зносу фіксувалася через кожні 64 хв.

2.11. Випробування на розтяг

Для дослідження впливу різних технологій ЕІЛ, згідно табл. 2.7, на механічні властивості (межі міцності і текучості, відносне подовження і звуження) були виготовлені зразки зі сталі 20, 40, 40Х, 38Х2МЮА, 12Х18Н10Т, 30Х13, згідно стандарту [330] (рис. 2.17). Після ЕІЛ поверхню обробляли методом БУФО. На кожен метод зміцнення виготовляли по 3 зразка.



Рисунок 2.17 – Зразок зі сталі 40Х до (а) і після (б) випробування на розрив

2.12. Висновки до розділу

1. Запропонований підхід до розробки методології створення і зміцнення робочих поверхонь деталей машин ДО методом ЕІЛ. Показана

важлива роль вихідних матеріалів, СТС, матеріалу анода у взаємозв'язку з матеріалом катода в процесі створення методології функціональних покриттів методом ЕІЛ.

2. Обране основне устаткування для проведення ЕІЛ – це «ЕІЛ-8А», «ЕІЛ-9» і «Елітрон-52А» в діапазоні енергій розряду від 0,04 до 6,8 Дж. Зміцнення проводилося на механізованому устаткуванні на базі токарно-гвинторізного верстату мод. 16К20. ЕІЛ здійснювалося на зразках типу тіл обертання з обробкою внутрішніх та зовнішніх поверхонь

3. Наведено відомості про матеріали, що були використані в роботі. Експериментальні дослідження проводилися на зразках із сталей марок сталь 20, 40, 40Х, 38Х2МЮА, 30Х13, 12Х18Н10Т, з яких виготовляється більшість деталей ДО (вали, шестерні робочі колеса, лопатки, диски насосів, муфти, ущільнюючі кільця тощо)

4. Деталі ДО виготовляються із різних класів сталей. Вали, шестерні – з низьковуглецевих, що піддаються цементації (сталь 20, 18ХГТ тощо), поліпшуваних (сталь 40, 45, 40Х, 38Х2МЮА тощо), робочі колеса, лопатки, диски насосів, муфти, ущільнюючі кільця тощо, що працюють в екстремальних умовах (агресивні середовища, підвищені температури, зношування тощо) виготовляють із спеціальних сталей, типу 30Х13, 12Х18Н10Т, що є високолегованими, відповідно, мартенситного та аустенітного класу.

5. Запропонований склад вихідних матеріалів (СТС та електродних матеріалів) та розроблені технології отримання функціональних покриттів методом ЕІЛ – однокомпонентних (алітування, цементація, сульфідкування, азотування) та багатокомпонентних (нітроцементація, сульфоцементація, сульфоалітування, Al+C+S, Al+C+V, Mo+S – покриття, комбіновані С-Al-T15К6 покриття).

6. Для вирішення поставлених завдань використовувалися сучасні методи випробувань і досліджень, в тому числі:

- шорсткість поверхні зразків досліджували на приладі профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр»;
 - топографію ділянок поверхні зразків після ЕІЛ вивчали за допомогою растрового електронного мікроскопу РЕММ-102;
 - металографічні дослідження (мікроструктуру, будову покриття, товщину шарів, суцільність) проводили за допомогою оптичних мікроскопів «МІМ-7», «Неофот-2», растрового електронного мікроскопа РЕММ-102, скандувального електронного мікроскопа Jeol JSM-5400, оснащеного мікроаналізатором ISIS 300 Oxford instruments, скандувального електронного мікроскопа SEO-SEM Inspect S50-B, оснащеного енергодисперсійним спектрометром AZtecOne з детектором X-MaxN20 (виробник Oxford Instruments plc), за допомогою яких також проводили локальний мікрорентгеноспектральний аналіз покриттів;
 - рентгенографічні дослідження проводили на дифрактометрах ДРОН-3 та AXRD Benchtop (виробник Proto Manufacturing Inc., США);
 - випробування на жаростійкість металів і сплавів проводиться згідно до ГОСТ 6130-71, нагрівання зразків до температури 980°C проводилося в електричній печі опору, витримка становила 50-100 годин.
 - для експрес оцінки величини лінійного зносу зразків з покриттям було виготовлено установку на базі свердлильного верстата, особливість якої полягає в тому, що зразки закріплювали у пристосуванні, розташованому на столі верстата, що забезпечувало їх самовстановлення;
 - випробування на розтяг проводили згідно ГОСТ 7855-84.
7. За матеріалами розділу опубліковані наступні роботи [8, 9, 11, 14, 17, 18, 140, 149, 254-258, 260-268, 286-323].

РОЗДІЛ 3

ТЕРМОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ПРИ ЕЛЕКТРОІСКРОВОМУ ЛЕГУВАННІ

3.1. Математична модель прогнозування якості поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ

Відомо [165], що високий адгезійний зв'язок покриттів, отриманих методом ЕІЛ, з основою пояснюється як інтенсивним перемішуванням матеріалів електродів у рідкій фазі, так і дифузією матеріалу анода в катод у твердій фазі. Підтвердженням проходження дифузійних процесів є наявність дифузійної зони між білим шаром і основою. Ця зона не нагрівається вище температури солідусу і не взаємодіє безпосередньо з навколишнім середовищем. Тому причиною її утворення може бути термічний вплив імпульсного розряду і дифузійне проникнення елементів анода і катода.

Механізм формування поверхневого шару катода розглянутий у роботах основоположників методу Б.Р. Лазаренко і Н.Й. Лазаренко [13, 119, 146]. Відповідно до запропонованої моделі після впливу електричного розряду продукти ерозії анода летять у розплавленому стані до поверхні катода і прагнуть до підкладки. Під час контакту проходить другий імпульс, при якому частинки сплавляються між собою. Механічний удар анода «проковує» покриття, що підвищує його міцнісні властивості. Кількість перенесеного матеріалу пропорційна загальній кількості розрядів і енергії в імпульсі. Пропонується і інший механізм формування поверхневого шару [113, 237]. Вплив іскрового розряду розплавляє ділянку поверхні катода. У цю зону надходить речовина анода, яка починає або дифундувати, або перемішуватися з матеріалом основи.

Авторами робіт [12, 119, 238] досліджувалися структурні перетворення в поверхневих шарах різних металів. Встановлено, що формування поверхневого

шару залежить від способу перенесення речовини. Виділено наступні види взаємодії і перенесення матеріалів електродів: утворення покриття на катоді з речовини анода, утворення сплавів (сумішей, твердих розчинів або інтерметалідів) в поверхневому шарі катода в результаті взаємної дифузії елементів, відсутність перенесення матеріалу анода на катод.

Процес дифузійного поверхневого насичення зазвичай представляють у вигляді декількох стадій, кількість яких залежить від ступеня деталізації аналізу. Наприклад, в роботі [33] процес представлений у вигляді п'яти стадій, що реалізуються послідовно:

1. Хімічні реакції в насичувальному середовищі з утворенням речовин, що виконують масоперенесення легуючого елемента.
2. Дифузія легуючого елемента в насичувальному середовищі і його підведення до поверхні матеріалу, що піддається насичуванню.
3. Хімічні реакції під час насичення на межі поділу фаз: поверхня – насичувальне середовище).
4. Дифузія легуючого елемента в матеріал, що насичується.
5. Хімічні реакції в матеріалі, що піддається насиченню, в результаті яких в дифузійному шарі утворюються тверді розчини або хімічні сполуки.

Основою механізму насичення і проникнення атомів насичувальних елементів в поверхневий шар оброблюваного металу є дифузійні процеси. Механізм дифузії складається в переміщенні атомів між різними рівноважними положеннями в кристалічній ґратці, при цьому макроскопічне переміщення дифундувальної речовини являє собою результат великої кількості невеликих переміщень окремих атомів [239]. Перебіг дифузійних процесів призводить до зміни хімічного складу і структури поверхневого шару металу з утворенням дифузійного шару, що складається з однієї або декількох фаз.

При дифузійному насиченні протікає як об'ємна дифузія (в об'ємі кожного зерна), так і дифузія по межах зерен, яка протікає з набагато більшою

швидкістю порівняно з об'ємною. Це пояснюється тим, що висококутові межі характеризуються підвищеною концентрацією вакансій і порушень періодичності розташувань атомів, що збільшує ймовірність атомних переходів і зменшує енергію активації дифузії.

Відомо, що на інтенсивність дифузійних процесів впливають швидкості процесів: дисоціації молекул насичувальної речовини з утворенням активних атомів (іонів), доставки активних атомів (іонів) до поверхні виробу, їх адсорбції на поверхні і, нарешті, дифузії активних атомів у твердому металі. Оскільки дифузія у твердій фазі є лімітуючою стадією процесу насичення, то більшість відомих спроб інтенсифікації процесу насичення зводяться до пошуку способів прискорення дифузії [240]. Вивчені способи інтенсифікації дифузійних процесів у твердій фазі при використанні лазерного випромінювання, плазми, ультразвуку, магнітного поля, застосуванні активаторів, східчастих і газоциклічних процесів [57, 60, 241-246]. У роботі [247] показано, що основними параметрами, які регулюють ріст шару в умовах електроіскрового розряду, є щільність електричного струму і температура підігріву реакційного муфеля. Підвищення поверхневої твердості оброблюваних зразків залежить від тривалості процесу.

Для математичного опису процесу дифузії в кристалічному тілі справедливий другий закон Фіка [33, 248, 249], який пов'язує концентрацію C дифундувальної речовини з глибиною дифузійного шару x і тривалістю дифузії t :

$$\frac{dC}{dt} = \frac{d}{dx} \left(D \frac{dC}{dx} \right), \quad (3.1)$$

де D – коефіцієнт дифузії.

Якщо коефіцієнт дифузії не залежить від концентрації, то другий закон Фіка записується наступним чином:

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (3.2)$$

де $C = C(x, t)$ є функцією глибини дифузії x і тривалості дифузії t .

Для розв'язання даного рівняння встановлюють граничні умови, які визначаються особливостями процесу дифузії.

Зазвичай у розрахунках застосовують граничні умови першого роду, які мають такий вигляд:

$$C(0, t) = C_0.$$

Це означає, що концентрація C_0 легуючого елемента на поверхні виробу за дуже короткий час стає рівною концентрації, що рівноважна з навколишнім середовищем. При цьому вважають, що процес насичення повністю лімітується стадією дифузії.

Зазвичай розрізняють наступні варіанти запису граничних умов і відповідні їм розв'язання [33, 239, 250].

1. Дифундувальна речовина надходить з постійного джерела в напівнескінчене тіло. Поверхнева концентрація дифузанта C_0 залишається постійною. Граничні умови записують наступним чином:

$$C(x, t) = C_0 \quad \text{при } x=0 \text{ для всіх } t;$$

$$C(x, t) = 0 \quad \text{при } x>0 \text{ і } t=0;$$

$$C(x, t) = C \quad \text{при } x>0 \text{ і } t > 0.$$

Тоді розв'язання рівняння (3.2) має вигляд [251]:

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right),$$

де $\operatorname{erf}(z)$ – функція помилок Гауса.

З цього виразу випливає, що розподіл концентрації дифузанта визначається трьома величинами: поверхневою концентрацією C_0 , коефіцієнтом дифузії D і тривалістю дифузії t .

2. Дифундувальна речовина надходить з непостійного джерела – тонкого шару завтовшки h , розташованого на поверхні $x = 0$ напівнескінченного тіла. Основною відмінністю від першого типу є виснаження джерела в процесі дифузії. Граничні умови записують наступним чином:

$$C(x,0) = C_0 \quad \text{при } 0 \leq x \leq h;$$

$$C(x,0) = 0 \quad \text{при } h \leq x \leq \infty.$$

Розв'язання рівняння (3.2) при цих умовах має вигляд [252]:

$$C(x,t) = \frac{Q_0}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right),$$

де Q_0 – початкова кількість речовини в шарі, віднесене до одиниці його площі, тобто $Q_0 = C_0 \cdot h$.

Основним параметром, що характеризує кінетику дифузійного насичення, є коефіцієнт дифузії, який залежить від температури, а також від природи, як основного матеріалу, так і дифундувальної речовини. Коефіцієнт дифузії зазвичай визначається з експериментального розподілу концентрації дифундувального елемента по товщині шару в функції часу $C(x,t)$. Подальша обробка отриманих кривих проводиться відповідно до розрахункових методів, викладених у роботах [239, 250].

Коефіцієнт дифузії є характеристикою, чутливою до температури (T). Коефіцієнт дифузії D підпорядковується рівнянню Арреніуса [239]:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right), \quad (3.3)$$

де E_A – енергія активації дифузійного процесу; R – універсальна газова постійна;

T – температура.

Така залежність коефіцієнта дифузії від температури експериментально підтверджується для багатьох систем з високим значенням D : для дифузії в сплавах проникнення (наприклад, вуглець у α -Fe) і заміщення (наприклад, золото в сріблі). Експоненціальна залежність D від температури є виразом того, що дифузія відбувається внаслідок термічно активованого руху атомів, який завжди описується експонентою $\exp\left(-\frac{q}{kT}\right)$: де q – енергія активації елементарного акту переміщення атома. У загальному випадку вона буде істотно відрізнятися для хімічних елементів і кристалічних структур. Енергію активації можна оцінити за нахилом лінії, яка описує залежність в координатах $\ln D$ від зворотної температури T^{-1} .

Дослідження дифузійних процесів при електроіскровому легуванні показали, що глибина проникнення елементів анода в катод, при масоперенесенні в твердій фазі, може становити від декількох до ста мікрметрів і більше, що неодноразово підтверджувалося металографічними і мікрорентгеноспектральними дослідженнями, а також методом радіоактивних ізотопів [12].

Характер взаємного розподілу елементів у поверхневих шарах, отриманих ЕІЛ, свідчить про високу рухливості атомів у кристалічній ґратці металів, підданих впливу іскрових розрядів. Висока рухливість атомів в кристалічній ґратці металів, підданих впливу імпульсних розрядів, зв'язується з істотним внеском у перенесення речовини міжвузлових атомів, що генеруються в

екстремальних умовах. Однією з причин високої рухливості атомів у твердій фазі може також бути локальна деформація кристалічної ґратці під впливом високих градієнтів температури і ударних хвиль, які можуть бути причиною перенесення елементів на значну глибину в твердій фазі.

В результаті ЕІЛ відбувається опромінення, нагрівання поверхневого шару тіла і його пластична деформація, що спотворюють ґратки за рахунок утворення точкових (вакантних вузлів і атомів проникнення), лінійних і поверхневих дефектів. У правильних бездефектних структурах атоми розташовуються в ґратці, утворюючи систему з мінімальною вільною енергією. Зсув атомів із рівноважного положення порушує порядок в ґратці. Для отримання таких порушень витрачається енергія, яка запасається в утворених дефектах. Величина повної енергії системи буде більшою за мінімальну, характерною для впорядкованої системи атомів, на величину збереженої енергії, яка визначається числом дефектів в ґратці, їх видом і є своєрідною мірою дефектності ґратки.

На перехід атома з вузла ґратки в сусідній або міжвузля потрібно затратити енергію, яку називають енергією активації процесу переходу атомів. В результаті одночасного переміщення в тілі великого числа вакансій і утворення атомів проникнення відбувається зниження внутрішнього тертя полегшення дифузії в матеріалі. Таким чином, під час ЕІЛ відбувається взаємодія потоків частинок з речовиною (опромінення тіла). Наявність цієї взаємодії є необхідною умовою для передачі енергії з потоку тілу. Величина поглиненої енергії визначає ефективність ЕІЛ. Якщо взаємодія, а, отже, і поглинена енергія малі, то і зміна властивостей тіла, тобто технологічний ефект, буде також незначним.

Шар, сформований на катоді, по глибині можна розділити на дві зони: зона, в якій відбувається перемішування рідких фаз матеріалів електродів («білий шар»), і зона, що лежить нижче зони перемішування, в якій елементи

матеріалу анода переносяться в твердій фазі (дифузійна зона). Розподіл хімічних елементів електродів в кожній з цих зон визначається фізичними процесами, що відрізняються за своєю природою, але є залежними від кількості введеної в тіло енергії – від енергії розряду.

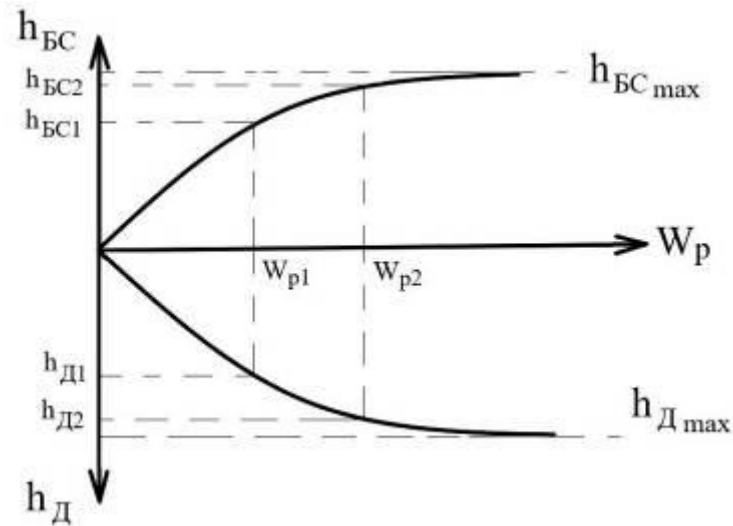
Як показано в розділі 1, при ЕІЛ металевих поверхонь, залежно від природи анода, можливе формування двох типів структур. У першому випадку, ЕІЛ супроводжується масоперенесенням матеріалу анода в поверхню підкладки. При цьому, структура отриманих покриттів буде складатися з як мінімум трьох ділянок: «білий шар», дифузійна зона і основний метал [253-256]. Можливе утворення підшарів між «білим шаром» і дифузійної зони. Подібні структури отримували багато дослідників на сталях, кольорових металах. Особливістю даного процесу є те, що в якості матеріалу анода застосовувалися метали і сплави [12, 113, 119].

При використанні графіту в якості анода при ЕІЛ масоперенесення не відбувається [142, 149]. В цьому випадку змінений шар формується в результаті дифузії вуглецю в оброблювану поверхню.

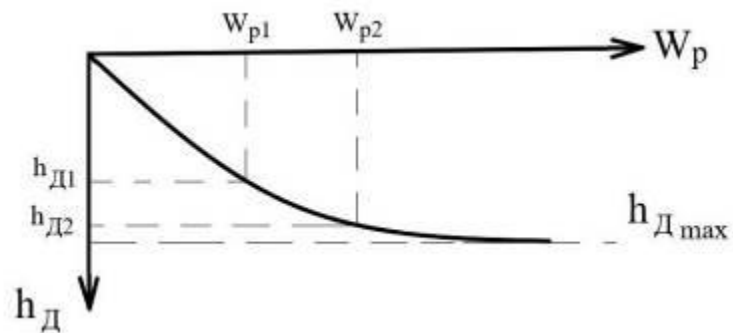
Слід зазначити, що дифузійні шари методом ЕІЛ можна формувати, застосовуючи спеціальні технологічні середовища (СТС) регульованого складу, які наносять на катод у вигляді гелів, паст, обмазок тощо (див. розділ 1). При цьому, залежно від складу СТС, можна формувати тільки дифузійні шари, коли у вигляді анода використовують графіт (вуглець) і вводять до складу СТС такі легуючі елементи як вуглець, азот, сірка та ін. крім елементів металів. При цьому, змінений шар буде складатися з дифузійної зони різного хімічного і фазового складу залежно від коефіцієнтів дифузії діфундувальних елементів, і основи.

Якщо до складу СТС входять метали, то на катоді формуються шари, структура яких складається з «білого шару», дифузійної зони і основного металу.

Якщо за величину ефективності процесу ЕІЛ прийняти товщини «білого шару» і дифузійної зони, то залежність цих параметрів якості шару при ЕІЛ від енергії розряду приймає вид, представлений на рисунку 3.1.



а



б

а – масоперенесення анода і дифузія легуючих елементів матеріалу анода в основу; б – тільки в умовах дифузії елементів матеріалу анода в основу

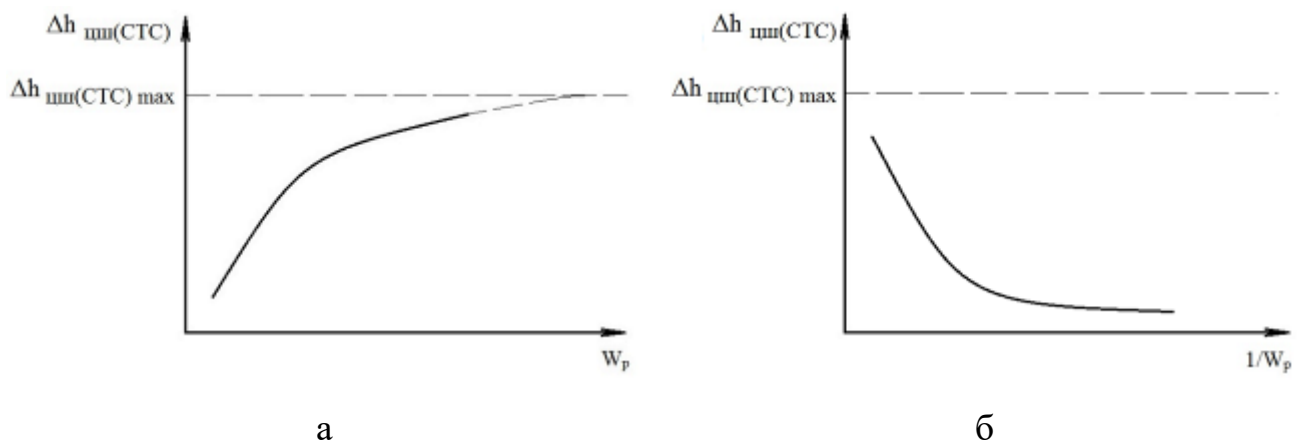
Рисунок 3.1 – Залежність товщини «білого» шару і дифузійної зони при ЕІЛ за різних умов

Необхідно відзначити, що температура нагрівання катода (оброблюваної поверхні) залежить від енергії розряду (W_p), при якій відбувається процес ЕІЛ. Існування прямо пропорційній залежності $T \sim W_p$ свідчить про те, що з

підвищенням енергії розряду збільшуються коефіцієнти дифузії елементів матеріалу анода в основу, а, отже, й ефективність процесу. У зв'язку з цим, залежність товщин «білого» шару і дифузійної зони, так само, як і коефіцієнти дифузії підкоряються експоненціальній залежності (відповідно до рівняння Арреніуса (3.3))

Розглянемо випадок формування шару без масоперенесення матеріалу анода. Прикладом цього випадку може бути цементация, здійснювана методом ЕІЛ (ЦЕІЛ), коли у вигляді анода застосовують електрод-інструмент з графіту. Для підвищення якості ЦЕІЛ (збільшення товщини, суцільності та мікротвердості формованого шару), після нанесення першого шару на цементовану поверхню наносять СТС, що складається з порошку графіту і продовжують легування графітовим електродом [257].

Ґрунтуючись на наших припущеннях, при ЦЕІЛ сталей поверхонь зі збільшенням енергії розряду збільшується товщина цементованого шару, сформованого удосконаленим методом ЦЕІЛ з використанням СТС ($h_{\text{цил(СТС)}}$, мкм). Між величинами $h_{\text{цил(СТС)}}$ і зворотною енергією розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta h_{\text{цил(СТС)}} = \Delta h_{\text{цил(СТС)max}}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. 3.2).



а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок 3.2 – Залежність величини товщини цементованого шару при ЦЕІЛ

З ростом енергії розряду товщина цементованого шару зростає і досягає максимальної величини ($\Delta h_{\text{ци}(CTC)\text{max}}$). Крім того, збільшення $h_{\text{ци}(CTC)}$ шару зростає тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування цементованого шару ($E_{\text{ци}(CTC)\Delta h}$).

Виходячи із залежності $\Delta h_{\text{ци}(CTC)}$ від (W_p^{-1}) (убутна експонента), можна зробити висновок, що $\ln \Delta h_{\text{ци}(CTC)}$ пропорційно ($-W_p^{-1}$) і величині $E_{\text{ци}(CTC)\Delta h}$, тобто

$$\ln \Delta h_{\text{ци}(CTC)} \sim (-W_p^{-1}), E_{\text{ци}(CTC)\Delta h} \quad (3.4)$$

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\Delta h_{\text{ци}(CTC)} = c_1 \cdot e^{\frac{-E_{\text{ци}(CTC)\Delta h}}{W_p}}, \quad (3.5)$$

де $c_1 = \Delta h_{\text{ци}(CTC)\text{max}}$ ($\Delta h_{\text{сmax}}$ – найбільша товщина цементованого шару для даної пари електродів).

Тоді

$$\Delta h_{\text{ци}(CTC)} = \Delta h_{\text{ци}(CTC)\text{max}} \cdot e^{\frac{-E_{\text{ци}(CTC)\Delta h}}{W_p}} \quad (3.6)$$

Залежність (3.6) назвемо рівнянням прогнозування товщини цементованого шару при ЦЕІЛ.

Приймаючи в (3.6)

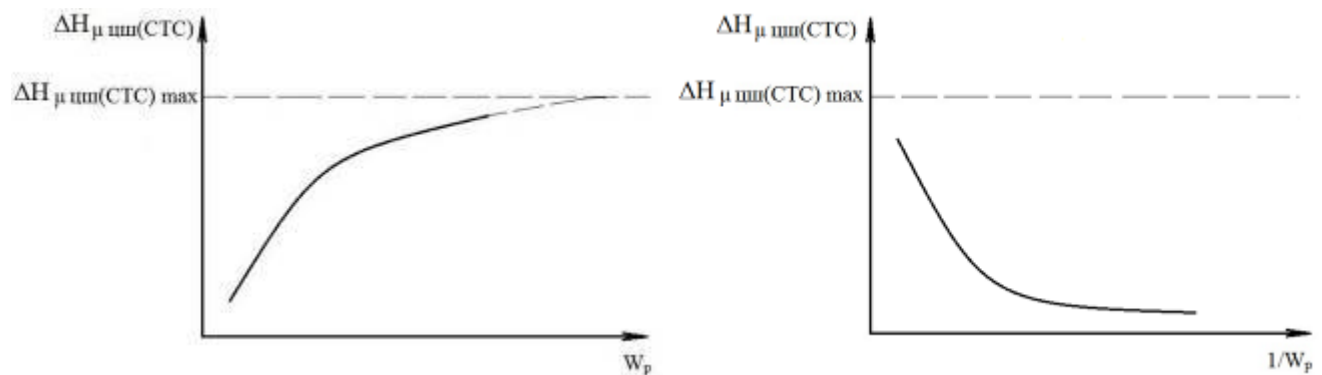
$$E_{\text{ци}(CTC)\Delta h} = W_p \quad (3.7)$$

маємо:

$$\frac{\Delta h_{\text{ци}(CTC)}}{\Delta h_{\text{ци}(CTC)\text{max}}} = e^{-1}. \quad (3.8)$$

Звідси $E_{\mu\text{шш}(CTC)\Delta h}$ – це критична величина, рівна такій енергії розряду, при якій $\Delta h_{\mu\text{шш}(CTC)}$ в e раз менше $\Delta h_{\mu\text{шш}(CTC)\text{max}}$. Назвемо її константою рівняння (3.6) прогнозування товщини цементованого шару при ЦЕІЛ. Розмірність $[E_{\mu\text{шш}(CTC)\Delta h}] = \text{Дж}$.

На рис. 3.3 показана залежність величини мікротвердості цементованого шару при ЦЕІЛ від енергії розряду: зі збільшенням енергії розряду мікротвердість збільшується. Між мікротвердістю цементованого шару $H_{\mu\text{шш}(CTC)}$ і величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta H_{\mu\text{шш}(CTC)} = \Delta H_{\mu\text{шш}(CTC)\text{max}}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. 3.3, б).



а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок 3.3 – Залежність мікротвердості цементованого шару при ЦЕІЛ

З ростом енергії розряду мікротвердість цементованого шару, у період до досягнення максимальної мікротвердості ($\Delta H_{\mu\text{шш}(CTC)\text{max}}$), збільшується тим сильніше, чим більше енергія розряду, витрачена на формування цементованого шару. Крім того, $H_{\mu\text{шш}(CTC)}$ зростає тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування шару ($E_{\mu\text{шш}(CTC)\Delta H_{\mu}}$).

Виходячи із залежності $\Delta H_{\mu \text{ цш}(СТС)}$ від (W_p^{-1}) (убутна експонента), можна зробити висновок, що $\ln \Delta H_{\mu \text{ цш}(СТС)}$ пропорційно $(-W_p^{-1})$ і величині $E_{\text{цш}(СТС) \Delta H_{\mu}}$, тобто

$$\ln \Delta H_{\mu \text{ цш}(СТС)} \sim (-W_p^{-1}), E_{\text{цш}(СТС) \Delta H_{\mu}}. \quad (3.9)$$

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\Delta H_{\mu \text{ цш}(СТС)} = c_2 \cdot e^{\frac{-E_{\text{цш}(СТС) \Delta H_{\mu}}}{W_p}}, \quad (3.10)$$

де $c_2 = \Delta H_{\mu \text{ цш}(СТС) \max}$ ($\Delta H_{\mu \text{ цш}(СТС) \max}$ – найбільша мікротвердість для даної пари електродів при ЦЕЛ).

Тоді

$$\Delta H_{\mu \text{ цш}(СТС)} = \Delta H_{\mu \text{ цш}(СТС) \max} \cdot e^{\frac{-E_{\text{цш}(СТС) \Delta H_{\mu}}}{W_p}}. \quad (3.11)$$

Залежність (3.11) назвемо рівнянням прогнозування мікротвердості зміненого шару при цементації методом ЕЛ.

Приймаючи в (3.11)

$$E_{\text{цш}(СТС) \Delta H_{\mu}} = W_p, \quad (3.12)$$

маємо:

$$\frac{\Delta H_{\mu \text{ цш}(СТС)}}{\Delta H_{\mu \text{ цш}(СТС) \max}} = e^{-1}. \quad (3.13)$$

Звідси $E_{\text{цш}(СТС) \Delta H_{\mu}}$ – це критична величина, рівна такій енергії розряду, при якій $\Delta H_{\mu \text{ цш}(СТС)}$ в e раз менше $\Delta H_{\mu \text{ цш}(СТС) \max}$. Назвемо її константою рівняння (3.11)

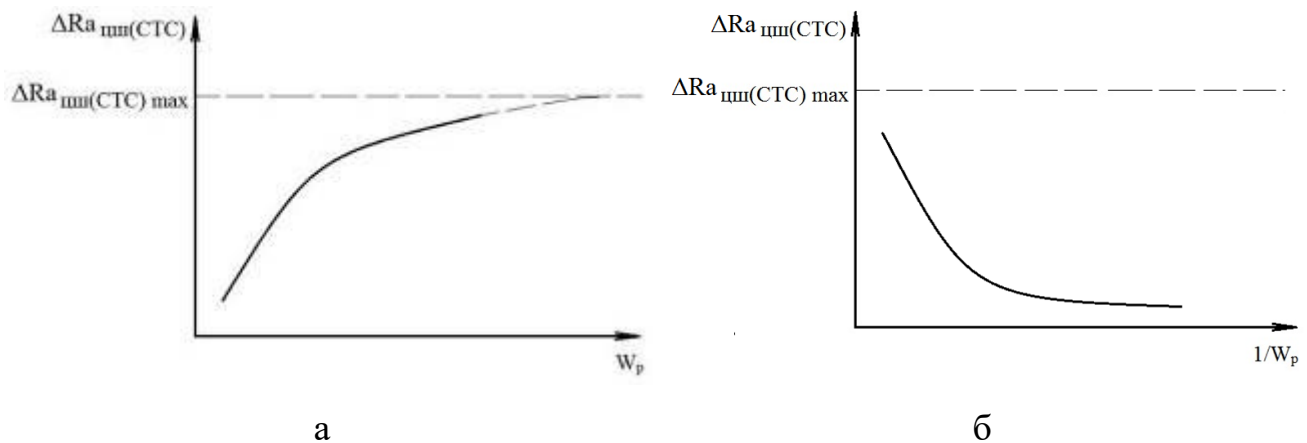
прогнозування мікротвердості зміненого шару при цементації методом ЕІЛ.

Розмірність $[E_{ци(CTC) \Delta H_{\mu}}] = \text{Дж}$.

Режими ЕІЛ при цементації впливають на шорсткість сформованого поверхневого шару і його суцільність.

Між шорсткістю поверхневого шару $Ra_{ци(CTC)}$ і величиною зворотною енергії розряду (W_p^{-1}) при цементації методом ЕІЛ до періоду, коли $\Delta Ra_{ци(CTC)} = \Delta Ra_{ци(CTC) \max}$, існує експоненціальна убутна залежність (див. рис. 3.4).

З ростом енергії розряду шорсткість поверхні збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації, витрачена на формування шорсткості поверхні $E_{ци(CTC) \Delta Ra}$.



а – від розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок 3.4 – Залежність шорсткості поверхні при ЦЕІЛ

Виходячи із залежності $\Delta Ra_{ци(CTC)}$ від W_p^{-1} (убутна експонента), можна зробити висновок, що $\ln \Delta Ra_{ци(CTC)}$ пропорційно $(-W_p)^{-1}$ і величині $E_{ци(CTC) \Delta Ra}$, тобто

$$\ln \Delta Ra_{\text{ци}(CTC)} \sim (-W_p)^{-1}, E_{\text{ци}(CTC) \Delta Ra}. \quad (3.14)$$

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\Delta Ra_{\text{ци}(CTC)} = c_3 \cdot e^{\frac{-E_{\text{ци}(CTC) \Delta Ra}}{W_p}}, \quad (3.15)$$

де $c_3 = \Delta Ra_{\text{ци}(CTC) \max}$ ($\Delta Ra_{\text{ци}(CTC) \max}$ – найбільша шорсткість поверхневого шару для даної пари електродів).

Тоді

$$\Delta Ra_{\text{ци}(CTC)} = \Delta Ra_{\text{ци}(CTC) \max} \cdot e^{\frac{-E_{\text{ци}(CTC) \Delta Ra}}{W_p}}. \quad (3.16)$$

Залежність (3.16) назвемо рівнянням прогнозування шорсткості поверхні при ЦЕІЛ.

Приймаючи в (3.16)

$$E_{\text{ци}(CTC) \Delta Ra} = W_p, \quad (3.17)$$

маємо:

$$\frac{\Delta Ra_{\text{ци}(CTC)}}{\Delta Ra_{\text{ци}(CTC) \max}} = e^{-1}. \quad (3.18)$$

Звідси $E_{\text{ци}(CTC) \Delta Ra}$ – це критична величина, рівна такій енергії розряду, при якій $\Delta Ra_{\text{ци}(CTC)}$ в e раз менше $\Delta Ra_{\text{ци}(CTC) \max}$. Назвемо її константою рівняння прогнозування шорсткості поверхні при ЦЕІЛ. Розмірність $[E_{\text{ци}(CTC) \Delta Ra}] = \text{Дж}$.

Режим ЕІЛ, необхідний для отримання потрібної товщини та мікротвердості цементованого шару, шорсткості або суцільності поверхневого шару при ЦЕІЛ, можна визначити відповідно до рівнянь (3.6), (3.11) та (3.16). Тоді, відповідно:

$$W_p = \frac{E_{\text{ци}(CTC) \Delta h}}{\ln \frac{\Delta h_{\text{ци}(CTC) \max}}{\Delta h_x}}; \quad W_p = \frac{E_{\text{ци}(CTC) \Delta H_\mu}}{\ln \frac{\Delta H_{\mu \text{ци}(CTC) \max}}{\Delta H_{\mu x}}};$$

$$W_p = \frac{E_{\text{ци}(CTC) \Delta Ra}}{\ln \frac{\Delta Ra_{\text{ци}(CTC) \max}}{\Delta Ra_x}}. \quad (3.19)$$

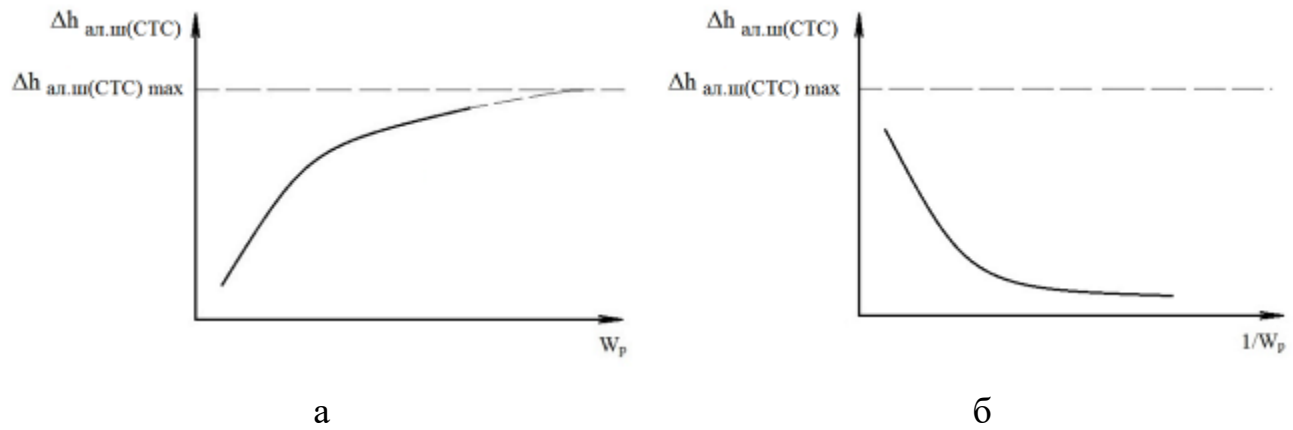
Розглянемо випадок формування шару в умовах масопереносу матеріалу анода. Такі покриття формуються при ЕІЛ з використанням металевих анодів-інструментів. Наприклад, у випадку алітування. Як показано раніше [258, 259] підвищити якість алітованого покриття можна використовуючи СТС, що складається з алюмінієвої пудри та вазеліну з подальшим ЕІЛ алюмінієвим електродом. Показано, що така технологія дозволить збільшити товщину зміненого шару, покращити суцільність покриття.

При алітуванні методом ЕІЛ з використанням СТС сталених поверхонь (рис. 3.5) зі збільшенням енергії розряду збільшується товщина «білого» шару ($h_{\text{ал.ш}(CTC)}$, мкм). Між величинами $h_{\text{ал.ш}(CTC)}$ і зворотною енергією розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta h_{\text{ал.ш}(CTC)} = \Delta h_{\text{ал.ш}(CTC) \max}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. 3.5, б).

З ростом енергії розряду товщина «білого» шару зростає і досягає максимальної величини ($\Delta h_{\text{ал.ш}(CTC) \max}$). Крім того, $h_{\text{ал.ш}(CTC)}$ зростає тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування шару ($E_{\text{ал.ш}(CTC) \Delta h}$).

Виходячи з експериментальної залежності $\Delta h_{\text{ал.ш}(CTC)}$ від (W_p^{-1}) (убутна експонента), можна зробити висновок, що $\ln \Delta h_{\text{ал.ш}(CTC)}$ пропорційно ($-W_p^{-1}$) і величині $E_{\text{ал.ш}(CTC) \Delta h}$, тобто

$$\ln \Delta h_{\text{ал.ш}(CTC)} \sim (-W_p^{-1}), \quad E_{\text{ал.ш}(CTC) \Delta h}. \quad (3.19)$$



а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок 3.5 – Залежність величини товщини «білого» шару при алітуванні методом ЕІЛ сталених поверхонь

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\Delta h_{ал.ш(СТС)} = a_1 \cdot e^{\frac{-E_{ал.ш(СТС)} \Delta h}{W_p}}, \quad (3.20)$$

де $a_1 = \Delta h_{ал.ш(СТС)max}$ ($\Delta h_{ал.ш(СТС)max}$ – найбільша товщина «білого» шару для даної пари електродів при алітуванні).

Тоді

$$\Delta h_{ал.ш(СТС)} = \Delta h_{ал.ш(СТС)max} \cdot e^{\frac{-E_{ал.ш(СТС)} \Delta h}{W_p}}. \quad (3.21)$$

Залежність (3.21) назвемо рівнянням прогнозування товщини «білого» шару при алітуванні методом ЕІЛ.

Приймаючи в (3.21)

$$E_{ал.ш(СТС)} \Delta h = W_p, \quad (3.22)$$

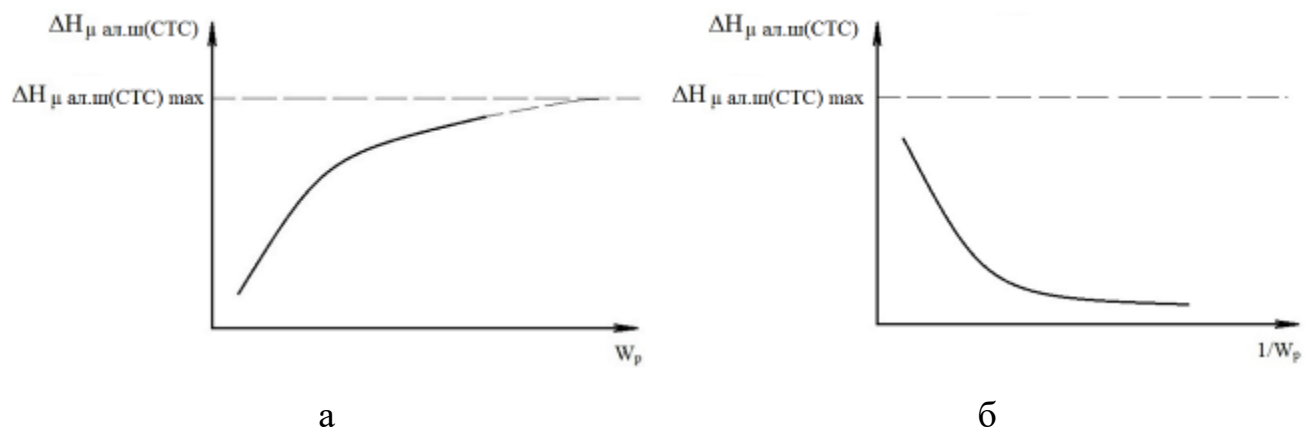
маємо:

$$\frac{\Delta h_{ал.ш(СТС)}}{\Delta h_{ал.ш(СТС)max}} = e^{-1}. \quad (3.23)$$

Звідси $E_{ал.ш(СТС)\Delta h}$ – це критична величина, рівна такій енергії розряду, при якій $\Delta h_{ал.ш(СТС)}$ в e раз менше $\Delta h_{ал.ш(СТС)max}$. Назвемо її константою рівняння (3.21) прогнозування товщини «білого» шару при алітуванні методом ЕІЛ. Розмірність $[E_{ал.ш(СТС)\Delta h}] = \text{Дж}$.

Враховуючі наші припущення, зі збільшенням енергії розряду мікротвердість «білого» шару при алітуванні методом ЕІЛ з використанням СТС збільшується. Між мікротвердістю зміцненого шару $H_{\mu ал.ш(СТС)}$ і величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta H_{ал.ш(СТС)} = \Delta H_{\mu ал.ш(СТС)max}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. 3.6, б).

З ростом енергії розряду мікротвердість «білого» шару, у період до досягнення максимальної мікротвердості ($\Delta H_{\mu ал.ш(СТС)max}$), збільшується тим сильніше, чим більше енергія розряду, витрачена на формування цього шару. Крім того, збільшення $\Delta H_{\mu ал.ш(СТС)}$ зростає тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування шару ($E_{ал.ш(СТС)\Delta H_{\mu}}$).



а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок 3.6 – Залежність мікротвердості «білого» шару при алітування методом ЕІЛ сталених поверхонь

Виходячи з експериментальної залежності $\Delta H_{\mu \text{ ал.ш}(СТС)}$ від (W_p^{-1}) (убутна експонента), можна зробити висновок, що $\ln \Delta H_{\mu \text{ ал.ш}(СТС)}$ пропорційно $(-W_p^{-1})$ і величині $E_{\text{ал.ш}(СТС)\Delta H_{\mu}}$, тобто

$$\ln \Delta H_{\mu \text{ ал.ш}(СТС)} \sim (-W_p^{-1}), E_{\text{ал.ш}(СТС)\Delta H_{\mu}}. \quad (3.24)$$

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\Delta H_{\mu \text{ ал.ш}(СТС)} = a_2 \cdot e^{\frac{-E_{\text{ал.ш}(СТС)\Delta H_{\mu}}}{W_p}}, \quad (3.25)$$

де $a_2 = \Delta H_{\mu \text{ бш а тах}}$ ($\Delta H_{\mu \text{ бш а тах}}$ – найбільша мікротвердість «білого» шару для даної пари електродів).

Тоді

$$\Delta H_{\mu \text{ ал.ш}(СТС)} = \Delta H_{\mu \text{ ал.ш}(СТС) \text{ тах}} \cdot e^{\frac{-E_{\text{ал.ш}(СТС)\Delta H_{\mu}}}{W_p}}. \quad (3.26)$$

Залежність (3.26) назвемо рівнянням прогнозування мікротвердості «білого» шару при алітуванні методом ЕІЛ.

Приймаючи в (3.26)

$$E_{\text{ал.ш}(СТС)\Delta H_{\mu}} = W_p, \quad (3.27)$$

маємо:

$$\frac{\Delta H_{\mu \text{ ал.ш}(СТС)}}{\Delta H_{\mu \text{ ал.ш}(СТС) \text{ тах}}} = e^{-1}. \quad (3.28)$$

Звідси $E_{\text{ал.ш}(СТС)\Delta H_{\mu}}$ – це критична величина, рівна такій енергії розряду, при якій

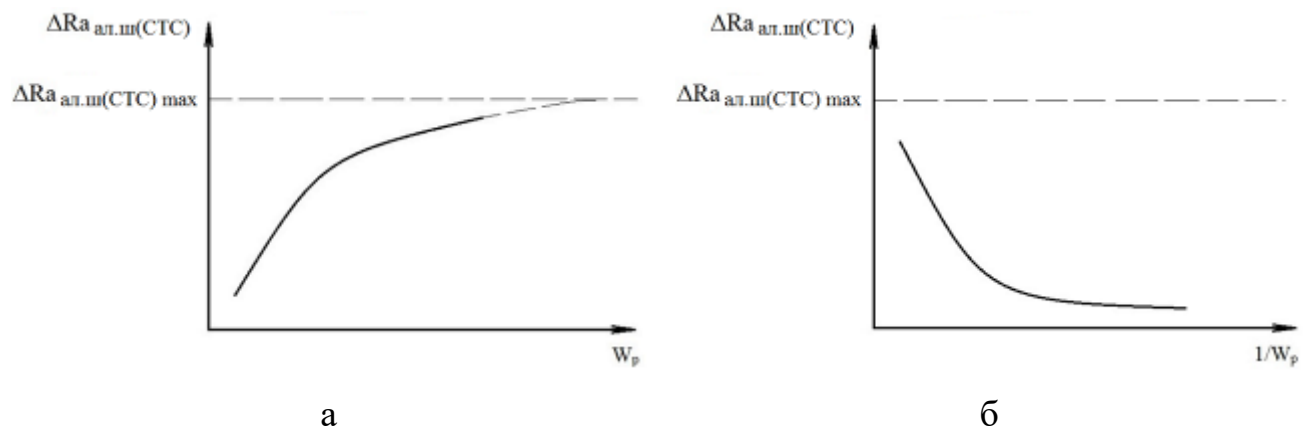
$\Delta H_{\mu \text{ ал.ш}(СТС)}$ в e раз менше $\Delta H_{\mu \text{ ал.ш}(СТС) \text{ тах}}$. Назвемо її константою рівняння (3.26)

прогнозування мікротвердості «білого» шару при алітуванні методом ЕІЛ. Розмірність $[E_{ал.ш(CTC)\Delta H_\mu}] = \text{Дж}$.

Режими ЕІЛ при алітуванні впливають на шорсткість сформованого поверхневого шару і його суцільність.

Між шорсткістю поверхневого шару $Ra_{ал.ш(CTC)}$ і величиною зворотною енергії розряду (W_p^{-1}) при алітуванні методом ЕІЛ до періоду, коли $\Delta Ra_{ал.ш(CTC)} = \Delta Ra_{ал.ш(CTC)max}$, існує експоненціальна убутна залежність (див. рис. 3.7).

З ростом енергії розряду шорсткість поверхні збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації, витрачена на формування шорсткості поверхні $E_{ал.ш(CTC)\Delta Ra}$.



а – від розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок 3.7 – Залежність шорсткості поверхні при алітуванні методом ЕІЛ

Виходячи з експериментальної залежності $\Delta Ra_{ал.ш(CTC)}$ від W_p^{-1} (убутна експонента), можна зробити висновок, що $\ln \Delta Ra_{ал.ш(CTC)}$ пропорційно $(-W_p)^{-1}$ і величині $E_{ал.ш(CTC)\Delta Ra}$, тобто

$$\ln \Delta Ra_{ал.ш(CTC)} \sim (-W_p)^{-1}, E_{ал.ш(CTC)\Delta Ra}. \quad (3.29)$$

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\Delta Ra_{ал.ш(СТС)} = a_3 \cdot e^{\frac{-E_{ал.ш(СТС)\Delta Ra}}{W_p}}, \quad (3.30)$$

де $a_3 = \Delta Ra_{ал.ш(СТС)max}$ ($\Delta Ra_{ал.ш(СТС)max}$ – найбільша шорсткість поверхневого шару для даної пари електродів).

Тоді

$$\Delta Ra_{ал.ш(СТС)} = \Delta Ra_{ал.ш(СТС)max} \cdot e^{\frac{-E_{ал.ш(СТС)\Delta Ra}}{W_p}}. \quad (3.31)$$

Залежність (3.31) назвемо рівнянням прогнозування шорсткості поверхні при алітуванні методом ЕІЛ.

Приймаючи в (3.31)

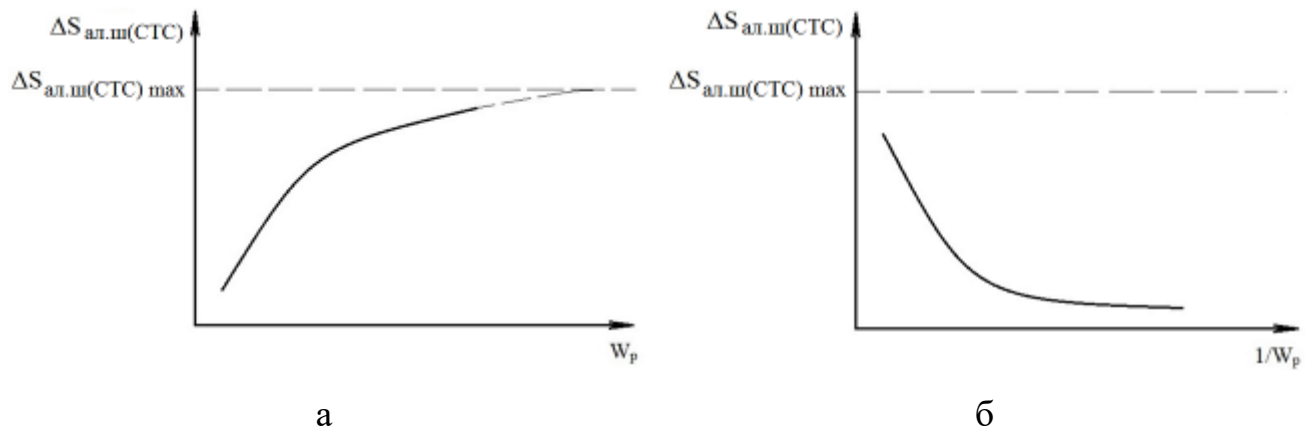
$$E_{ал.ш(СТС)\Delta Ra} = W_p, \quad (3.32)$$

маємо:

$$\frac{\Delta Ra_{ал.ш(СТС)}}{\Delta Ra_{ал.ш(СТС)max}} = e^{-1}. \quad (3.33)$$

Звідси $E_{ал.ш(СТС)\Delta Ra}$ – це критична величина, рівна такій енергії розряду, при якій $\Delta Ra_{ал.ш(СТС)}$ в e раз менше $\Delta Ra_{ал.ш(СТС)max}$. Назвемо її константою рівняння прогнозування шорсткості поверхні при алітуванні методом ЕІЛ. Розмірність $[E_{ал.ш(СТС)\Delta Ra}] = \text{Дж}$.

Між суцільністю «білого» шару $S_{ал.ш(СТС)}$ й величиною зворотною енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta S_{ал.ш(СТС)} = \Delta S_{ал.ш(СТС)max}$, існує експоненціальна убутна залежність (див. рис. 3.8). З ростом енергії розряду суцільність «білого» шару збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації, витрачена на формування суцільності шару $E_{ал.ш(СТС)\Delta S}$.



а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок 3.8 – Залежність суцільності «білого» шару при алітуванні методом ЕІЛ

Виходячи із залежності $\Delta S_{ал.ш(CTC)}$ від W_p^{-1} (убутна експонента), можна зробити висновок, що $\ln \Delta S_{ал.ш(CTC)}$ пропорційно $(-W_p)^{-1}$ і величині $E_{ал.ш(CTC)\Delta S}$, тобто

$$\ln \Delta S_{ал.ш(CTC)} \sim (-W_p)^{-1}, E_{ал.ш(CTC)\Delta S}. \quad (3.34)$$

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\Delta S_{ал.ш(CTC)} = a_4 \cdot e^{\frac{-E_{ал.ш(CTC)\Delta S}}{W_p}}, \quad (3.35)$$

де $a_4 = \Delta S_{ал.ш(CTC)max}$ ($\Delta S_{ал.ш(CTC)max}$ – найбільша суцільність «білого» шару для даної пари електродів).

Тоді

$$\Delta S_{ал.ш(CTC)} = \Delta S_{ал.ш(CTC)max} \cdot e^{\frac{-E_{ал.ш(CTC)\Delta S}}{W_p}}. \quad (3.36)$$

Залежність (3.36) назвемо рівнянням прогнозування суцільності «білого» шару при алітуванні методом ЕІЛ.

Приймаючи в (3.36)

$$E_{ал.ш(СТС)\Delta S} = W_p, \quad (3.37)$$

маємо:

$$\frac{\Delta S_{ал.ш(СТС)}}{\Delta S_{ал.ш(СТС)max}} = e^{-1}. \quad (3.38)$$

Звідси $E_{ал.ш(СТС)\Delta S}$ – це критична величина, рівна такій енергії розряду, при якій $\Delta S_{ал.ш(СТС)}$ в e раз менше $\Delta S_{ал.ш(СТС)max}$. Назвемо її константою рівняння прогнозування суцільності «білого» шару при алітуванні методом ЕІЛ. Розмірність $[E_{ал.ш(СТС)\Delta S}] = \text{Дж}$.

Режим ЕІЛ, необхідний для отримання потрібної товщини та мікротвердості, шорсткості або суцільності «білого» шару при алітуванні методом ЕІЛ, можна визначити відповідно до рівнянь (3.21), (3.26), (3.31) та (3.36). Тоді, відповідно:

$$W_p = \frac{E_{ал.ш(СТС)\Delta h}}{\ln \frac{\Delta h_{ал.ш(СТС)max}}{\Delta h_x}}; \quad W_p = \frac{E_{ал.ш(СТС)\Delta H_\mu}}{\ln \frac{\Delta H_{\mu ал.ш(СТС)max}}{\Delta H_{\mu x}}};$$

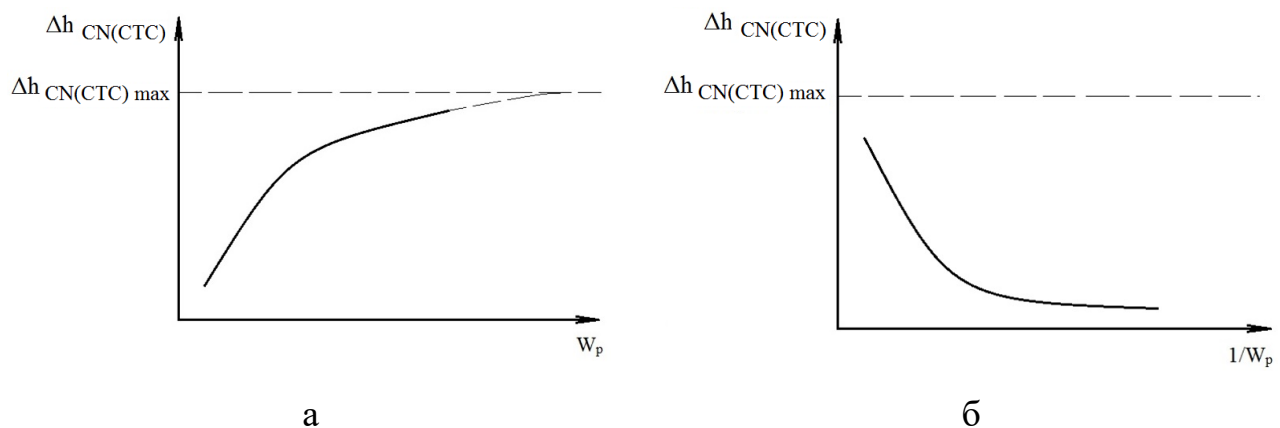
$$W_p = \frac{E_{ал.ш(СТС)\Delta Ra}}{\ln \frac{\Delta Ra_{ал.ш(СТС)max}}{\Delta Ra_x}}; \quad W_p = \frac{E_{ал.ш(СТС)\Delta S}}{\ln \frac{\Delta S_{ал.ш(СТС)max}}{\Delta S_x}}. \quad (3.39)$$

Електроіскрове легування може застосовуватися для одержання комплексних покриттів. У розділі 1 показано, що використання СТС під час ЕІЛ успішно використовується з метою створення на робочих поверхнях функціональних покриттів, наприклад, з особливими трибологічними властивостями – сульфоцементация, сульфоалітування, покриття системи Мо-S тощо. Необхідно відмітити, що при створенні таких покриттів залежно від

вихідних електродних матеріалів, а також складу СТС, змінений шар може утворюватися як за рахунок тільки дифузійних процесів (наприклад, карбонітрація, сульфоцементация [260-262]), так в умовах масоперенесення матеріалу анода чи матеріалу СТС (сульфоалітування, покриття системи Al-C-S, покриття системи Mo-S, покриття системи Al-C-B тощо [263-268]).

При карбонітруванні методом ЕІЛ графітовим електродом з використанням СТС, що містить азотовмісні речовини, сталених поверхонь (рис. 3.9) зі збільшенням енергії розряду збільшується товщина карбонітрованого шару ($h_{CN(CTC)}$). Між величинами $h_{CN(CTC)}$ і зворотною енергією розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta h_{CN(CTC)} = \Delta h_{CN(CTC)max}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. 3.9, б).

З ростом енергії розряду товщина карбонітрованого шару зростає і досягає максимальної величини ($\Delta h_{CN(CTC)max}$). Крім того, збільшення $h_{CN(CTC)}$ шару зростає тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування карбонітрованого шару ($E_{CN(CTC)\Delta h}$).



а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок 3.9 – Залежність товщини карбонітрованого шару при ЕІЛ з використанням СТС

Виходячи із залежності $\Delta h_{CN(CTC)}$ від (W_p^{-1}) (убутна експонента), можна зробити висновок, що $\ln \Delta h_{CN(CTC)}$ пропорційно $(-W_p^{-1})$ і величині $E_{CN(CTC)\Delta h}$, тобто

$$\ln \Delta h_{CN(CTC)} \sim (-W_p^{-1}), E_{CN(CTC)\Delta h}. \quad (3.40)$$

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\Delta h_{CN(CTC)} = \Delta h_{CN(CTC)max} \cdot e^{\frac{-E_{CN(CTC)\Delta h}}{W_p}}. \quad (3.41)$$

Залежність (3.41) назвемо рівнянням прогнозування товщини карбонірованого шару, отриманого методом ЕІЛ.

Приймаючи в (3.41)

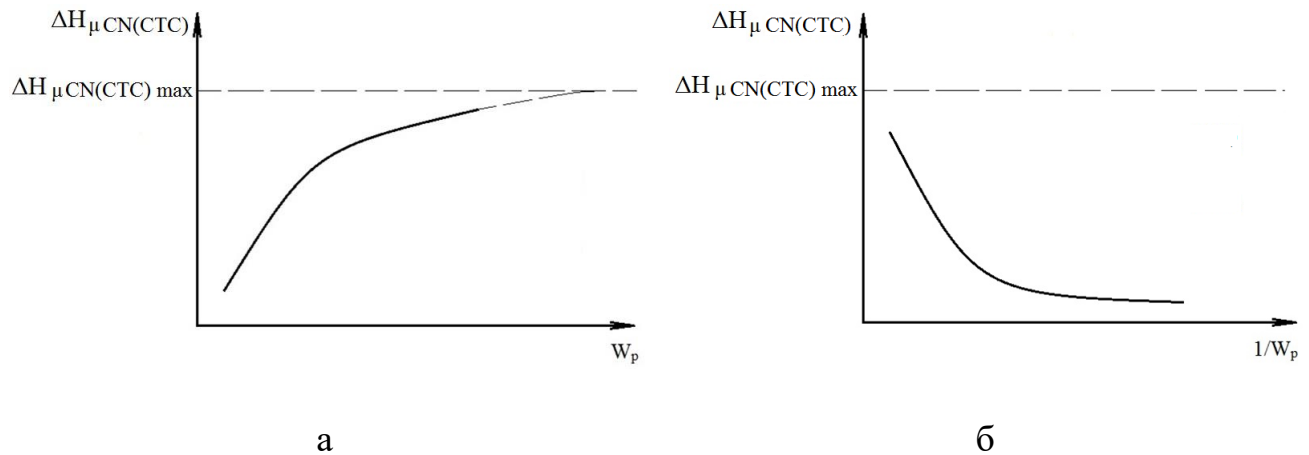
$$E_{CN(CTC)\Delta h} = W_p, \quad (3.42)$$

маємо:

$$\frac{\Delta h_{CN(CTC)}}{\Delta h_{CN(CTC)max}} = e^{-1}. \quad (3.43)$$

Звідси $E_{CN(CTC)\Delta h}$ – це критична величина, рівна такій енергії розряду, при якій $\Delta h_{CN(CTC)}$ в e раз менше $\Delta h_{CN(CTC)max}$. Назвемо її константою рівняння (3.41) прогнозування товщини карбонірованого шару, отриманого методом ЕІЛ. Розмірність $[E_{CN(CTC)\Delta h}] = \text{Дж}$.

На рис. 3.10 показана залежність величини мікротвердості карбонірованого шару, отриманого методом ЕІЛ, від енергії розряду: зі збільшенням енергії розряду мікротвердість збільшується. Між мікротвердістю карбонірованого шару $H_{\mu CN(CTC)}$ і величиною зворотною енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta H_{\mu CN(CTC)} = \Delta H_{\mu CN(CTC)max}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. 3.10, б).



а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок 3.10 – Залежність мікротвердості карбонітрованого шару при ЕІЛ з використанням СТС

З ростом енергії розряду мікротвердість карбонітрованого шару у період до досягнення максимальної мікротвердості ($\Delta H_{\mu CN(CTC) max}$) збільшується тим сильніше, чим більше енергія розряду, витрачена на формування шару. Крім того, збільшення $H_{\mu CN(CTC)}$ карбонітрованого шару зростає тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування шару ($E_{CN(CTC)\Delta H_{\mu}}$).

Виходячи з експериментальної залежності $\Delta H_{\mu CN(CTC)}$ від (W_p^{-1}) (убутна експонента), можна зробити висновок, що $\ln \Delta H_{\mu CN(CTC)}$ пропорційно ($-W_p^{-1}$) і величині $E_{CN(CTC)\Delta H_{\mu}}$, тобто

$$\ln \Delta H_{\mu CN(CTC)} \sim (-W_p^{-1}), E_{CN(CTC)\Delta H_{\mu}}. \quad (3.44)$$

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\Delta H_{\mu CN(CTC)} = \Delta H_{\mu CN(CTC) max} \cdot e^{\frac{-E_{CN(CTC)\Delta H_{\mu}}}{W_p}}. \quad (3.45)$$

Залежність (3.45) назвемо рівнянням прогнозування мікротвердості карбонітрованого шару, отриманого методом ЕІЛ.

Приймаючи в (3.45)

$$E_{CN(CTC)\Delta H_\mu} = W_p, \quad (3.46)$$

маємо:

$$\frac{\Delta H_{\mu CN(CTC)}}{\Delta H_{\mu CN(CTC)max}} = e^{-1}. \quad (3.47)$$

Звідси $E_{CN(CTC)\Delta H_\mu}$ – це критична величина, рівна такій енергії розряду, при якій $\Delta H_{\mu CN(CTC)}$ в e раз менше $\Delta H_{\mu CN(CTC)max}$. Назвемо її константою рівняння (3.45) прогнозування мікротвердості карбонірованого шару, отриманого методом ЕІЛ з використанням СТС. Розмірність $[E_{CN(CTC)\Delta H_\mu}] = \text{Дж}$.

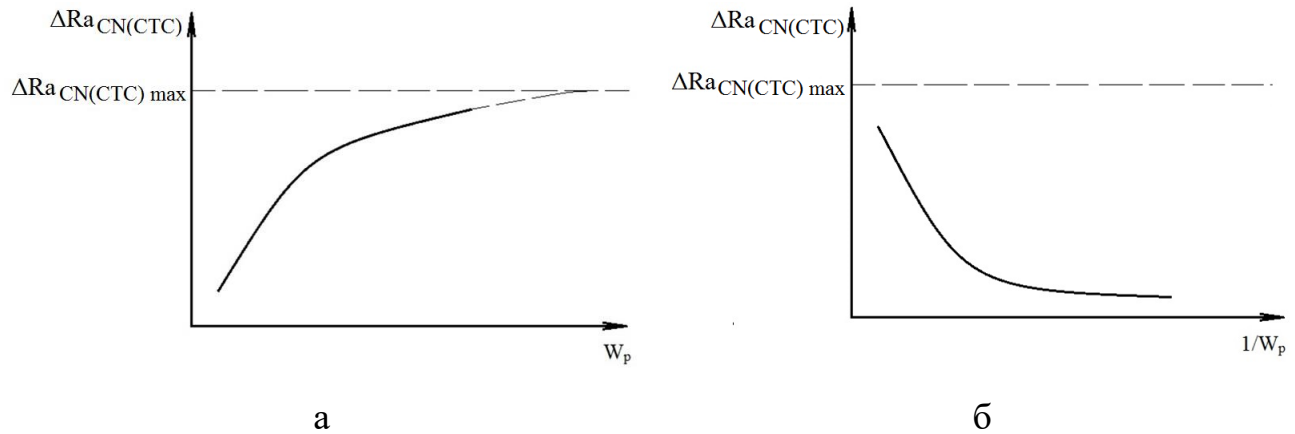
Між шорсткістю поверхневого шару $Ra_{CN(CTC)}$ і величиною зворотною енергії розряду (W_p^{-1}) при карбоніруванні методом ЕІЛ до періоду, коли $\Delta Ra_{CN(CTC)} = \Delta Ra_{CN(CTC)max}$, існує експоненціальна убутна залежність (див. рис. 3.11). З ростом енергії розряду шорсткість поверхні збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації, витрачена на формування шорсткості поверхні $E_{CN(CTC)\Delta Ra}$. Виходячи з експериментальної залежності $\Delta Ra_{CN(CTC)}$ від W_p^{-1} (убутна експонента), можна зробити висновок, що $\ln \Delta Ra_{CN(CTC)}$ пропорційно $(-W_p)^{-1}$ і величині $E_{CN(CTC)\Delta Ra}$, тобто

$$\ln \Delta Ra_{CN(CTC)} \sim (-W_p)^{-1}, E_{CN(CTC)\Delta Ra}. \quad (3.48)$$

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\Delta Ra_{CN(CTC)} = \Delta Ra_{CN(CTC)max} \cdot e^{\frac{-E_{CN(CTC)\Delta Ra}}{W_p}}. \quad (3.49)$$

Залежність (3.49) назвемо рівнянням прогнозування шорсткості поверхні при карбонітуванні методом ЕІЛ.



а – від розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок 3.11 – Залежність шорсткості поверхні при карбонітуванні методом ЕІЛ сталльної поверхні

Приймаючи в (3.49)

$$E_{CN(CTC)\Delta Ra} = W_p, \quad (3.50)$$

маємо:

$$\frac{\Delta Ra_{CN(CTC)}}{\Delta Ra_{CN(CTC)max}} = e^{-1}. \quad (3.51)$$

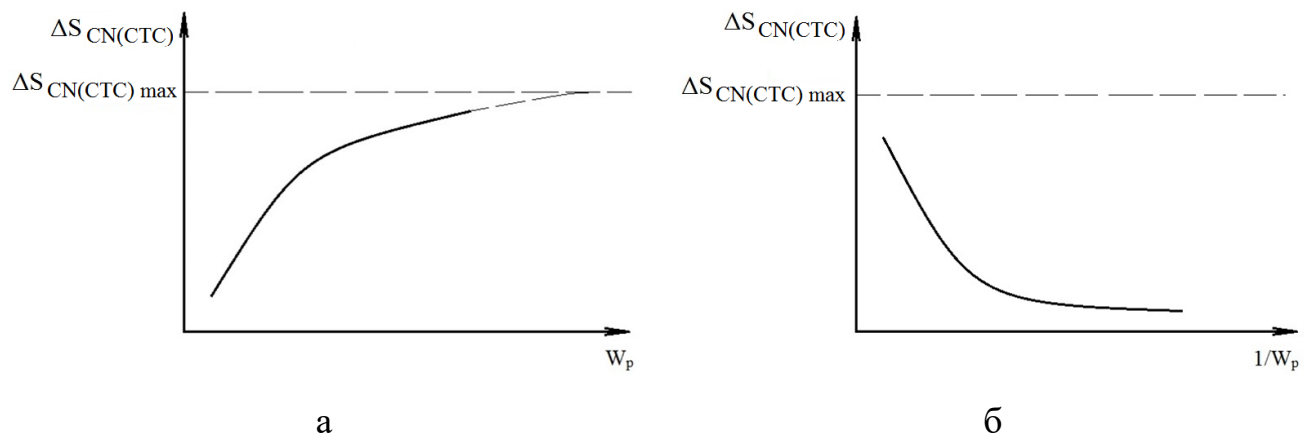
Звідси $E_{CN(CTC)\Delta Ra}$ – це критична величина, рівна такій енергії розряду, при якій $\Delta Ra_{CN(CTC)}$ в e раз менше $\Delta Ra_{CN(CTC)max}$. Назвемо її константою рівняння прогнозування шорсткості поверхні при карбонітуванні методом ЕІЛ. Розмірність $[E_{CN(CTC)\Delta Ra}] = \text{Дж}$.

Між суцільністю шару $S_{CN(CTC)}$ й величиною зворотною енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta S_{CN(CTC)} = \Delta S_{CN(CTC)max}$, існує експоненціальна убутна залежність (див. рис. 3.12).

З ростом енергії розряду суцільність шару збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації, витрачена на формування суцільного шару $E_{CN(CTC)\Delta S}$.

Виходячи з експериментальної залежності $\Delta S_{CN(CTC)}$ від W_p^{-1} (убутна експонента), можна зробити висновок, що $\ln \Delta S_{CN(CTC)}$ пропорційно $(-W_p)^{-1}$ і величині $E_{CN(CTC)\Delta S}$, тобто

$$\ln \Delta S_{CN(CTC)} \sim (-W_p)^{-1}, E_{CN(CTC)\Delta S}. \quad (3.52)$$



а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок 3.12 – Залежність суцільності поверхневого шару при карбонітуванні методом ЕІЛ

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\Delta S_{CN(CTC)} = \Delta S_{CN(CTC)\max} \cdot e^{\frac{-E_{CN(CTC)\Delta S}}{W_p}}. \quad (3.53)$$

Залежність (3.53) назвемо рівнянням прогнозування суцільності шару при карбонітуванні методом ЕІЛ.

Приймаючи в (3.53)

$$E_{CN(CTC)\Delta S} = W_p, \quad (3.54)$$

маємо:

$$\frac{\Delta S_{CN(CTC)}}{\Delta S_{CN(CTC)max}} = e^{-1}. \quad (3.55)$$

Звідси $E_{CN(CTC)\Delta S}$ – це критична величина, рівна такій енергії розряду, при якій $\Delta S_{CN(CTC)}$ в e раз менше $\Delta S_{CN(CTC)max}$. Назвемо її константою рівняння прогнозування суцільності шару при карбонітруванні методом ЕІЛ. Розмірність $[E_{CN(CTC)\Delta S}] = \text{Дж}$.

Режим ЕІЛ, необхідний для отримання потрібної товщини та мікротвердості зміцненого шару, шорсткості та суцільності поверхневого шару при карбонітруванні методом ЕІЛ, можна визначити відповідно до рівнянь (3.41), (3.45), (3.49) та (3.53). Тоді, відповідно:

$$W_p = \frac{E_{CN(CTC)\Delta h}}{\ln \frac{\Delta h_{CN(CTC)max}}{\Delta h_x}}; \quad W_p = \frac{E_{CN(CTC)\Delta H_\mu}}{\ln \frac{\Delta H_{\mu CN(CTC)max}}{\Delta H_{\mu x}}}; \quad (3.56)$$

$$W_p = \frac{E_{CN(CTC)\Delta Ra}}{\ln \frac{\Delta Ra_{CN(CTC)max}}{\Delta Ra_x}}; \quad W_p = \frac{E_{CN(CTC)\Delta S}}{\ln \frac{\Delta S_{CN(CTC)max}}{\Delta S_x}}.$$

Таким чином, запропонована математична модель прогнозування якісних параметрів поверхневого шару, яка дозволяє за енергетичними параметрами процесу ЕІЛ прогнозувати якісні параметри отриманих покриттів, що сформувалися за рахунок дифузійних процесів, а також дифузійних процесів і масопереносу під час ЕІЛ із застосуванням СТС.

3.2. Прогнозування жаростійкості поверхневих шарів, отриманих методом електроіскрового легування

Основним завданням розроблених і проєктованих захисних покриттів є оцінка їх довговічності в експлуатаційних умовах. Це завдання передбачає визначення ефективності захисного покриття при випробуваннях на високотемпературне окислення і термостійкість, а також розробку способу прогнозування терміну служби покриттів з урахуванням умов роботи деталей.

При оцінці захисної здатності покриттів в основному обмежуються визначенням питомої зміни маси зразка і зіставленням значень цієї характеристики жаростійкості зразків з покриттям і без нього [269]. Дуже часто поряд з визначенням питомого збільшення маси вимірюють товщину, мікротвердість покриття, досліджують мікроструктуру, хімічний і фазовий склад.

Складним завданням є прогнозування жаростійкості захисного покриття.

Нами запропонована математична модель управління якістю поверхневих шарів деталей, що дозволяє за енергетичними параметрами обладнання прогнозувати якісні показники формованого поверхневого шару, а також вирішувати зворотну задачу – визначати необхідні режими ЕІЛ для забезпечення необхідної якості поверхні. Розроблено методику, що дозволяє встановлювати критерії оцінки альтернативних варіантів способів формування методом ЕІЛ поверхневих шарів необхідної якості і вибору найбільш раціонального.

Розглянемо процес зміни маси зразка із захисним алітованим покриттям, отриманим методом ЕІЛ з використанням СТС, при випробуванні на жаростійкість.

Потужність, що розвивається установкою безпосереднього електронагріву (піччю періодичної дії), витрачається на нагрівання металу, втрати в

навколишнє середовище і в самій установці. Тепло (Q , Дж), що йде на нагрівання металу визначається за формулою [270]:

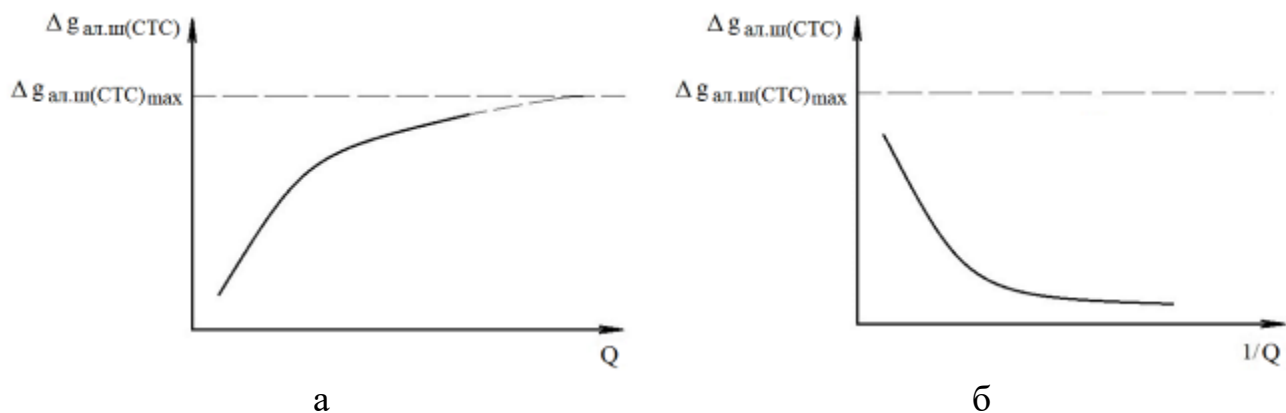
$$Q = Gc_t(t_{\text{кін}} - t_0), \quad (3.57)$$

G – маса металу, що піддається нагріванню, кг;

$t_{\text{кін}}$ і t_0 – кінцева і початкова температури металу, °С;

c_t – середня теплоємність, кДж/(кг·град).

При алітуванні методом ЕІЛ (рис. 3.13) зі збільшенням часу витримки втрати теплоти збільшуються. Між втратою маси $\Delta g_{\text{ал.ш(СТС)}}$ і зворотною величиною $(Q)^{-1}$ до періоду, коли втрати маси досягають критичної величини і відбувається інтенсивне руйнування шару $\Delta g_{\text{ал.ш(СТС)}} = \Delta g_{\text{ал.ш(СТС)max}}$ існує експоненціальна убутна залежність (рис. 3.13, б).



а – від втрат тепла на нагрів і витримку зразка при випробуванні, Q ; б – від зворотної величини втрат на нагрів та витримку зразка при випробуванні, $1/Q$

Рисунок 3.13 – Залежність втрати маси зразка після алітування методом ЕІЛ після випробувань на жаростійкість

З ростом часу витримки і збільшенням втрат теплоти, у період до досягнення критичної втрати маси ($\Delta g_{ал.ш(СТС)} = \Delta g_{ал.ш(СТС)max}$), $\Delta g_{ал.ш(СТС)}$ збільшується тим сильніше, чим більші втрати теплоти, витрачені на нагрівання зразку $E_{ал.ш(СТС)\Delta g}$ - теплота активації.

Виходячи із залежності $\Delta g_{ал.ш(СТС)}$ від $(Q)^{-1}$ (убутна експонента), можна зробити висновок, що $\Delta g_{ал.ш(СТС)}$ пропорційно $(-Q)^{-1}$ і величині $E_{ал.ш(СТС)\Delta g}$, тобто

$$\ln \Delta g_{ал.ш(СТС)} \sim (-Q)^{-1}, E_{ал.ш(СТС)\Delta g}. \quad (3.58)$$

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\Delta g_{ал.ш(СТС)} = \Delta g_{ал.ш(СТС)max} \cdot e^{\frac{-E_{ал.ш(СТС)\Delta g}}{Q}}. \quad (3.59)$$

де $\Delta g_{ал.ш(СТС)max}$ – критичне (максимальне) значення втрати маси.

Залежність (3.59) назвемо рівнянням прогнозування жаростійкості шару.

Приймаючи в (3.59)

$$E_{ал.ш(СТС)\Delta g} = Q, \quad (3.60)$$

маємо:

$$\frac{\Delta g_{ал.ш(СТС)}}{\Delta g_{ал.ш(СТС)max}} = e^{-1}. \quad (3.61)$$

Звідси $E_{ал.ш(СТС)\Delta g}$ – це критична величина, рівна таким втратам тепла, при якій $\Delta g_{ал.ш(СТС)}$ в e раз менше $\Delta g_{ал.ш(СТС)max}$. Назвемо її константою жаростійкості.

Розмірність $[E_{ал.ш(СТС)\Delta g}] = \text{Дж}$.

Режим ЕІЛ, необхідний для отримання покриття з необхідною жаростійкістю, можна визначити відповідно до рівняння (3.59).

Тоді:

$$W_p = \frac{E_{ал.ш(СТС)\Delta g}}{\ln \frac{\Delta g_{ал.ш(СТС)max}}{\Delta g_x}}. \quad (3.62)$$

3.3. Синергетичний принцип самоорганізації при ЕІЛ

Важливу роль в зміцнювальних технологіях відіграє термодинамічне моделювання синтезу матеріалів і покриттів, яке дає можливість оцінити рівноважний склад продуктів взаємодії в багатофазних багатокомпонентних системах. Однак у багатьох процесах синтезу матеріалів і покриттів, у тому числі й електроіскровому легуванні, експериментально виявлені нерівноважні ефекти [228]: відхилення граничних концентрацій у дифузійній зоні і фазового складу від рівноважної діаграми стану, лінійна кінетика зростання, аномальна твердофазна дифузія, високі концентрації дефектів кристалічної будови, формування метастабільних фаз і структур. У зв'язку з цим актуальним завданням є створення нових моделей, що враховують нерівноважні явища.

Отже, зону контакту електродів при ЕІЛ можна представити у вигляді динамічної системи, що розвивається за синергетичним алгоритмом, що пов'язаний з утворенням, розвитком і функціонуванням дисипативних структур [232, 271]. Під дисипативними структурами розуміють сукупність мікроструктурних утворень, що містять елементи «штучного інтелекту», за їх допомогою у нерівноважних деформаційних системах поглинена внутрішня енергія трансформується в теплові джерела й інші дисипативні потоки, а також мінімізується вплив зовнішніх збуджень різної природи [272].

Основні властивості дисипативних структур визначаються законами нерівноважної термодинаміки, але конкретний механізм їх функціонування носить індивідуальний характер залежно від природи нерівноважного процесу, і

не завжди є очевидним [273, 274]. Характер функціонування дисипативних структур визначає кінетику розвитку системи в цілому.

Розкриття фізичної будови і механізму функціонування дисипативних структур при ЕІЛ дозволяє прогнозувати характер розвитку нерівноважного процесу, розкриває нові алгоритми управління якістю оброблених поверхонь.

3.3.1. Моделювання процесу формування покриття на основі методу фазової площини і статистичного аналізу

Традиційно фізичні процеси поділялися на два великих класи – детерміновані та стохастичні. Згідно з концепцією Лапласа, розв'язання рівнянь динаміки (особливо з використанням комп'ютерної бази) дозволяє передбачити поведінку детермінованих систем на як завгодно тривалий час. На відміну від цього поведінку стохастичних систем, майбутнє яких практично не залежить від минулого, може бути представлено тільки імовірнісним чином, коли прогножуються статистичні характеристики типу середніх значень і дисперсій випадкових величин.

У 1970-ті роки було визначено, що існує ще один важливий клас процесів – так званий детермінований хаос [275]. Хоча з формальної точки зору такі процеси є чисто детермінованими (точно знаючи їх стан в даний момент часу, можна встановити, що станеться в майбутньому). Можливість передбачити поведінку такої системи існує тільки для обмеженого проміжку часу, оскільки навіть невелика неточність у визначенні початкових умов експоненціально наростає з часом, що призводить до втрати інформації про початковий стан. В результаті на великих перебігах часу система веде себе хаотичним чином, і її опис знову зводиться до статистичних методів.

Слід зазначити, що ще в кінці XIX століття французький математик А. Пуанкаре показав, що для деяких механічних систем, еволюція яких описується рівняннями Гамільтона, реалізується непередбачувана поведінка.

Згодом виявилося, що насправді таких систем безліч і не тільки в механіці, але і у фізиці лазерів, астрофізиці, біології, соціології і т.д. Однак, на жаль, відкриття, зроблене Пуанкаре, залишилося для багатьох непоміченим. Лише через сімдесят років в 1963 році американський метеоролог Едвард Нортон Лоренц [234] повторив його, продемонструвавши чутливість поведінки системи до задання початкових умов. Строго кажучи, його цікавило вузьке практичне питання: чому, незважаючи на удосконалення комп'ютерів, математичних моделей і обчислювальних алгоритмів, неможливо отримати достовірний прогноз погоди терміном більше двох-трьох тижнів? Для вирішення цієї проблеми Лоренц розглянув найпростішу модель конвекції атмосфери, в рамках якої досліджується релеевська течія в шарі з постійною різницею температур між нижньою і верхньою [276]. Таку течію можна уявити простими рівняннями

$$\begin{aligned}\dot{X} &= -\sigma X + \sigma Y, \\ \dot{Y} &= -Y - XZ + rX, \\ \dot{Z} &= -bZ + XY,\end{aligned}\tag{3.63}$$

де X характеризує швидкість конвективного потоку, Y – різниця температур між висхідними і спадними потоками, Z пропорційно відхиленню градієнта температур від постійного значення; точка означає диференціювання за часом t , виміряного в масштабі зміни різниці температур Y . Тут $r = R / R_c$ – відношення числа Релея до критичного значення, σ – число Прандтля, b – постійна, пов'язана з геометрією задачі.

Подальше дослідження системи Лоренца показало, що вона дає кінетичну картину колективної поведінки макроскопічної системи. При цьому система (3.63) представляється у вигляді

$$\begin{aligned}
 \dot{\eta} &= -\eta + h, \\
 \sigma \dot{h} &= -h + \eta S, \\
 (\sigma/b) \dot{S} &= (r - S) - \eta h,
 \end{aligned}
 \tag{3.64}$$

де h – поле, спряжене параметру порядку η , S – керуючий параметр. Легко переконатися безпосередньою підстановкою, що система (3.63) пререходе у (3.64), якщо динамічні змінні X , Y , Z , і час t замінити згідно наступних співвідношень:

$$t' \equiv \sigma t, \quad \eta \equiv X / \sqrt{b}, \quad h \equiv Y / \sqrt{b}, \quad S \equiv r - Z. \tag{3.65}$$

Рівності (3.64) показують, що параметр σ представляє відношення характерних часів зміни поля h і параметра порядку η , останнє з яких прийнято за масштаб виміру часу t' ; відповідно, параметр b зводиться до відношення характерних часів зміни поля h та керуючого параметра S ; нарешті, параметр r визначає ступінь зовнішнього впливу, що віддаляє систему від рівноважного стану. У свою чергу, співвідношення (3.65) показують, що параметр порядку η і сполучне поле h представляють динамічні змінні X , Y , віднесені до масштабу \sqrt{b} , а керуючий параметр S зводиться до змінної Z , відрахованої від порога r у протилежному напрямку.

Найбільш популярний приклад самоорганізації в фізиці представляє спонтанне випромінювання лазера, опис якого поклало початок розвитку синергетичної схеми Хакена [277]. При цьому роль параметра порядку η відіграє напруженість поля електромагнітної хвилі, сполучне поле h зводиться до поляризації активного середовища, а керуючий параметр S – до різниці заповненості електронних рівнів.

3.3.2. Кінетична теорія самоорганізації

Якщо часи зміни сполученого поля та керуючого параметра набагато менше масштабу зміни параметра порядку, то в рівняннях (3.64) можна покласти $\sigma = 1, b$. Це означає, що величини $h(t) \approx h(\eta(t))$ $S(t) \approx S(\eta(t))$, слідує за зміною параметра порядку $\eta(t)$, і в двох останніх рівняннях (3.64) ліві частини стають зникаюче малими. В результаті отримуємо рівності

$$h = \frac{r\eta}{1 + \eta^2}, \quad S = \frac{r}{1 + \eta^2}, \quad (3.66)$$

виражають сполучене поле і керуючий параметр через параметр порядку. При $\eta = 1$ перше з цих співвідношень має лінійний вигляд, що характеризується сприйнятливістю $\chi \equiv \partial h / \partial \eta = r$. Зі зростанням параметра порядку до значення $\eta = 1$ залежність $h(\eta)$ виходить на насичення, а при $\eta > 1$ проявляє спадаючий характер, який відповідає від'ємній сприйнятливості χ , що означає нестійкість системи. Що стосується останньої рівності (3.66), то вона описує спадання керуючого параметра від максимального значення $S = r$ при $\eta = 0$ до мінімальної величини $S = r/2$ при $\eta = 1$. Очевидно, що спадний характер залежності $S(\eta)$ є проявом принципу Ле-Шательє.

Підставляючи (3.66) в (3.64), приходимо до рівняння Ландау-Халатникова

$$\dot{\eta} = -\partial E / \partial \eta \quad (3.67)$$

з синергетичним потенціалом

$$E = \frac{1}{2}\eta^2 - \frac{r}{2}\ln(1 + \eta^2). \quad (3.68)$$

Якщо параметр зовнішнього впливу r менше критичного значення $r = 1$, то залежність $E(\eta)$ має монотонно зростаючий характер з мінімумом в точці $\eta_0 = 0$, і система не впорядковується. У закритической області $r > 1$ синергетичний потенціал набуває мінімум при ненульовому значенні параметра порядку

$$\eta_0 = \sqrt{r - 1}, \quad (3.69)$$

яке зростає кореневим чином. При різкому переході у закритичну область $r > 1$ параметр порядку за час

$$\tau = (r - 1)^{-1} \quad (3.70)$$

набуває стаціонарного значення (3.69) за дебаєвським законом

$$\eta = \eta_0 (1 - e^{-t/\tau}). \quad (3.71)$$

Викладена картина відповідає безперервному фазовому переходу, при якому впорядкований й неупорядкований стан синергетичного потенціалу (3.68) не розділені бар'єром, а параметр порядку плавно наростає з часом за законом (3.71). Для переходу до переривчастого перетворення приймемо, що час релаксації параметра порядку τ_η наростає з його величиною η відповідно до залежності [278]

$$\frac{1}{\tau_\eta} = 1 + \frac{\kappa}{1 + (\eta / \eta_\tau)^2}, \quad (3.72)$$

характеризується додатними константами κ, η_τ . В результаті права частина першого з рівнянь (3.64) набуває доданку $-\kappa\eta / [1 + (\eta / \eta_\tau)^2]$. Як і при

безперервному перетворенні, адіабатичне наближення $\sigma = 1, b$ призводить до рівняння (3.67), в якому синергетичний потенціал (3.68) набуває вигляду

$$E = \left[\frac{1}{2} \eta^2 - \frac{r}{2} \ln(1 + \eta^2) \right] + \frac{\kappa \eta_\tau^2}{2} \ln \left[1 + \left(\frac{\eta}{\eta_\tau} \right)^2 \right]. \quad (3.73)$$

При малих значеннях r залежність $E(\eta)$ має монотонно зростаючий характер з мінімумом при $\eta = 0$. У точці

$$r_{c0} = 1 + (\kappa - 1)\eta_\tau^2 + 2\eta_\tau \sqrt{\kappa(1 - \eta_\tau^2)} \quad (3.74)$$

з'являється плато, яке при $r > r_{c0}$ трансформується в мінімум, який відповідає стаціонарному значенню параметра порядку $\eta_0 \neq 0$, і максимум, що розділяє мінімуми впорядкованої і невпорядкованої фаз. З подальшим зростанням параметра накачування r мінімум впорядкованої фази поглиблюється, а висота міжфазного бар'єру спадає, приймаючи нульового значення при критичному значенні

$$r_c = 1 + \kappa. \quad (3.75)$$

При $r \geq r_c$ залежність $E(\eta)$ має той же вигляд, що і для безперервного фазового переходу. Критичне значення (3.75) більше порогового (3.74), якщо параметр κ перевищує граничну величину

$$\kappa_{min} = \frac{\eta_\tau^2}{1 - \eta_\tau^2}. \quad (3.76)$$

Стаціонарні значення параметра порядку

$$\eta_0^\mp = \eta_{00} \left[1 \mp \sqrt{1 + \eta_\tau^2 \eta_{00}^4 (r - r_c)} \right]^{1/2}, \quad (3.77)$$

$$\eta_{00}^2 \equiv 12 \left[(r - 1) - (1 + \kappa) \eta_\tau^2 \right]$$

відповідають нестійкому стану η_0^- , при якому синергетичний потенціал має максимум, і стійкому η_0^+ в його мінімумі. Тут керуючий параметр

$$S_0 = \frac{(1 + \eta_{00}^2) - \sqrt{(1 + \eta_{00}^2)^2 - (1 - \eta_\tau^2)r}}{1 - \eta_\tau^2}, \quad (3.78)$$

плавню спадає з ростом r від значення

$$S_{c0} = 1 + \eta_\tau \sqrt{\frac{\kappa}{1 - \eta_\tau^2}}, \quad (3.79)$$

що відповідає $r = r_{c0}$, до $S \rightarrow 1$ при $r \rightarrow \infty$.

Отримані співвідношення (3.74) - (3.79) приводять до залежностей, показаних на рисунку 3.14.

З них видно, що при повільному збільшенні параметра накачування в точці $r = r_c$ відбувається стрибок параметра η_0 від нуля до $\sqrt{2}\eta_{00}$, а потім його значення плавно зростає за законом (3.77); при цьому керуючий параметр перескакує з лінійної ділянки $S = r$ на спадаючу (3.78). При зворотному спаданні r від великих значень параметр порядку η_0^+ зменшується відповідно до залежності (3.77), а в точці $r = r_{c0}$, $\eta_0 = \eta_{00}$ стрибком спадає до нуля; відповідно, керуючий параметр спочатку зростає за законом (3.78), а після стрибка на верхню ділянку $S = r$ починає спадати. Така картина означає наявність гістерезису, обумовленого енергетичним бар'єром, який проявляється при $\eta_\tau < 1$. Характерно, що зі зменшенням параметра κ до мінімального рівня (3.76)

рівності (3.74), (3.75), (3.79) зводяться до граничних співвідношень $r_{c0} \rightarrow r_c$, $S_{c0} \rightarrow S_c$, які означають стягування гистерезисної петлі в точку.

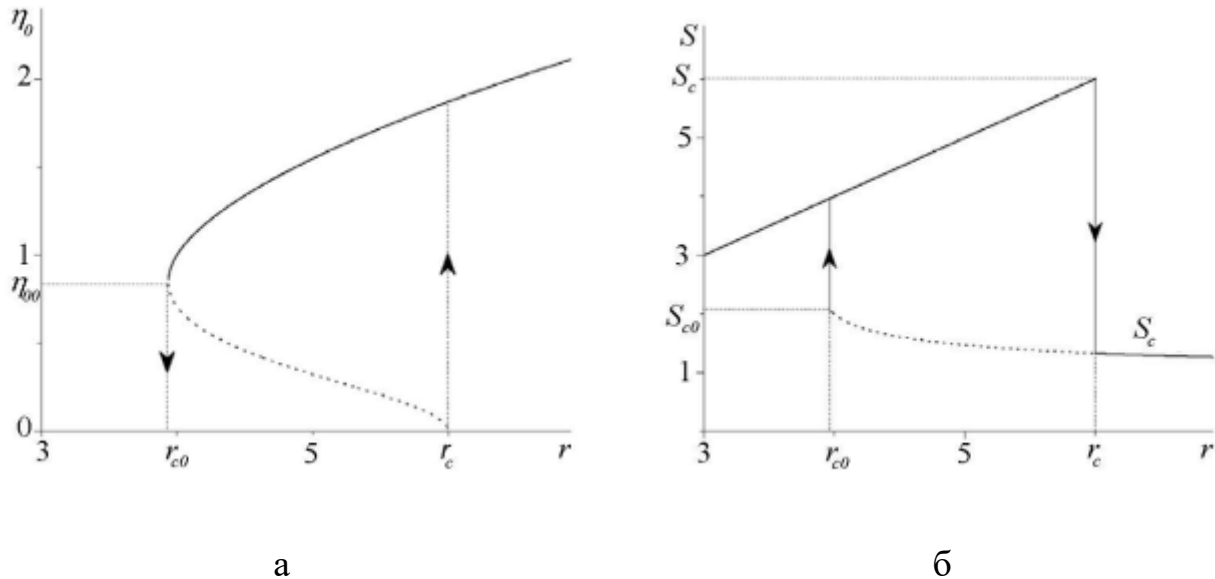


Рисунок 3.14 – Залежність стаціонарних значень параметра порядку (а) і керуючого параметра (б) від параметра накачування при $\eta_\tau = 0,5$ і $\eta_\tau = 0,5$

Наведена синергетична схема відповідає феноменологічній картині фазових переходів, в рамках якої керуючий параметр S зводиться до ентропії, а синергетичний потенціал E до внутрішньої енергії. Принципова відмінність цієї схеми від термодинамічної виражається в залежності параметра S від стану системи, що самоорганізовується. Це обумовлено відкритим характером синергетичної системи, яка стає рівноправною до термостату.

3.3.3. Метод фазової площини

Метод фазової площини є потужним інструментом якісного аналізу нелінійних систем, поведінка яких описується парю диференціальних рівнянь першого порядку [279-282]

$$\begin{aligned}\frac{dp}{dt} &= F(x, p), \\ \frac{dx}{dt} &= P(x, p).\end{aligned}\tag{3.80}$$

Тут x і p представляють узагальнені координату й імпульс, значення яких визначають положення конфігуративної точки на фазовій площині, функції $F = F(x, p)$ і $P = P(x, p)$ визначають узагальнені сили, що діють на систему. Метою методу фазової площини є побудова і дослідження фазового портрета системи, який визначається фазовими траєкторіями $p = p(x)$. Ці траєкторії задаються диференціальним рівнянням

$$\frac{dp}{dx} = \frac{F(x, p)}{P(x, p)},\tag{3.81}$$

яке виходить формальним розподілом першого рівняння (3.80) на друге. Умови $dp/dx = \infty$ і $dp/dx = 0$ задають точки фазової площини, в яких фазові траєкторії мають вертикальну та горизонтальну дотичні. Реперними характеристиками фазової площини є особливі точки, до яких система прагне (або від яких необмежено віддаляється) з плином часу. Вони визначаються умовами $dx/dt = 0$, $dp/dt = 0$, з яких випливає

$$F(x, p) = 0, \quad P(x, p) = 0.\tag{3.82}$$

Подальша процедура зводиться до визначення положень особливих точок $x = x_0$, $p = p_0$ і їх характеру. З цією метою запишемо рішення системи (3.80) в околиці особливих точок

$$\begin{aligned}x &= x_0 + ae^{\lambda t}, \\ p &= p_0 + be^{\lambda t},\end{aligned}\tag{3.83}$$

де коефіцієнти $a, b = 1$ і показник Ляпунова λ підлягають визначенню. Підстановка розв'язання (3.83) у рівняння (3.80) приводить до алгебраїчної системи рівнянь для коефіцієнтів a, b :

$$\begin{aligned} a\lambda &= aF'_x(x_0, p_0; \lambda) + bF'_p(x_0, p_0; \lambda), \\ b\lambda &= aP'_x(x_0, p_0; \lambda) + bP'_p(x_0, p_0; \lambda), \end{aligned} \quad (3.84)$$

де штрих означає похідну по аргументу, вказаному нижнім індексом. Умова сумісності системи (3.84) дає характеристичне рівняння

$$\begin{vmatrix} F'_x(x_0, p_0; \lambda) - \lambda & F'_p(x_0, p_0; \lambda) \\ P'_x(x_0, p_0; \lambda) & P'_p(x_0, p_0; \lambda) - \lambda \end{vmatrix} = 0, \quad (3.85)$$

розв'язання якого визначає показник Ляпунова $\lambda = \alpha \pm i\omega$. Типи особливих точок задаються знаками дійсної і уявної частин α , ω цього показника.

Розглянемо спочатку дійсні показники Ляпунова ($\omega = 0$). Оскільки детермінант рівняння (3.85) має другий порядок, то залежно від знаків його коренів $\lambda_{1,2}$ можливі наступні випадки:

- $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 > 0$ - відштовхуючий вузол (рис. 3.15, а);
- $\lambda_1 < 0$, $\lambda_2 < 0$ - притягальний вузол (рис. 3.15, б);
- $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 < 0$ - сідло (рис. 3.15, в).

З появою уявної частини $\omega \neq 0$ відбувається закручування фазових траєкторій поблизу особливих точок, як це показано на рисунку 3.15, г-е. Для чисто уявних показників Ляпунова $\lambda = \pm i\omega$ фазова траєкторія має вигляд замкнутої кривої, що не перетинається, (рис. 3.16, а). Нетривіальний приклад представляє граничний цикл, до якого прагнуть (або від якого тікають) фазові траєкторії нелінійної системи, що володіє комплексним показником Ляпунова $\lambda = \alpha \pm i\omega$ (рис. 3.16, г).

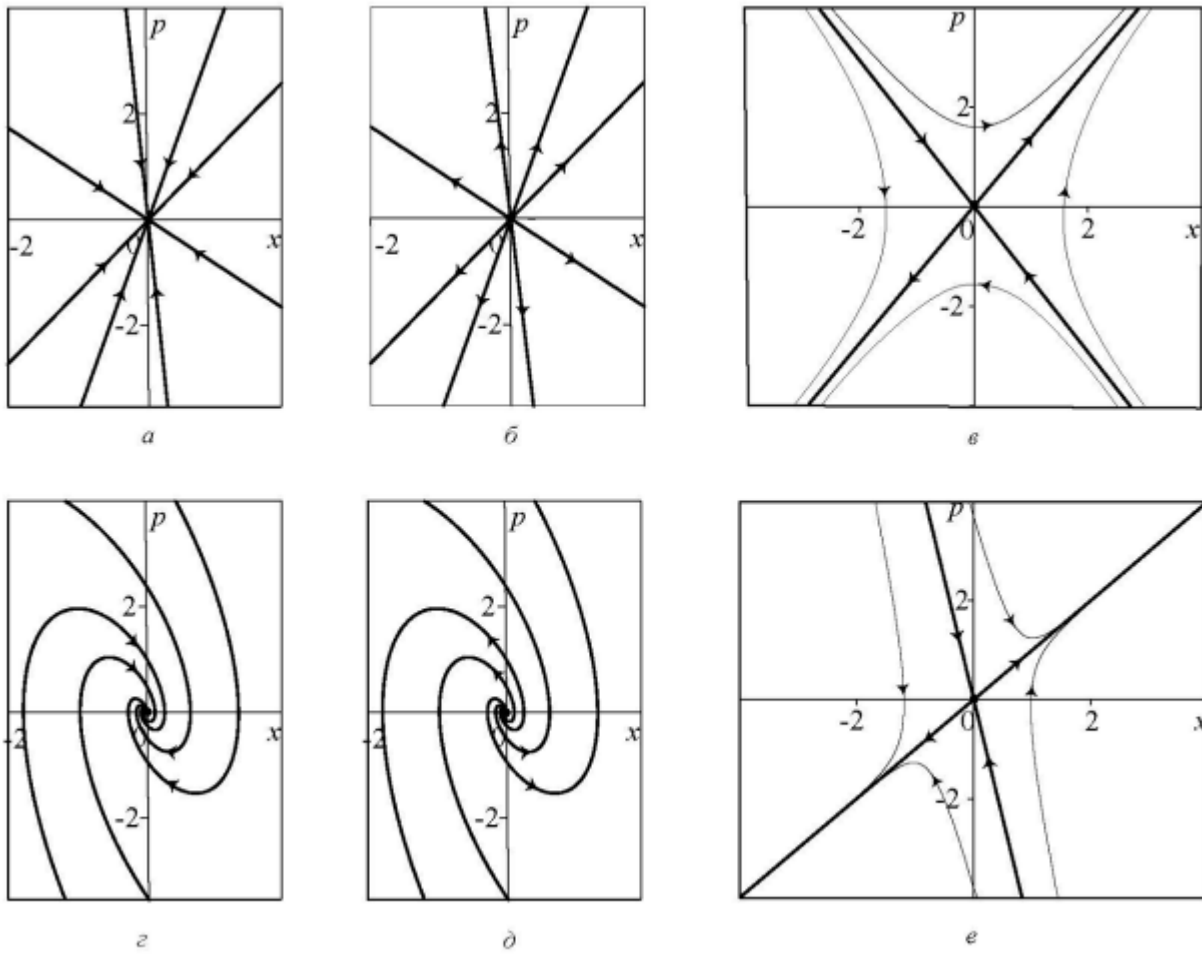
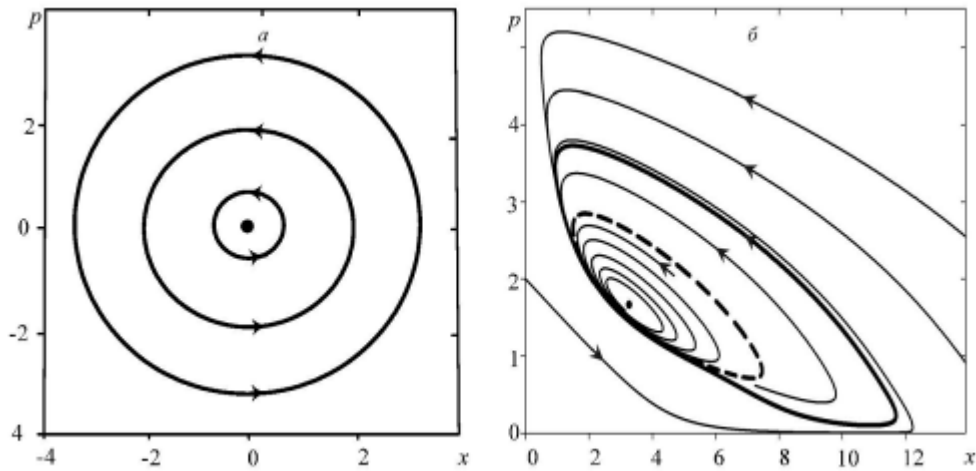


Рисунок 3.15 – Основні типи особливих точок: відштовхуючий вузол (а), притягальний вузол (б) і сідло (в) при $\omega = 0$; відштовхуючий фокус (г), притягальний вузол (д) і сідло (е) при $\omega \neq 0$



а – замкнутий цикл при $\omega = 0$; б – граничні цикли при $\omega \neq 0$

Рисунок 3.16 – Нетривіальні фазові множини

Використанням методу фазової площини виявляється найбільш ефективним при переході від узагальнених координати x і імпульсу p до дії I і куту ϑ , величини яких визначаються рівностями [281, 282]

$$I(H) \equiv 12\pi \oint p(x, H) dx, \quad (3.86)$$

$$\vartheta \equiv \frac{\partial S(x, I)}{\partial I}, \quad S(x, I) \equiv \int_0^x p(x', H(I)) dx',$$

де дія $S(x, I)$ грає роль твірної функції. Використання змінних I , ϑ , найбільш зручно в тому випадку, якщо гамільтониан системи H не залежить від кута ϑ . Тоді рівняння руху узагальненої координати ϑ і сполученого їй імпульсу I показують, що дія I не змінюється з часом. На фазовому портреті типу, наведеного на рисунку 3.16, а, це позначається у тому, що площа, що охоплюється замкнутою кривою, не змінюється з часом.

$$\dot{\vartheta} = \frac{\partial H}{\partial I}, \quad \dot{I} = -\frac{\partial H}{\partial \vartheta} \quad (3.87)$$

Найбільш популярний приклад, розгляд якого досягається методом фазової площини, є нелінійний маятник, який визначається гамильтонианом

$$H_0 = \frac{p^2}{2} + 2\omega_0^2 \sin^2 \frac{x}{2} \quad (3.88)$$

з власною частотою ω_0 . У цьому випадку рівняння руху приймають вигляд

$$\dot{x} = p, \quad \dot{p} = -\omega_0^2 \sin x. \quad (3.89)$$

Їх комбінація призводить до нелінійного рівняння \sin -Гордона

$$\ddot{x} + \omega_0^2 \sin x = 0. \quad (3.90)$$

В рамках методу фазової площини рівняння (3.89) приводять до фазового портрету, показаному на рис. 3.17.

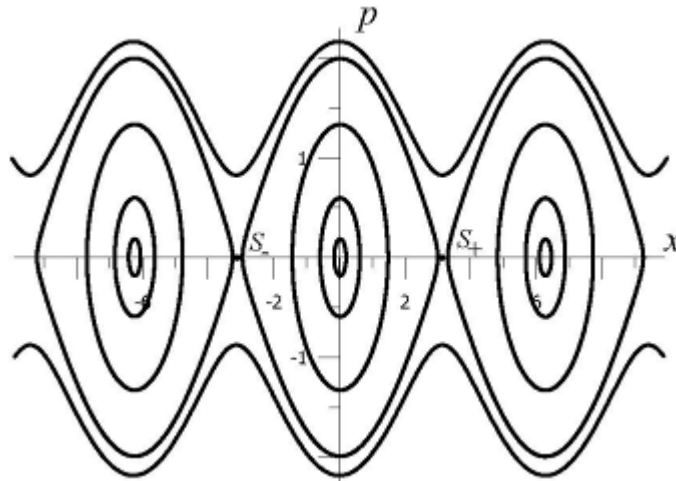


Рисунок 3.17 – Фазовий портрет нелінійного маятника (в точках $x = \pm 2\pi n$, $n = 0, 1, 2, \dots$ розташовані фокуси, а при $x = \pm\pi(1 + 2n)$ – сідла)

З рис. 3.17 видно, що поведінка системи визначається енергією системи H по відношенню до критичного значення $H_c \equiv 2\omega_0^2$. При $H < H_c$ рух обмежено кінцевою областю фазової площини, а з перевищенням критичної енергії зміна узагальненої координати стає необмеженою. Уявімо аналітичну картину такої поведінки.

Найбільш просто знайти сепаратрисне розв'язання, яке відповідає критичній енергії $H = H_c$, при якій визначення (3.88) дає

$$p = \pm 2\omega_0 \cos(x/2). \quad (3.91)$$

Тоді перше рівняння (3.89) приводить до закону руху

$$x = 4\arctan \exp(\pm\omega_0 t) - \pi, \quad (3.92)$$

в якому верхній і нижній знаки відповідають різним гілкам сепаратриси. Цій залежності можна надати більш елегантну форму $\cos(x/2) = [\cosh(\pm\omega_0 t)]^{-1}$, підстановка якої призводить до розв'язання

$$p = \pm 2\omega_0 \cosh(\omega_0 t) \quad (3.93)$$

в формі солітону, де вибір знака визначає напрямок його руху.

Використання змінних дія-кут дозволяє знайти загальне розв'язання рівнянь (3.89). З цією метою зручно ввести параметр

$$\kappa^2 \equiv 12H\omega_0^2 \equiv HH_c, \quad H_c \equiv 2\omega_0^2, \quad (3.94)$$

що приймає значення $\kappa = 1$ при критичній енергії $H = H_c$. Крім того, будемо використовувати змінну ξ , що визначається рівняннями

$$\sin \xi \equiv \begin{cases} \kappa^{-1} \sin(x/2) & \text{при } \kappa \leq 1, \\ \sin(x/2) & \text{при } \kappa \geq 1. \end{cases} \quad (3.95)$$

Тоді твірна функція виражається через неповні еліптичні інтеграли Якобі $F(\xi, \kappa)$, $E(\xi, \kappa)$, першого і другого порядків [283] наступними рівностями:

$$S(x, I) = 4\omega_0 \begin{cases} [E(\xi, \kappa) - (1 - \kappa^2)F(\xi, \kappa)] & \text{при } \kappa \leq 1, \\ \kappa E(\xi, 1/\kappa) & \text{при } \kappa \geq 1. \end{cases} \quad (3.96)$$

Їх диференціювання за дією I призводить до вираження для кута ϑ .

Що стосується дії $I \equiv 4S(\xi = \pi/2) / 2\pi$, то відповідно до рівності (3.96) воно виражається через повні еліптичні інтеграли Якобі $K(\kappa) \equiv F(\xi = \pi/2, \kappa)$, $E(\kappa) \equiv E(\xi = \pi/2, \kappa)$. На рис. 3.18 наведено вид цих інтегралів. Згідно рис. 3.19, залежність $I(H)$ дії від енергії виявляє монотонне зростання від $I = 0$ при $H = 0$ до нескінченності з логарифмічно слабким перегином при критичній енергії H_c .

З урахуванням властивостей еліптичних інтегралів [283-285] власна частота $\omega \equiv \dot{\vartheta}$, визначна першою рівністю (3.87), набуває вигляду

$$\omega = \frac{\pi \omega_0}{2 K(\bar{\kappa})} \begin{cases} 1 & \text{при } \kappa \leq 1, \\ \kappa & \text{при } \kappa \geq 1, \end{cases} \quad (3.97)$$

де прийнято позначення

$$\bar{\kappa} \equiv \begin{cases} \kappa & \text{при } \kappa \leq 1, \\ \kappa^{-1} & \text{при } \kappa \geq 1. \end{cases} \quad (3.98)$$

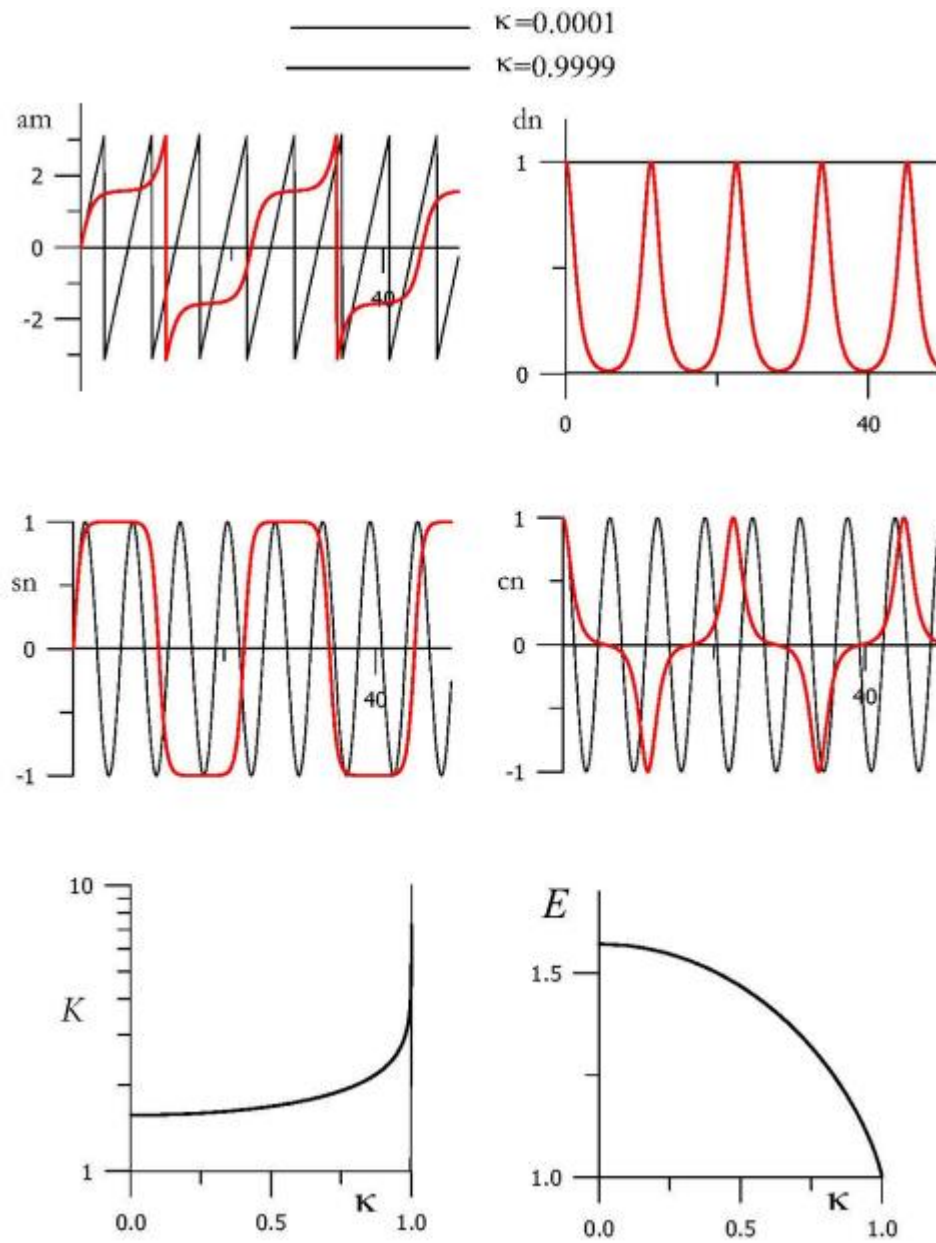


Рисунок 3.18 – Еліптичні функції й інтеграли Якобі

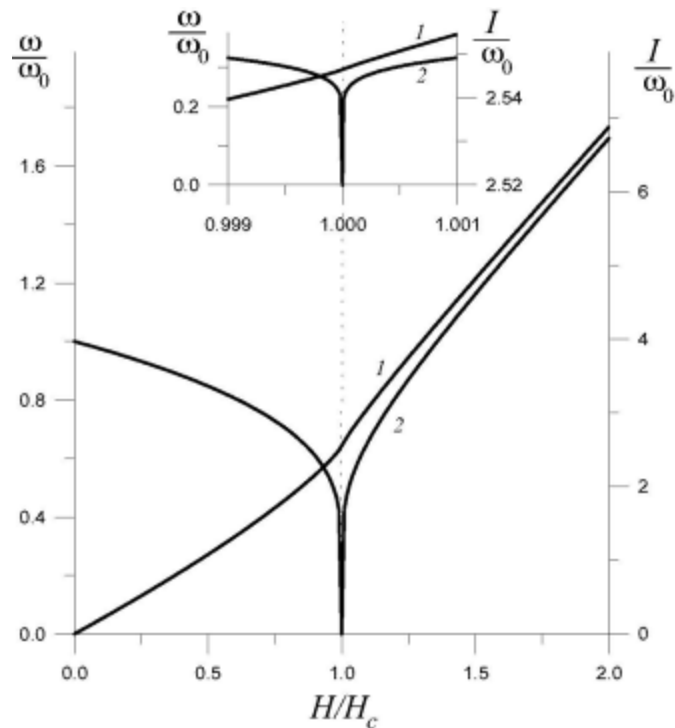


Рисунок 3.19 – Залежності дії I і власної частоти ω нелінійного маятника від енергії

Як видно з рис. 3.19, з ростом енергії від нуля до критичної величини $H = H_c$ власна частота ω спадає від затравочного значення ω_0 до $\omega = 0$, а після нескінченно вузького зламу знову зростає. З іншого боку, визначення (3.88), (3.95) дають тимчасову залежність імпульсу

$$p = \pm 2\omega_0 \kappa \begin{cases} \cos \xi = \text{cn}(t, \kappa) & \text{при } H \leq H_c, \\ \sqrt{1 - \kappa^{-2} \sin^2 \xi} = \text{dn}(t, \kappa^{-1}) & \text{при } H \geq H_c, \end{cases} \quad (3.99)$$

де $\kappa^2 \equiv H / H_c$; вирази $\text{cn}(t, \kappa)$, $\text{dn}(t, \kappa^{-1})$ представляють еліптичні функції Якобі, показані на рис. 3.18. Згідно (3.95), при критичному значенні $H = H_c$ рівності (3.99) приймають вигляд (3.91), (3.93).

Таким чином, наведена синергетична схема відповідає феноменологічній картині фазових переходів, тому з урахуванням особливостей схеми може бути застосована і до аналізу ЕІЛ.

3.4. Висновки до розділу

1. Дослідженні особливості проходження дифузійних процесів при електроіскровому легуванні. Показано, що шар, сформований на катоді, по глибині можна розділити на дві зони: зона, в якій відбувається перемішування рідких фаз матеріалів електродів («білий шар»), і зона, що лежить нижче зони перемішування, в якій елементи матеріалу анода переносяться в твердій фазі (дифузійна зона). Розподіл хімічних елементів електродів в кожній з цих зон визначається фізичними процесами, що відрізняються за своєю природою, але є залежними від кількості введеної в тіло енергії – від енергії розряду.

2. При ЕІЛ металевих поверхонь, залежно від природи анода, можливе формування два типи структур – тільки дифузійні шари без масоперенесення (наприклад, при цементації методом ЕІЛ) і з масоперенесенням (наприклад, алітування методом ЕІЛ).

3. Дифузійні шари методом ЕІЛ можна формувати, застосовуючи спеціальні технологічні середовища (СТС) регульованого складу, які наносять на катод у вигляді гелів, паст, обмазок тощо. При цьому, залежно від складу СТС, можна формувати тільки дифузійні шари, коли у вигляді анода використовують графіт (вуглець) і вводять до складу СТС такі легуючі елементи як вуглець, азот, сірка та ін. крім елементів металів. При цьому, змінений шар буде складатися з дифузійної зони різного хімічного і фазового складу залежно від коефіцієнтів дифузії дифундувальних елементів, і основи.

4. У випадку, коли ЕІЛ супроводжується масоперенесенням матеріалу анода в поверхню підкладки, або/і матеріалу СТС, що складається з порошків металів, структура отриманих покриттів буде складатися з трьох

ділянок: «білий шар», дифузійна зона і основний метал. Особливістю даного процесу є те, що в якості матеріалу анода застосовуються метали і сплави.

5. Запропонована математична модель прогнозування якісних параметрів поверхневого шару, яка дозволяє за енергетичними параметрами процесу ЕІЛ, прогнозувати якісні параметри отриманих покриттів, що сформувався за рахунок дифузійних процесів, а також дифузійних процесів і масопереносу під час ЕІЛ із застосуванням СТС.

6. Розглянутий випадок формування шару без масоперенесення матеріалу анода. Прикладом цього випадку може бути цементація, здійснювана методом ЕІЛ (ЦЕІЛ), коли у вигляді анода застосовують електрод-інструмент з графіту. Для підвищення якості ЦЕІЛ (збільшення товщини, суцільності та мікротвердості формованого шару), після нанесення першого шару на цементовану поверхню наносять СТС, що складається з порошку графіту і продовжують легування графітовим електродом.

7. Проаналізований випадок формування шару без масоперенесення матеріалу анода при формуванні багатокomпонентного покриття – карбонітрації, що здійснюється шляхом нанесення на оброблювану поверхню СТС, що містить азот та вуглець, а в якості анода застосовується електрод-інструмент з графіту.

8. Розглянутий випадок формування шару в умовах масопереносу матеріалу анода. Такі покриття формуються при ЕІЛ з використанням металевих анодів-інструментів. Наприклад, у випадку алітування з використанням СТС, що складається з алюмінієвої пудри та вазеліну, з подальшим ЕІЛ алюмінієвим електродом. Показано, що така технологія дозволить збільшити товщину зміненого шару, покращити суцільність покриття.

9. Запропонована фізично обґрунтована математична модель процесу втрати маси оброблюваних поверхонь при випробуваннях на жаростійкість, що

дозволяє за кількістю теплоти, що витрачається на нагрівання і витримку при температурі випробування, визначити втрати маси поверхні.

10. Запропоноване застосування синергетичних законів опису самоорганізації процесу ЕІЛ, на основі вивчення фазових переходів динамічних складових цього процесу за допомогою методу фазової площини і дослідженням розв'язання рівняння Ланжевена.

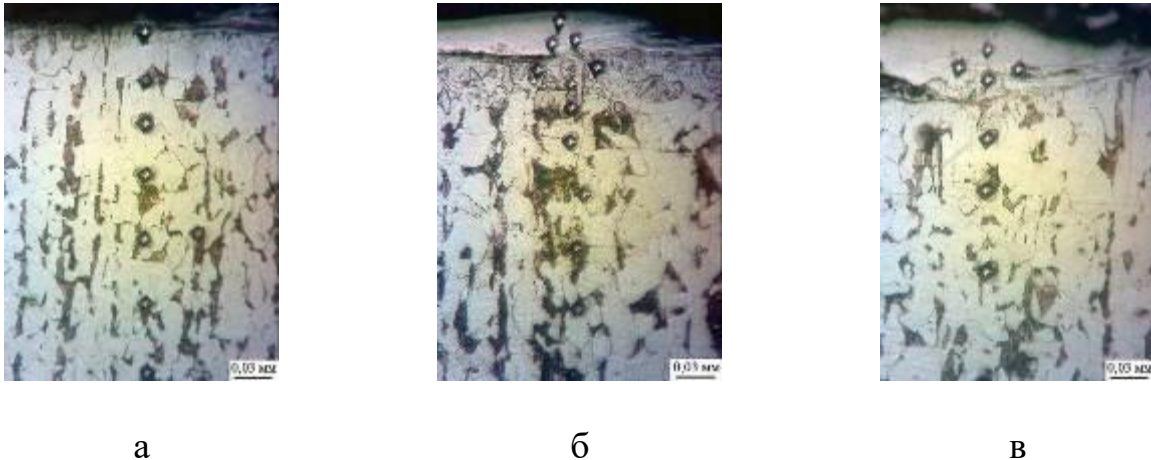
11. За матеріалами розділу опубліковані наступні роботи [149, 236, 251, 253-268].

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СТАНУ ОДНОКОМПОНЕНТИХ ПОКРИТТІВ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ

4.1. Аналіз якості алітованих поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ

Мікроструктури покриттів алюмінієм на сталі 20 в залежності від енергії розряду (W_p) показані на рис. 4.1.



а – $W_p = 0,52$ Дж, б – $W_p = 1,30$ Дж, в – $W_p = 2,6$ Дж

Рисунок 4.1 – Мікроструктури поперечного перерізу зразків зі сталі 20 з алюмінієвим покриттям, отриманим методом ЕІЛ

Металографічний аналіз отриманих покриттів показав, що мікроструктура складається з 3-х зон:

- 1) «білий шар» – шар, що не піддається травленню звичайними травителями;
- 2) перехідна зона або дифузійна зона;

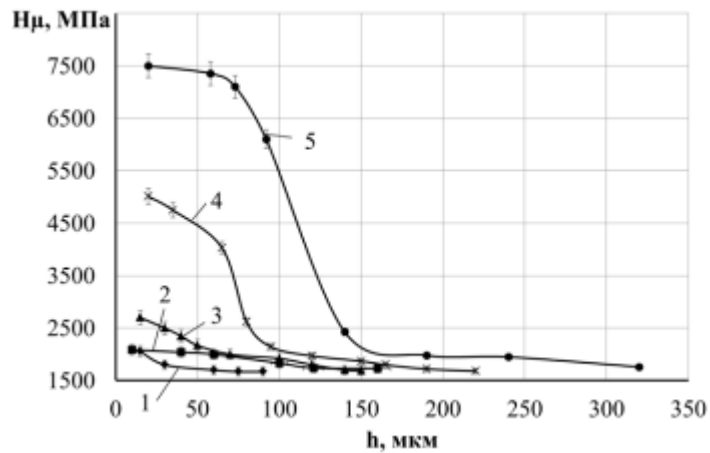
3) основний метал, що має феритну-перлітну структуру.

У таблиці 4.1 представлені розміри зон мікроструктури залежно від енергії розряду. При низьких режимах ЕІЛ ($W_p = 0,52$ Дж) формується тонкий шар перехідної зони товщиною 20-30 мкм, суцільність якої прагне до 100 %. Зустрічаються окремі ділянки «білого» шару (до 60 %) товщиною 10-12 мкм. Зі збільшенням енергії розряду товщина «білого шару» і перехідної зони збільшується. При $W_p = 1,30$ і $4,60$ Дж товщина «білого шару» і перехідної зони відповідно рівні 30-50 мкм, 30-40 мкм і 50-70 мкм, 40-60 мкм (табл. 4.1). З посиленням режиму ЕІЛ збільшується суцільність поверхневого шару. Так, при $W_p = 2,6$ Дж суцільність дифузійного шару прагне до 100 %, а «білого» шару до 85 %.

Таблиця 4.1 – Якісні параметри алітованих електроіскрових покриттів на сталі

Енергія розряду, Дж	Товщина, мкм		Мікротвердість, МПа		Шорсткість, мкм			Суцільність «білого» шару, %
	«білий» шар	перехідна зона	«білий» шар	«білий» шар	Ra	Rz	Rmax	
Сталь 20								
0,52	10-12	20-30	2000±70	1900±50	1,3	2,3	9,3	60
1,30	30-50	30-40	2050±70	1850±80	1,9	6,2	21,6	80
2,60	40-50	30- 50	2700±70	2000±200	3,3	9,3	23,2	85
4,60	50-70	40- 60	5010±90	2250±200	6,2	16,3	40,6	95
6,8	до 70	110- 130	7270±50	2370±70	9,0	18,1	58,3	100
Сталь 40								
0,52	10-15	10-20	2350±50	2000±50	1,6	3,0	8,1	50
2,60	30-70	30-70	3500±50	4500±50	1,9	4,1	11,6	70
6,8	60-130	130- 150	7400±70	2390±70	8,1	17,3	49,0	100

На рис. 4.2 представлені результати дюрOMETричного аналізу розподілу мікротвердості алітованих покриттів. Максимальна твердість досягається на поверхні і плавно знижується до мікротвердості основи 1600 – 1700 МПа. Мікротвердість зон покриття визначається енергетичними параметрами процесу ЕІЛ: чим більша енергія розряду, тим більш високу твердість має «білий шар» і, відповідно, перехідна зона. Така зміна мікротвердості обумовлюється дифузією алюмінію в підкладку, зміною структурно-фазового складу шару.



1 – $W_p = 0,52$ Дж, 2 – $W_p = 1,30$ Дж, 3 – $W_p = 2,6$ Дж, 4 – $W_p = 4,6$ Дж,
5 – $W_p = 6,8$ Дж

Рисунок 4.2 – Залежність мікротвердості від глибини шару для різних режимів обробки сталі 20

Аналіз діаграми стану залізо – алюміній показує [331], що в ЕІЛ-шарі ймовірне формування інтерметалідів, що підтверджується високою твердістю покриття. Також не можна виключати формування нітридів і оксидів [332], оскільки електроіскрове легування здійснювалося на повітрі. Дуже ймовірні невеликі об'єми чистого матеріалу електрода.

Для визначення фазового складу ЕІЛ покриттів проводили рентгеноструктурний аналіз. Дифрактограми, зняті з поверхні зразка після алітування при $W_p = 0,52$ Дж, тобто при «м'якому» режимі, вказують на

наявність дифракційних максимумів двох твердих розчинів на основі фази з ОЦК структурою – α -Fe і α -Fe' (229 просторова група) й оксиду алюмінію γ -Al_{2,67}O₄ (227 просторова група) (рис. 4.3). α -Fe і α -Fe' відрізняються тільки періодом ґратки, що, мабуть, є наслідком макронапружень, що виникають в результаті прискореного охолодження після процесу електроіскрової обробки (табл. 4.2).

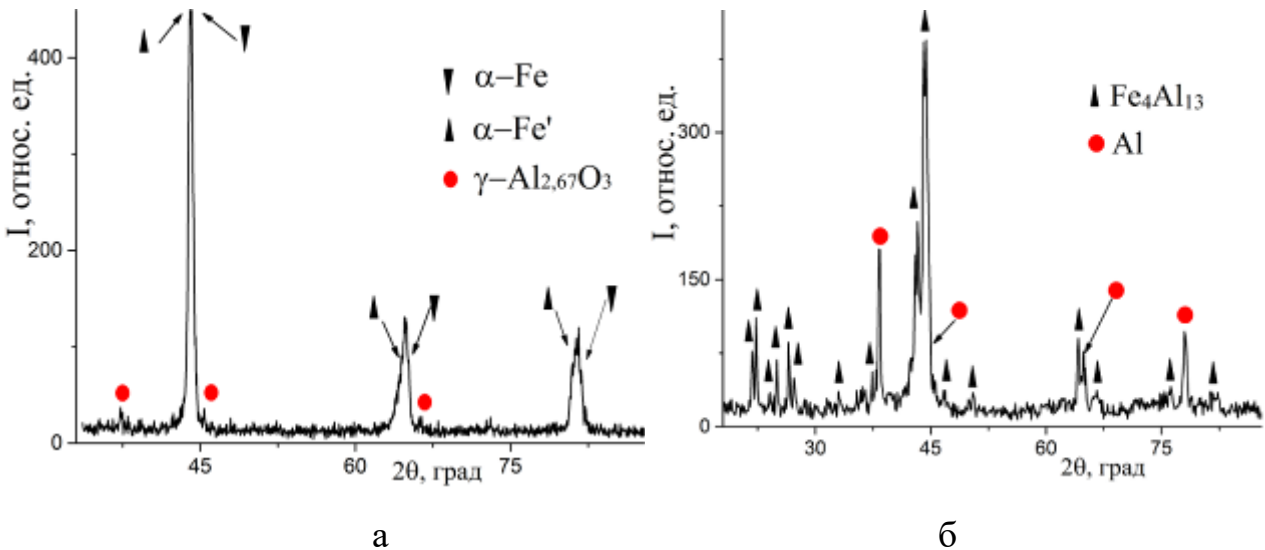


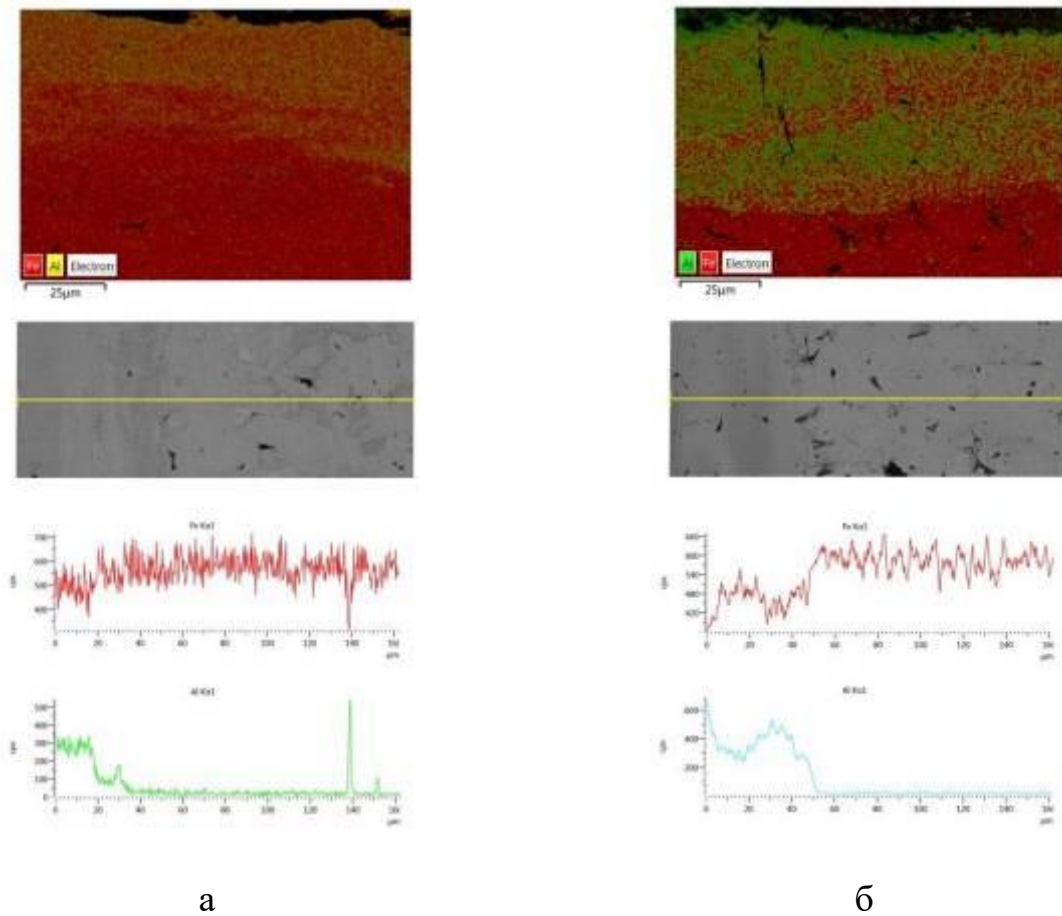
Рисунок 4.3 – Дифрактограми з поверхні сталі 20 після ЕІЛ алюмінієм на різних режимах обробки: а – $W_p = 0,52$ Дж, б – $W_p = 1,30$ Дж

З ростом енергії розряду з'являються нові фазові складові. Якщо при $W_p = 0,52$ Дж виникає тільки твердий розчин алюмінію в залізі і невелика кількість оксиду алюмінію, тому що процес ЕІЛ здійснювався на повітрі, то при $W_p = 1,30$ Дж створюються умови для утворення фази з моноклінної структурою – Fe₄Al₁₃ (12 просторова група) і чистого алюмінію (225 просторова група). Очевидно, поява інтерметалідних фаз і сприяє збільшенню твердості покриття зі збільшенням енергії розряду (рис. 4.2).

Нами, як і авторами робіт [333, 334] на парах Mo-Fe, Cu-Fe, показано, що збільшення енергії розряду сприяє зростанню товщини покриття і дифузійної зони між покриттям і підкладкою.

Таблиця 4.2 – Параметри кристалічних ґраток фаз і кількісний фазовий аналіз після алітування

Режим ЕІЛ	Фаза	Параметри кристалічних ґраток, Å	Вміст фаз, % за масою
$W_p = 0,52$ Дж	α -Fe	$a = 2,887$	36
	α -Fe'	$a = 2,907$	47
	γ -Al _{2,67} O ₄	$a = 7,980$	17
$W_p = 1,30$ Дж	Al	$a = 4,056$	19
	Fe ₄ Al ₁₃	$a = 15,403$; $b = 8,134$ $c = 12,473$; $\beta = 107,933$	81



а – $W_p = 0,52$ Дж, б – $W_p = 1,30$ Дж

Рисунок 4.4 – Концентраційні криві розподілу заліза і алюмінію в покритті після ЕІЛ

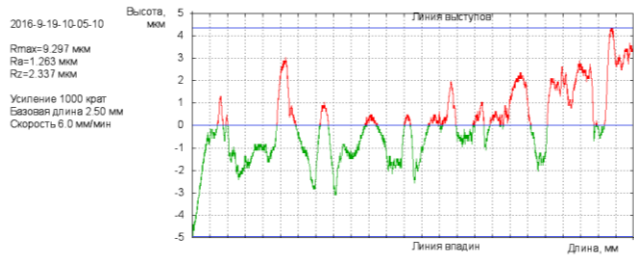
При значеннях $W_p = 0,52$ Дж і $W_p = 1,30$ Дж розміри дифузійної зони алюмінію в залізі становлять відповідно 34 і 50 мкм, зростає вміст алюмінію в залізі (рис. 4.4). Так, при $W_p = 1,30$ Дж на поверхні формується тонкий шар до 4 мкм, вміст алюмінію в якому приблизно у 1,5-2 рази більше. Наявність вільного алюмінію в шарі підтверджують дані рентгеноструктурного аналізу (табл. 4.2).

Аналіз вимірювання шорсткості поверхневого шару зразка сталі 20 після ЕІЛ алюмінієм показав, що з посиленням режиму збільшується шорсткість поверхні (табл. 4.1): при $W_p = 0,52$ Дж шорсткість становить $R_a = 1,3$; при $W_p = 2,60$ Дж – $R_a = 3,3$. Подальше збільшення енергії розряду до 6,8 Дж супроводжується значним збільшенням шорсткості поверхні: $R_{max} = 58,305$ мкм; $R_a = 9,039$ мкм і $R_z = 18,142$ мкм (рис. 4.5).

Металографічний аналіз алітованих покриттів на сталі 40 показав, що, так само як і на сталі 20 спостерігається формування 3-х зон (рис. 4.6). Необхідно відзначити, що при однакових умовах ЕІЛ на сталі 40 формуються зони більші за товщиною (табл. 4.1), що мають підвищену мікротвердість (рис. 4.7). Так, при ЕІЛ сталі 40 при $W_p = 2,60$ Дж товщина «білого шару» становить 30-70 мкм з твердістю 3500 ± 50 МПа, сталь 20 – 40-50 мкм з $H_c = 2700 \pm 70$ МПа. При збільшенні енергії розряду суцільність «білого» шару підвищується, а перехідного шару – прагне до 100% (табл. 4.1).

З посиленням режиму ЕІЛ збільшується глибина перехідної зони. При $W_p = 0,52$ Дж вона не виражена, тоді як при $W_p = 2,6$ Дж – становить близько 30-40 мкм і характеризується підвищеною твердістю близько 4500 МПа.

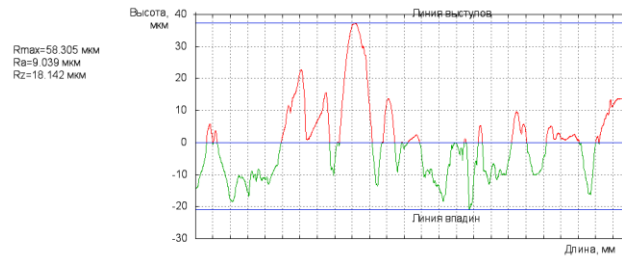
Причиною підвищення твердості перехідної зони можуть служити фазові перетворення, що відбуваються при нагріванні сталі вище критичних температур і прискореного охолодження на повітрі. На мікроструктурі чітко простежується ділянка неповної перекристалізації, яка для сталі 40 визначається нагріванням до температурного діапазону 730–755 °С. Метал на цій ділянці піддається частковій перекристалізації.



а



б



в

а – $W_p = 0,52$ ДЖ, б – $W_p = 2,6$ ДЖ, в – $W_p = 6,8$ ДЖ

Рисунок 4.5 – Профілограми шорсткості поверхні зразків сталі 20 після ЕІЛ алюмінієм



а



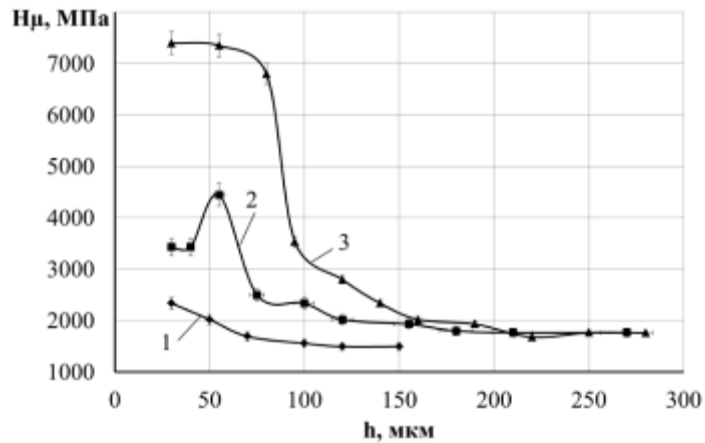
б



в

а – $W_p = 0,52$ ДЖ, б – $W_p = 2,6$ ДЖ, в – $W_p = 6,8$ ДЖ

Рисунок 4.6 – Мікроструктура поперечного перерізу зразків зі сталі 40 з алюмінієвим покриттям

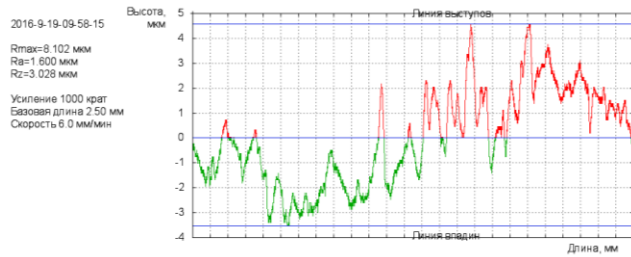


1 – $W_p = 0,52$ Дж, 2 – $W_p = 2,6$ Дж, 3 – $W_p = 6,8$ Дж

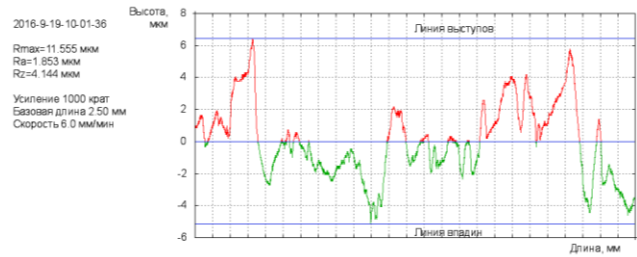
Рисунок 4.7 – Залежність мікротвердості від глибини шару для різних режимів обробки сталі 40

Поряд з зернами, що утворилися в результаті перекристалізації, присутні зерна вихідного металу. Незважаючи на прискорене охолодження після ЕІЛ (на повітрі) з огляду на невелику стійкість переохолодженого аустеніту сталі 40 не відбувається утворення структури голчастого типу (мартенситу), який в наслідок високої твердості і крихкості може привести до утворення тріщин. Тому можна припустити, що незважаючи на підвищення твердості поверхневого шару, зберігається його здатність до невеликих деформацій. Крім того, як і на сталі 20, в поверхневому шарі можливе утворення інтерметалідів, нітридів і оксидів, тому що процес ЕІЛ здійснювався на повітрі, що призводить до значного підвищення мікротвердості покриття і перехідної зони.

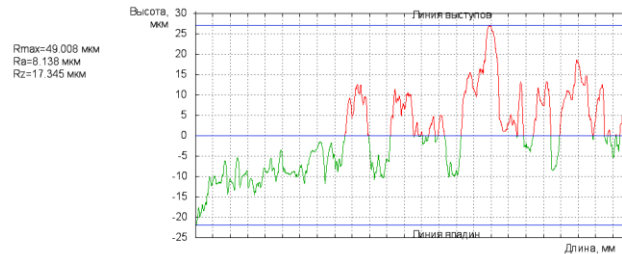
Аналіз вимірювання шорсткості поверхневого шару зразків сталі 40 після ЕІЛ алюмінієм показав, що з посиленням режиму ЕІЛ шорсткість поверхні збільшується. При $W_p = 0,52$ Дж максимальна шорсткість поверхні складає $R_{max} = 11,555$ мкм, а середня арифметична R_a і R_z , відповідно, 1,853 і 4,144 мкм (рис. 4.8).



а



б



в

а – $W_p = 0,52$ Дж, б – $W_p = 2,6$ Дж, в – $W_p = 6,8$ Дж

Рисунок 4.8 – Профілограми шорсткості поверхні зразків сталі 40 після ЕІЛ алюмінієм

Таким чином, при ЕІЛ алюмінієвим електродом сталі 20 і 40 зі збільшенням енергії розряду зростають такі якісні параметри поверхневого шару, як шорсткість, товщина, мікротвердість «білого» шару і перехідної зони (табл. 4.1). Суцільність «білого» шару при $W_p = 0,52$ Дж низька (50-60 %), при подальшому збільшенні енергії розряду зростає і при $W_p = 6,8$ Дж становить 100%.

В [142] для зменшення шорсткості електроерозійних покриттів пропонується проводити в якості заключної операції після основного процесу легування «м'яке» легування графітом. В цьому випадку утворюється не шар графіту, а деякий дифузний шар, причому відбувається викид металу катода в місцях прикладання імпульсів, тобто розпоршення найбільш виступаючих

частин поверхні. В результаті відбувається згладжування гребінців, і, отже, знижується шорсткість поверхні.

Нами для зниження шорсткості поверхні після ЕІЛ алюмінієвим електродом запропоновано проводити подальшу обробку цим же електродом (алюмінієм), але на менших режимах [264]. При цьому електричний розряд протікає між вершиною виступу шорсткості і алюмінієвим електродом, в результаті чого вершина виступу руйнується і знижується величина шорсткості поверхні. Показано [335, 336], що така технологія ЕІЛ є ефективною.

У табл. 4.3 наведені відомості про продуктивність процесу при ЕІЛ вуглецем (графітовим електродом) і алюмінієм сталевих зразків, попередньо легованих алюмінієм, залежно від енергії розряду.

Таблиця 4.3 – Залежність продуктивності ЕІЛ сталевих зразків вуглецем і алюмінієм після алітування

Енергія розряду (W_p), Дж	0,52	1,3	2,6	4,8
Продуктивність, $\text{см}^2/\text{хв}$				
ЕІЛ алюмінієм	0,8-1,0	1,0-1,2	1,3-1,5	1,6-1,8
ЕІЛ графітовим електродом	0,5-0,7	0,7-1,0	1,0-1,2	1,2-1,5

На рис. 4.9 подані результати вимірювання шорсткості поверхні зразка зі сталі 20, який піддавався алітуванню методом ЕІЛ спочатку з енергією розряду $W_p = 2,6$ Дж і продуктивності $1,8 \text{ см}^2/\text{хв}$, а потім, з $W_p = 1,3$ Дж і продуктивністю $0,8 \text{ см}^2/\text{хв}$. В результаті шорсткість поверхні знизилася і склала: $R_{\text{max}} = 9,297$; $R_a = 1,263$ і $R_z = 2,337$ мкм.

Відомо, що алітовані покриття забезпечують залізовуглецевим сплавам підвищену жаростійкість. У зв'язку з цим, актуальним завданням є дослідження жаростійкості алітованих покриттів, отриманих ЕІЛ. В якості підкладки використовували сталь 20, ЕІЛ шари отримували за два проходи, спочатку з

енергією розряду $W_p = 2,6$ Дж і продуктивністю $1,8 \text{ см}^2 / \text{хв}$, а потім, з $W_p = 1,3$ Дж і продуктивністю $0,8 \text{ см}^2 / \text{хв}$. Як показали дослідження, після такої обробки формуються якісні покриття (суцільність 100 %) з низькою шорсткістю (табл. 4.1, рис. 4.5).

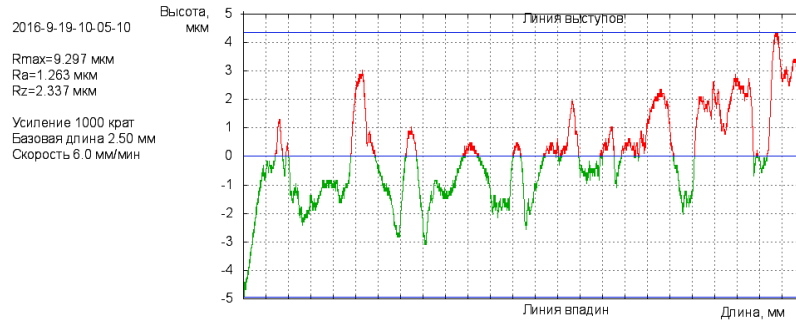
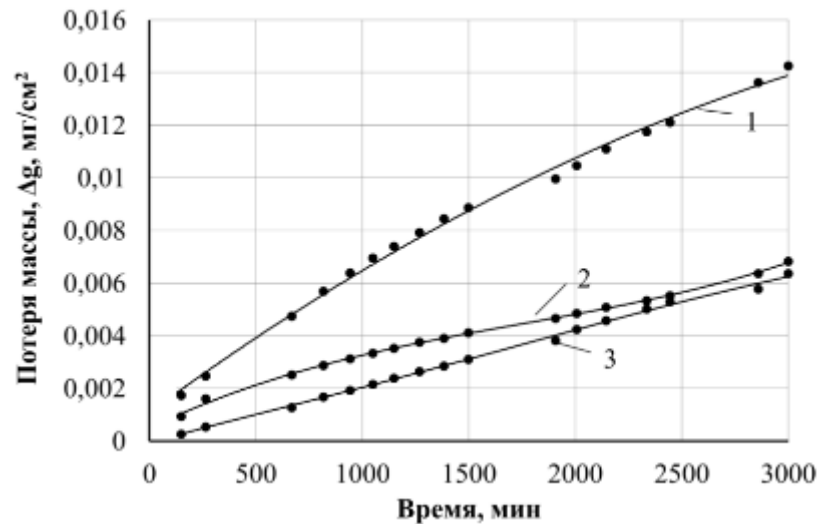


Рисунок 4.9 – Профілограми шорсткості поверхні зразка зі сталі 20 при послідовному алітуванні методом ЕІЛ алюмінієм з енергією розряду $W_p = 2,6$ і $1,3$ Дж

Для порівняльної оцінки показників жаростійкості (Δg – втрата маси на одиницю площі поверхні випробуваних зразків, $\text{мг} / \text{см}^2$) випробовувалися зразки зі сталі 20 після класичної технології алітування (алітування в розплаві алюмінію, докладно описаної у [337]) і без покриття. Випробування, проведені на повітрі при температурі $980 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 50 годин показали, що ЕІЛ покриття характеризуються високою жаростійкістю, навіть дещо вищою, ніж після класичної технології алітування в розплаві, що дає можливість рекомендувати технологію ЕІЛ алюмінієвим електродом з метою підвищення стійкості сталі до окиснення при підвищених температурах (рис. 4.10).

Проведені металографічні дослідження характеру окиснення зразків після випробування на жаростійкість. На всіх зразках спостерігається наявність оксидних включень, особливо інтенсивно окислились зразки без захисного



1 – без покриття; 2 – алітування методом ЕІЛ;
3 – алітування в розплаві алюмінію

Рисунок 4.10 – Жаростійкість алітованих покриттів на сталі 20 (випробування на повітрі при 980 °С, 50 год)



а

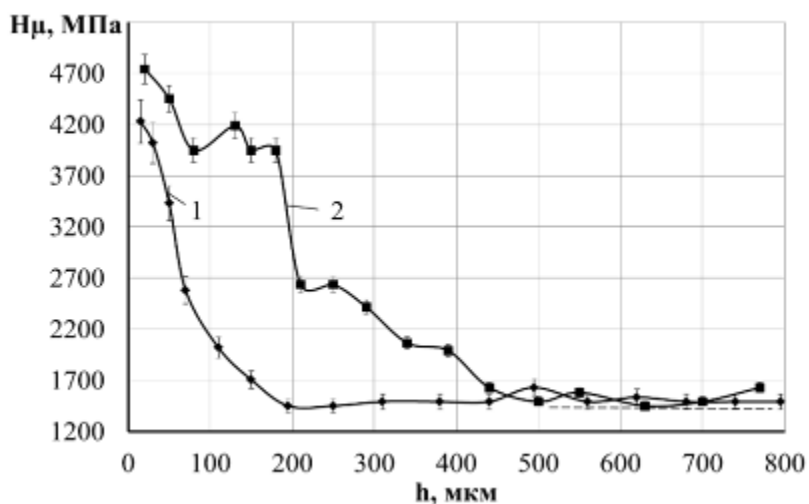
б

в

г

а – без покриття (нетравлений шліф); б – алітування в розплаві алюмінію (нетравлений шліф); в – алітування в розплаві алюмінію (після травлення в 3-5% розчині HNO_3); г – алітування методом ЕІЛ (після травлення у 3-5% розчині HNO_3)

Рисунок 4.11 – Мікроструктури алітованих покриттів на сталі 20 після випробування на жаростійкість (випробування на повітрі при 980 °С, 50 год)



1 – алітування ЕІЛ; 2 – алітування в розплаві алюмінію

Рисунок 4.12 – Мікротвердість алітованих покриттів на сталі 20 після випробування на жаростійкість (випробування в повітрі при 980 °С, 50 год)

покриття (рис. 4.11, а). Поверхневий шар після рідинного алітування крім дифузійної зони містить на поверхні зону з алюмінію, що залишився після припинення процесу алітування. Про це свідчать дюрOMETричні дослідження.

Після випробування на жаростійкість (рис. 4.11, б) спостерігається окислення металу під покриттям, про що свідчить наявність окисного прошарку, який відділяє поверхневий шар і основу. Очевидно, подібний характер руйнування покриття і, отже, окислення основного металу призводить до зменшення маси зразків при високотемпературних випробуваннях (рис. 4.10).

На зразках з алітованим покриттям, отриманим методом ЕІЛ, спостерігається зменшення товщини «білого» шару (рис. 4.11, г), отже при високотемпературних випробуваннях відбувається руйнування поверхневого шару, і втрата маси пов'язана з фізико-хімічними процесами, що відбуваються переважно в поверхневому шарі, а не в основному металі. Крім того, незважаючи на окиснення, поверхневий шар зберігає підвищену твердість (рис. 4.12).

Отже, алітовані покриття, отримані в розплаві алюмінію і методом ЕІЛ, зберігають підвищену твердість, захищають від окислення основний метал, про що свідчить менша кількість оксидів в приповерхневому шарі основного металу (рис. 4.11).

Таким чином, проведений аналіз особливостей структуро- та фазоутворення поверхневих шарів вуглецевих сталей після алітування методом ЕІЛ показав, що структура шару складається з трьох ділянок: «білого» шару, дифузійної зони і основного металу. Зі збільшенням енергії розряду зростають такі якісні параметри поверхневого шару, як товщина, мікротвердість «білого» шару і перехідної зони, шорсткість. Суцільність «білого» шару при $W_p = 0,52$ Дж низька (50-60%), при подальшому збільшенні енергії розряду зростає і при $W_p = 6,8$ Дж становить 100%. При збільшенні енергетичних параметрів процесу ЕІЛ відбувається зміна хімічного і фазового складу шару: при низьких енергіях розряду формується шар, що складається переважно з α -Fe і оксидів алюмінію. Зі збільшенням W_p шар складається з інтерметалідів заліза і алюмінію, а також вільного алюмінію, що підтверджується даними локального мікрорентгено-спектрального аналізу.

Порівняльний аналіз впливу підкладки на якісні параметри поверхневого шару при алітуванні методом ЕІЛ показав, що при заміні сталі 20 на сталь 40 збільшується товщина «білого» шару і перехідної зони, тобто глибина зони підвищеної твердості, а також величина її мікротвердості. Шорсткість поверхні практично не змінюється.

Для практичного застосування можна рекомендувати процес алітування методом ЕІЛ, використовуючи режими (енергію розряду в межах $W_p = 4,6-6,8$ Дж і продуктивність $2,0-3,0$ см² / хв), які забезпечують формування «білого» шару товщиною 70-130 мкм, мікротвердістю 5000-7500 МПа, шорсткістю (Ra) 6-9 мкм і суцільністю 95-100%.

З метою зниження шорсткості поверхневого шару і отримання суцільних покриттів рекомендується проводити ЕІЛ цим же електродом (алюмінієм), але на менших режимах.

Порівняльні дослідження жаростійкості алітованих покриттів, отриманих за класичною технологією (в розплаві алюмінію) і ЕІЛ алюмінієвим електродом показав, що електроіскрові покриття характеризуються високою жаростійкістю. Проведений металографічний аналіз характеру окиснення зразків після випробування на жаростійкість свідчить про те, що після випробування основний метал окиснюється, про що свідчить наявність оксидів в поверхневому шарі. Особливо інтенсивно окислюються зразки без захисного покриття. Алітовані покриття, отримані в розплаві алюмінію і методом ЕІЛ, зберігають підвищену твердість, захищають від окиснення основний метал, про що свідчить менший вміст оксидів в при поверхневому шарі основного металу і достатня твердість покриття. Результати дослідження дають можливість рекомендувати технологію ЕІЛ алюмінієвим електродом з метою підвищення стійкості сталі до окиснення при підвищених температурах.

4.2. Аналіз якості цементованих поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ

Для досліджень використовували дві серії зразків.

У першій серії зразки обробляли за традиційною технологією – на одному режимі і з однаковою продуктивністю при ЦЕІЛ компактним електродом-інструментом [143, 338].

У другій серії зразки обробляли поетапно:

– на першому етапі здійснювали ЦЕІЛ поверхні зразка компактним електродом-інструментом, відповідно до обраної енергії розряду і з продуктивністю $1 \text{ см}^2 / \text{хв}$;

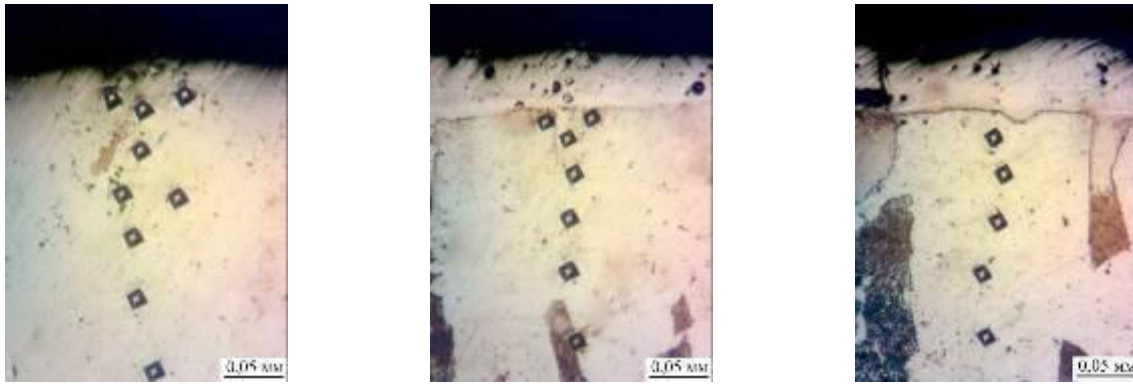
– на другому етапі на сформовану на першому етапі поверхню деталі наносили, ретельно втираючи, порошок графіту у вигляді суспензії, виготовленої у співвідношенні $\sim 80\%$ порошку графіту і 20% вазеліну. При збільшенні вмісту порошку графіту знижується його змочування вазеліном (прилипання) і утримування його на поверхні зразка;

– на третьому етапі, не чекаючи висихання, проводили ЦЕІЛ компактним електродом-інструментом, сформованої на другому етапі поверхні, причому на тому ж режимі і з такою ж продуктивністю, як на першому етапі.

На рисунку 4.13 зображені мікроструктури (а-в) і розподіл мікротвердості за товщиною шару (Γ) зразків сталі 20 першої серії після ЦЕІЛ з $W_p = 0,9; 2,6$ і $4,6$ Дж. Параметри якості поверхневого шару зведені до табл.4.4.

Проведений металографічний аналіз показав, що мікроструктури після ЦЕІЛ складаються з 3-х зон: верхній «білий» шар, що не травиться у реактиві, дифузійна зона і основа з ферито-перлітною структурою, що відповідає сталі 20. Необхідно відзначити, що зі збільшенням енергії розряду товщина і суцільність «білого» шару збільшуються (табл. 4.4).

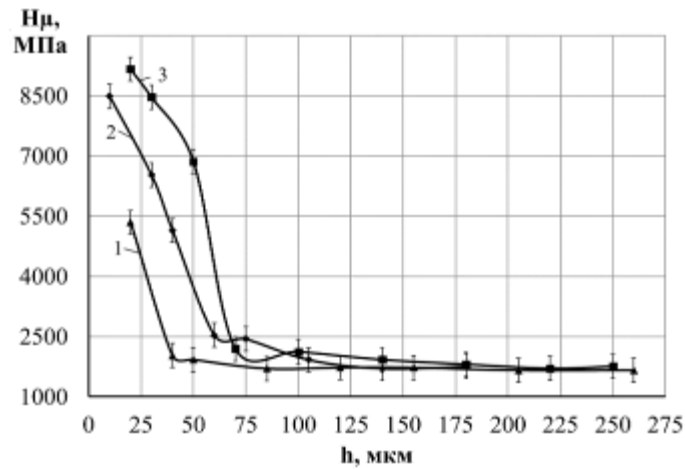
Результати дюрOMETричних досліджень свідчать про те, що максимальна мікротвердість визначається на зразках після ЦЕІЛ, оброблених при енергії розряду $W_p = 4,6$ Дж – 8492 МПа. Порівнюючи вплив традиційної та досліджуваної технологій ЦЕІЛ на якісні параметри поверхневого шару необхідно відзначити, що після обробки поверхні за пропонованою технологією ЦЕІЛ зменшується шорсткість поверхні. Так, після традиційної ЦЕІЛ при $W_p = 4,6$ Дж шорсткість поверхні складає $Ra = 8,3-9,0$ мкм, а після пропонованої – $Ra = 3,2-4,8$ мкм. Відомо [146], що при проходженні між електродами одиничного електричного імпульсу на поверхні катода (зразка) утворюється лунка з краями, дещо піднятими над первинною поверхнею металу. Розміри лунки і кількість перенесеного матеріалу в основному залежать від електроерозійної стійкості матеріалу електродів та енергії одиничного імпульсу.



а

б

в



г

а – $W_p = 0,9$ Дж; б – $W_p = 2,6$ Дж; в – $W_p = 4,6$ Дж;

на графіку (г): 1 – $W_p = 0,9$ Дж; 2 – $W_p = 2,6$ Дж; 3 – $W_p = 4,6$ Дж

Рисунок 4.13– Мікроструктури (а-в) і розподіл мікротвердості (г) зразка сталі 20 першої серії після ЦЕІЛ

На підставі викладеного можна схематично, але з великим ступенем вірогідності, описати процес утворення покриття на оброблюваній поверхні при іскровому електричному розряді. Спочатку оброблювана поверхня покривається лунками. При цьому кожний наступний розряд проходить через край лунки (найбільш виступаючу частину поверхні), так як контактуюча площа легуючого електрода завжди перевищує діаметр утворюваної лунки. Усі наступні електричні імпульси попадають на вже оброблену поверхню, викликаючи значно менший виплеск металу з катода.

Таблиця 4.4 – Зведена таблиця параметрів якості поверхні зразків сталі 20 після ЦЕІЛ

Енергія розряду, W_p , Дж	Товщина «білого» шару, мкм	Мікротвердість «білого» шару, МПа	Суцільність «білого» шару, %	Шорсткість поверхні, R_a , мкм
ЦЕІЛ традиційним способом (перша серія)				
0,9	15-30	5347	50-60	0,8-0,9
2,6	30-60	9168	70-80	5,1-6,7
4,6	25-60	8492	70-80	8,3-9,0
ЦЕІЛ пропонуваним способом (друга серія)				
0,9	50-70	9932	100	0,9-1,0
2,6	80-100	10796		2,8-3,7
4,6	100-230	10796		3,2-4,8

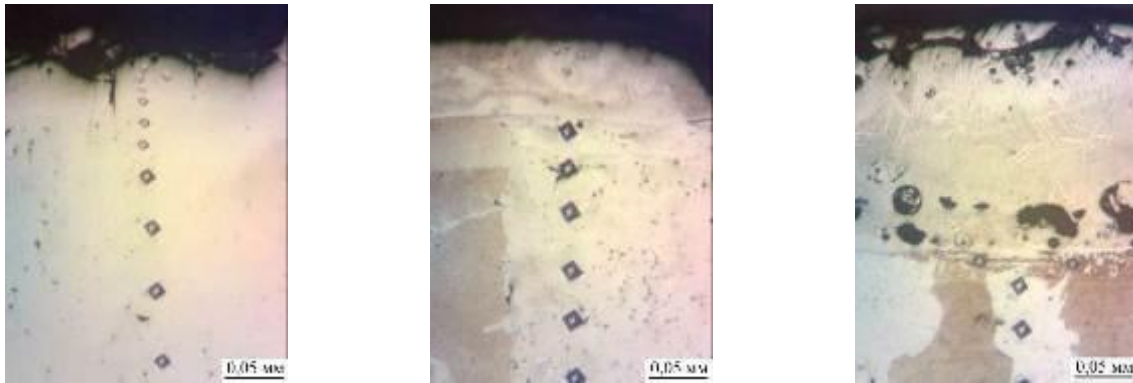
Сутність процесу не змінюється і тоді, коли матеріал анода не утворює покриття, наприклад коли анодом є графіт. В цьому випадку, дифузія матеріалів досить велика і також відбувається суттєва зміна вихідних фізико-хімічних властивостей оброблюваної поверхні [146].

Таким чином, при традиційному способі, при використанні будь-якого режиму, на самому початку процесу ЦЕІЛ на оброблюваній поверхні зразка (деталі) підвищується шорсткість і при цьому кожний наступний розряд проходить через найбільш виступаючу частину поверхні, а поверхня між виступами шорсткостей не піддається легуванню вуглецем. Звідси невисока суцільність, глибина дифузії вуглецю і зони підвищеної твердості (табл. 4.4).

Інша картина в пропонуваному способі. На другому етапі западини між виступами шорсткостей заповнюються порошком графіту і вже на третьому етапі процес ЕІЛ протікає не тільки по виступах шорсткостей, а й по поверхні з нанесеного на другому етапі порошку графіту, що збільшує суцільність легованого шару до 100% (рис. 4.14). Крім того, повторна ЦЕІЛ на третьому етапі пропонуваної технології призводить до насичення сталі вуглецем, збільшення глибини дифузії вуглецю порівняно з традиційною ЦЕІЛ (рис. 4.15),

і в умовах прискореного охолодження після ЦЕІЛ «білий» шар має більш високу мікротвердість (9932 МПа), що зберігається на відстані до 50-70 мкм від поверхні (табл. 4.4).

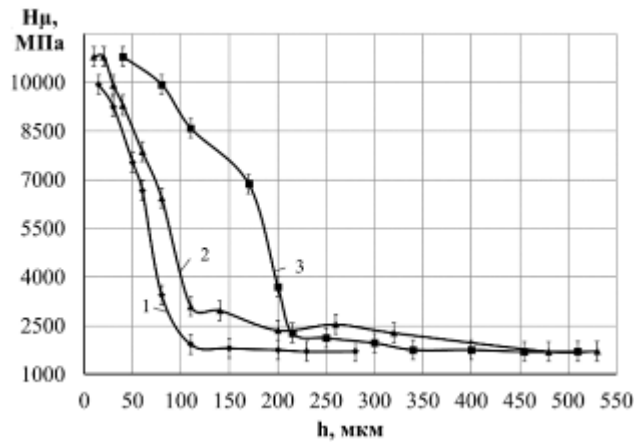
При заміні матеріалу підкладки, сталі 20 на сталь 40Х, якісно показники поверхневого шару не змінюються (табл. 4.5). Однак, мікротвердість «білого» шару, його товщина збільшується.



а

б

в

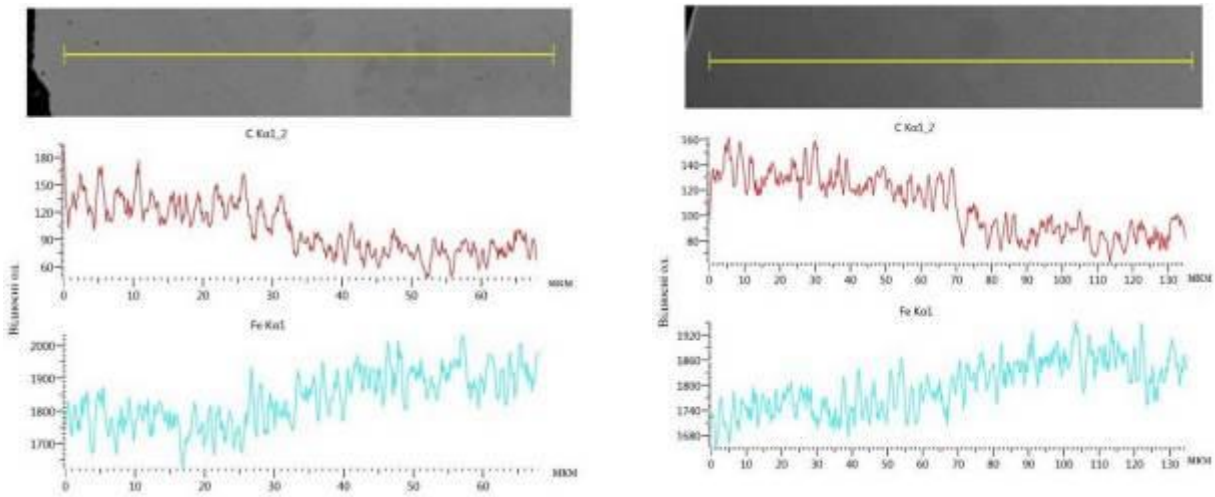


г

а – $W_p = 0,9$ Дж; б – $W_p = 2,6$ Дж; в – $W_p = 4,6$ Дж; на графіку (г):

1 – $W_p = 0,9$ Дж; 2 – $W_p = 2,6$ Дж; 3 – $W_p = 4,6$ Дж

Рисунок 4.14– Мікроструктури (а-в) і розподіл мікротвердості (г) зразка сталі 20 другої серії після ЦЕІЛ



а б
а – зразок першої серії; б – зразок другої серії

Рисунок 4.15 – Розподіл елементів в поверхневому шарі зразків зі сталі 20 після ЦЕІЛ при енергії розряду $W_p = 0,9$ Дж

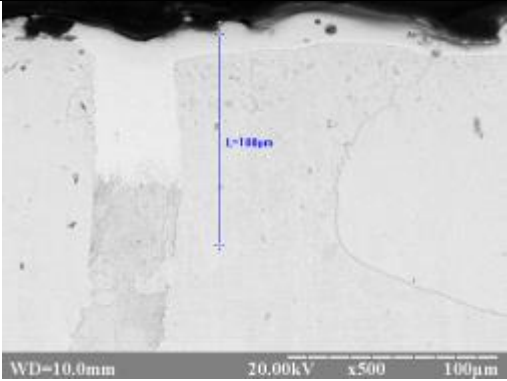
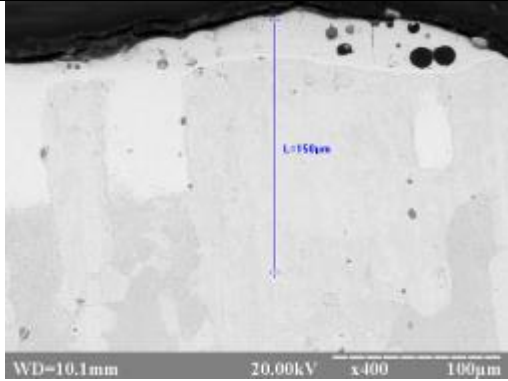
Таблиця 4.5 – Зведена таблиця параметрів якості поверхні зразків сталі 40Х після ЦЕІЛ

Енергія розряду, W_p , Дж	Товщина «білого» шару, мкм	Мікротвердість «білого» шару, МПа	Суцільність «білого» шару, %	Шорсткість поверхні, Ra, мкм
ЦЕІЛ традиційним способом (перша серія)				
0,9	25-40	5576-4243	50-60	0,9-1,1
2,6	40-70	8675-6538	70-80	5,4-6,3
4,6	55-80	8468-6976	70-80	8,5-9,2
ЦЕІЛ пропонованим способом (друга серія)				
0,9	60-80	11351-7303	100	0,9-1,0
2,6	90-110	11787-6962		2,6-3,8
4,6	130-240	118239-7659		3,5-4,7

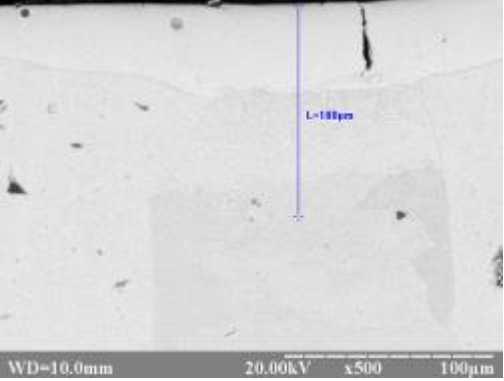
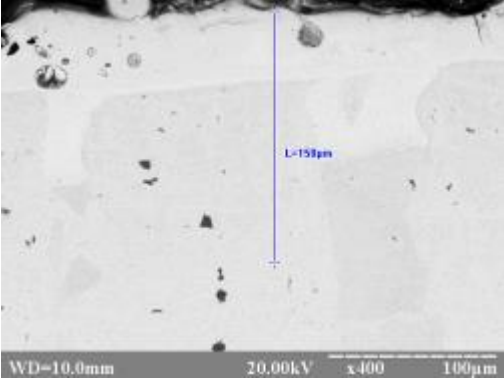
Досліджено вплив пропонованої технології ЕІЛ на кількість вуглецю в цементованому шарі (табл. 4.6-4.8). На поверхні формується шар з вмістом вуглецю до 0,86 %. Необхідно відмітити, що у приповерхневому шарі покриття формуються невелика кількість ділянок у вигляді пор, в яких міститься графіт

(табл. 4.8). На нашу думку, вільний графіт буде позитивно пливати на антифрикційні властивості оброблених поверхонь під час тертя.

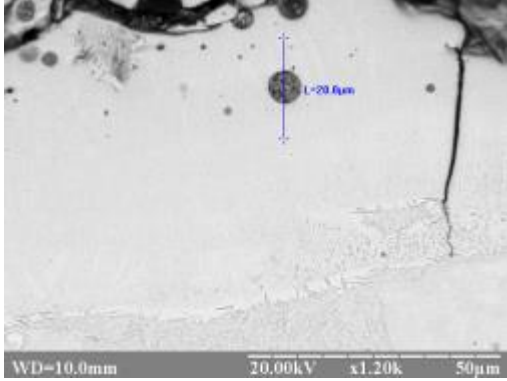
Таблиця 4.6 – Елементний склад покриття на сталі 20 в характерних точках

Зображення у відображених електронах, крок сканування 10 мкм									
 <p>$W_p = 0,9$ Дж</p>					 <p>$W_p = 2,6$ Дж</p>				
№	C	Fe	Mn	Si	№	C	Fe	Mn	Si
1	0.82	98.41	0.46	0.31	1	0.86	98.41	0.48	0.25
2	0.64	98.55	0.48	0.33	2	0.73	98.44	0.55	0.28
3	0.55	98.63	0.51	0.31	3	0.73	98.62	0.42	0.23
4	0.56	98.7	0.55	0.19	4	0.53	98.8	0.41	0.26
5	0.46	98.8	0.44	0.3	5	0.47	98.89	0.4	0.24
6	0.4	98.96	0.45	0.19	6	0.44	98.96	0.41	0.19
7	0.31	99.04	0.4	0.25	7	0.38	98.91	0.47	0.24
8	0.23	98.97	0.51	0.29	8	0.43	98.84	0.46	0.27
9	0.12	99.19	0.47	0.22	9	0.35	98.99	0.38	0.28
10	0.26	99.11	0.42	0.21	10	0.29	99.03	0.43	0.25
11	0.09	99.17	0.48	0.26	11	0.19	99.09	0.5	0.22

Таблиця 4.7 – Елементний склад покриття на сталі 40Х в характерних точках

Зображення у відображених електронах, крок сканування 10 мкм									
 <p style="text-align: center;">$W_p = 0,9$ Дж</p>					 <p style="text-align: center;">$W_p = 2,6$ Дж</p>				
№	C	Fe	Mn	Si	№	C	Fe	Mn	Si
1	0.76	98.56	0.48	0.2	1	0.75	98.53	0.45	0.27
2	0.75	98.61	0.4	0.24	2	0.73	98.65	0.4	0.22
3	0.77	98.53	0.42	0.28	3	0.61	98.74	0.45	0.2
4	0.55	98.72	0.44	0.29	4	0.51	98.78	0.47	0.24
5	0.42	98.91	0.42	0.25	5	0.5	98.73	0.49	0.28
6	0.52	98.84	0.41	0.23	6	0.45	98.81	0.41	0.33
7	0.35	98.9	0.48	0.27	7	0.47	98.76	0.47	0.3
8	0.24	99.04	0.46	0.26	8	0.41	98.83	0.47	0.29
9	0.22	99.13	0.4	0.25	9	0.39	98.97	0.42	0.22
10	0.2	99.08	0.48	0.24	10	0.37	98.85	0.5	0.28
11	0.17	99.18	0.45	0.2	11	0.31	98.94	0.42	0.33
						0.35	98.84	0.5	0.31

Таблиця 4.8 – Елементний склад ділянки покриття на сталі 40Х



Зображення у відображених електронах, крок сканування 5 мкм

$W_p = 0,9$ Дж

№	C	Fe	Mn	Si
1	0.76	98.67	0.35	0.22
2	0.74	98.5	0.47	0.29
3	3.55	76.95	18.29	1.22
4	0.82	98.52	0.34	0.32
5	0.72	98.41	0.58	0.29

Таким чином, експериментально апробовані два способи ЦЕІЛ: традиційна технологія, яка полягає в ЕІЛ поверхні компактним графітовим електродом-інструментом на одному режимі і з однаковою продуктивністю ЦЕІЛ, і пропонується. Сутність пропонованої технології полягає в тому, що зразки оброблялися поетапно: на першому етапі здійснюється ЦЕІЛ поверхні зразка, відповідно до обраної енергії розряду і з продуктивністю $1 \text{ см}^2 / \text{хв}$; на другому етапі на сформовану на першому етапі поверхню деталі наносять, ретельно втираючи, порошок графіту у вигляді суспензії, виготовленої у співвідношенні $\sim 80\%$ порошку графіту і 20% вазеліну; на третьому етапі, не чекаючи висихання, проводять ЦЕІЛ, сформованої на другому етапі поверхні, причому на тому ж режимі і з такою ж продуктивністю, як і на першому етапі.

Дослідження показали, що мікроструктури після традиційної ЦЕІЛ складаються з 3-х зон: верхній «білий» шар, що не піддається хімічному травленню, дифузійна зона і основа з ферито-перлітною структурою, що відповідає сталі 20. ДюрOMETричні дослідження свідчать про те, що зі збільшенням енергії розряду збільшується мікротвердість і товщина підвищеної твердості. Максимальна мікротвердість після ЦЕІЛ при $W_p = 4,6 \text{ Дж}$ 8492 МПа.

Порівняльний аналіз якісних параметрів шару після традиційної і пропонованої технологій ЦЕІЛ показав, що після обробки поверхні за пропонованою технологією зменшується шорсткість поверхні. Так, після традиційної ЦЕІЛ при $W_p = 4,6 \text{ Дж}$ шорсткість поверхні складає $R_a = 8,3-9,0$ мкм, а після пропонованої – $R_a = 3,2-4,8$ мкм. При цьому збільшується суцільність легованого шару до 100%, до 80 мкм збільшується глибина дифузійної зони вуглецю, а також мікротвердість «білого» шару і його товщина, до 9932 МПа і до 230 мкм відповідно.

Досліджено вплив пропонованої технології ЕІЛ на кількість вуглецю в цементованому шарі. На поверхні формується шар з вмістом вуглецю до 0,86 %. У приповерхневому шарі покриття формуються невелика кількість ділянок у вигляді пор, в яких міститься графіт. Очевидно, вільний графіт буде позитивно впливати на антифрикційні властивості оброблених поверхонь під час тертя.

4.3. Аналіз якості сульфидованих поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ

На рис. 4.16 показана топографія поверхні сформованого шару з вибраними трьома характерними ділянками (1 - гладка поверхня, 2 - шорстка поверхня, 3 - пора). Спектр поверхні і поелементний склад, як у характерних точках, так і всієї досліджуваної поверхні, показаний, відповідно, на рис. 4.17 і табл. 4.9. Розподіл елементів по мірі поглиблення від поверхні при кроці сканування 15 мкм, згідно рис. 4.18, представлено в табл. 4.10.

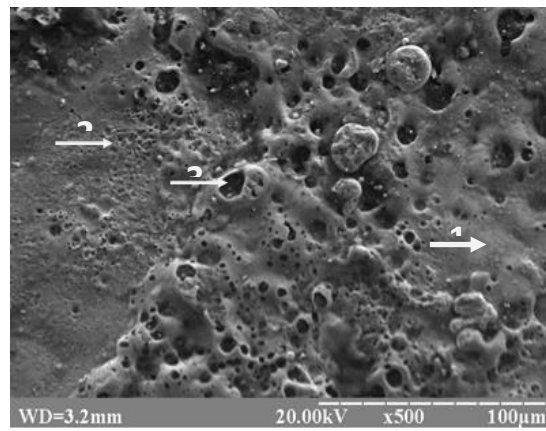
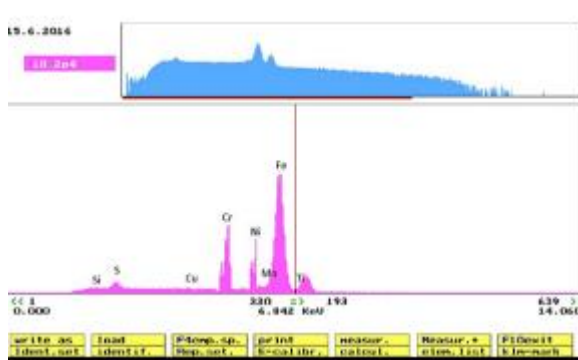
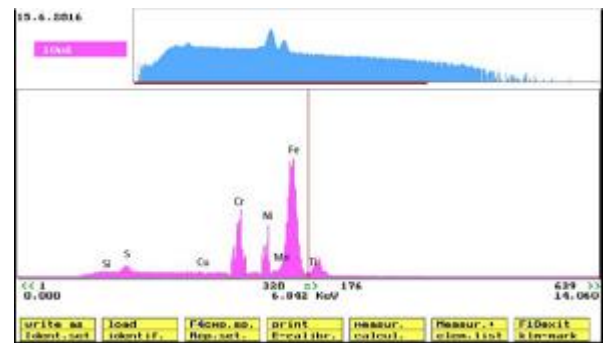


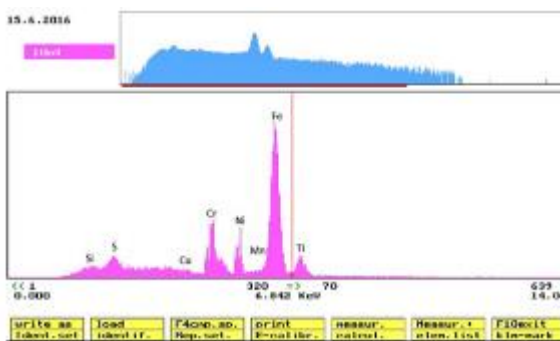
Рисунок 4.16 – Топографія ділянки поверхні сталі 20 після сульфидування методом ЕІЛ



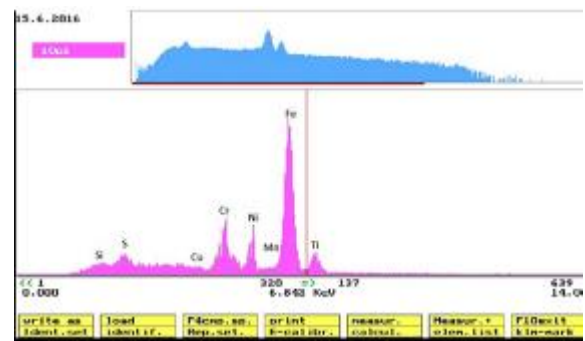
а



б



в



г

а – гладкої поверхні, б – шорсткої поверхні, в – пори, г – всієї поверхні.

Рисунок 4.17 – Спектри з поверхні покриття

Таблиця 4.9 – Елементний склад покриття в характерних точках і всієї досліджуваної поверхні

Дослідна точка, ділянка (Σ) поверхні	Елементи, %							
	S	Cu	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Fe
1	0,56	0,20	0,24	0,60	16,20	9,30	0,71	72,16
2	0,60	0,21	0,22	0,58	17,21	8,89	0,69	71,60
3	0,53	0,23	0,18	0,62	15,23	9,19	0,83	73,19
Σ	0,55	0,87	0,21	0,60	16,87	9,07	0,89	70,94

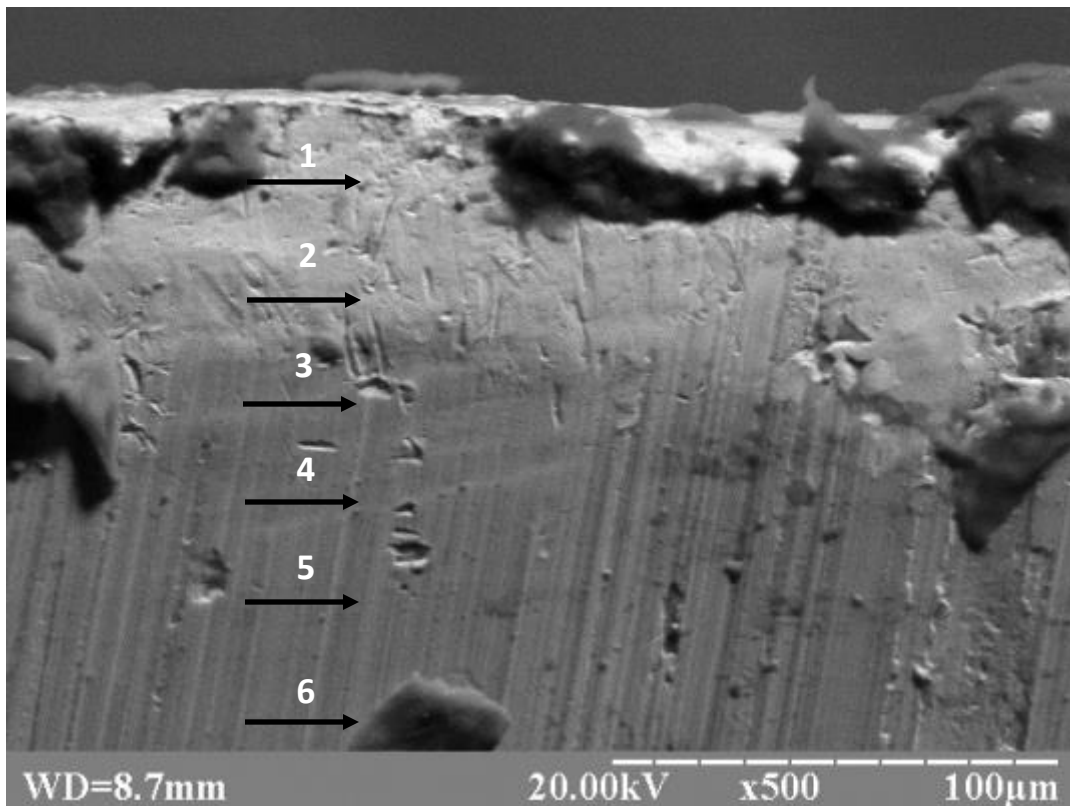


Рисунок 4.18 – Точки сканування елементного складу покриття по глибині шару

Таблиця 4.10 – Елементний склад покриття по мірі поглиблення з поверхні

Дослідна точка поверхні	Елементи, %							
	S	Cu	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Fe
1	0,41	0,23	0,24	0,58	9,21	5,21	0,61	83,51
2	0,31	0,19	0,22	0,51	5,23	3,19	0,34	90,01
3	0,12	0,20	0,21	0,62	3,19	2,23	0,21	93,22
4	0,09	0,21	0,23	0,57	1,16	1,21	0,17	96,36
5	0,06	0,16	0,16	0,54	0,53	0,76	-	97,79
6	0,03	0,24	0,17	0,53	0,21	0,25	-	98,57

У табл. 4.11 наведені результати сульфидування зразків зі сталі 20 і високоміцного чавуну ВЧ60 спеціальним електродом з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т, виготовленим за пропонуванним способом.

Вибір граничних значень енергії імпульсів для здійснення процесу сульфидування обумовлений природою взаємодії електродів з твердими металами що деформуються. Нижня межа енергії $W_p = 0,02$ Дж обмежується ефективністю способу. Збільшення енергії імпульсу вище верхньої межі $W_p > 1,70$ Дж призводить до різкого зниження якості поверхневого шару (шорсткість Ra більше 20 мкм, суцільність менше 80%).

Таким чином, при насиченні сіркою поверхні сталі 20 методом ЕЕЛ з використанням спеціального електроду інструменту з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т на установці моделі «Елітрон -22А» з енергією розряду $W_p = 0,55$ Дж концентрація сірки на поверхні становить 0,53-0,60%. По мірі поглиблення концентрація сірки плавно знижується і на глибині 75 мкм складає близько 0,06%.

Кількість легуючих елементів електрода - інструменту зі сталі 12Х18Н10Т хрому, нікелю і титану по мірі поглиблення плавно зменшується, відповідно, з 16, 9; 9; і 0,9 % на поверхні до 1,2; 1,2 і 0,2 % на глибині 60 мкм.

Таблиця 4.11 – Результати сульфидування зразків зі сталі 20 і високоміцного чавуну ВЧ60

Матеріал зразка	Енергія розряду, Вт, Дж	Глибина сульфидованого шару, мкм	Вміст сірки, %	Шорсткість поверхні, Ra, мкм
Сталь 20	0,02	10	0,05* -0,85**	0,7
	0,05	25	0,05-0,80	1,7
	0,11	35	0,05-0,70	2,9
	0,36	50	0,05-0,65	5,2
	0,55	75	0,06-0,60	6,2
	0,90	90	0,06-0,50	7,9
	1,70	100	0,06-0,40	13,7
Високоміцний чавун ВЧ 60	0,02	10	0,05-0,85	0,8
	0,05	30	0,04-0,70	1,9
	0,11	40	0,05-0,65	3,1
	0,36	50	0,05-0,60	5,8
	0,55	75	0,05-0,50	6,7
	0,90	90	0,04-0,45	8,4
	1,70	100	0,05-0,40	14,6

* - Вміст сірки в нижній частині сульфидованого шару;

** - Вміст сірки на поверхні сульфидованого шару.

З огляду на те, що метод сульфідуювання застосовується для усунення схоплювання деталей в парах тертя, то для зниження їх шорсткості поверхні доцільно застосовувати:

- при сульфідуюванні з енергією розряду $W_p < 0,55$ Дж - метод безабразивної ультразвукової фінішної обробки;
- при сульфідуюванні з енергією розряду $W_p = 0,55-1,7$ Дж - метод шліфування. При цьому товщина сульфідованого шару буде знижуватися на 50 мкм.

4.4. Аналіз якості азотовмісних поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ

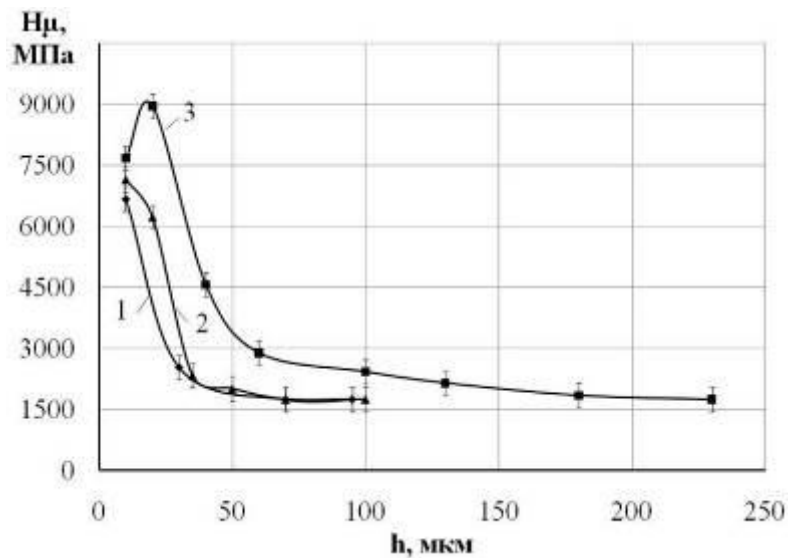
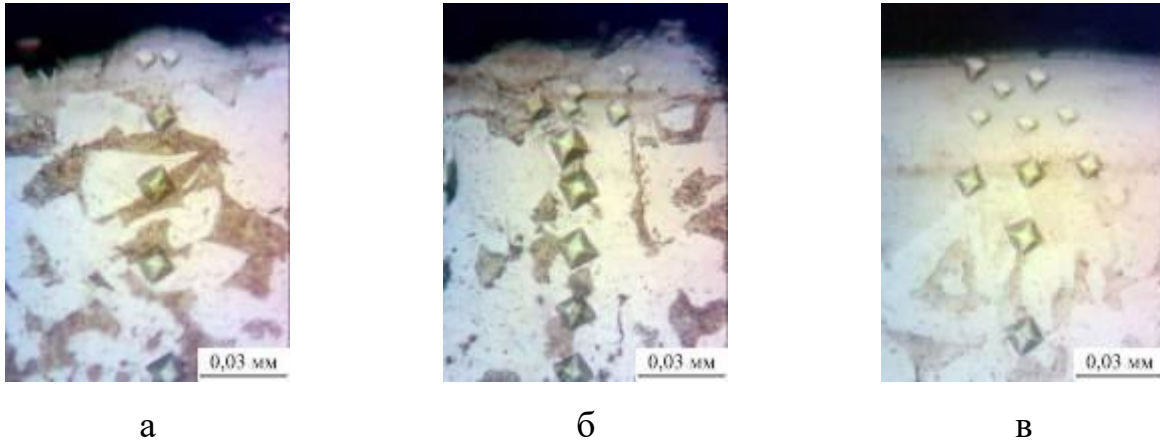
Запропонований новий спосіб азотування та нітроцементації методом ЕІЛ.

Зі збільшенням енергії розряду, як і при алітуванні, цементації та інших методах ЕІЛ, шорсткість поверхні зростає (табл. 4.12).

Таблиця 4.12 – Якісні параметри азотованих шарів, отриманих методом ЕІЛ

Енергія розряду, Дж	Товщина білого шару, мкм	Мікротвердість білого шару, МПа	Шорсткість, мкм			Суцільність білого шару, %
			Ra	Rz	Rmax	
Сталь 20						
0,13	10-20	6665	0,9	2,1	7,5	50
0,52	10-20	7150	1,3	2,3	9,3	60
3,4	30-40	8969	6,2	16,3	40,6	70
Сталь 40						
0,13	10-25	6860	0,9	2,0	7,1	60
0,52	10-30	7450	1,4	2,2	8,3	70
3,4	30-50	9160	5,9	17,3	34,6	80

На рисунку 4.19 а, б, в зображені мікроструктури поверхневого шару зразка сталі 20 після ЕІЛ електродом-інструментом зі сталі 20 з використанням енергії розряду $W_p = 0,13; 0,52$ і $3,4$ Дж, відповідно, а також розподіл мікротвердості по мірі поглиблення з поверхні.



г

а – 0,13 Дж; б – 0,52 Дж; в – 3,4 Дж

на графіку 1 – 0,13 Дж; 2 – 0,52 Дж; 3 – 3,4 Дж

Рисунок 4.19 – Мікроструктура (а-в) і розподіл мікротвердості (г) в поверхневому шарі сталі 20 після азотування методом ЕІЛ

Металографічний аналіз отриманих покриттів показав, що мікроструктура складається з 3-х зон:

- 1) «білий шар» – шар, що не піддається травленню звичайними реактивами;
- 2) перехідна зона або дифузійна зона;
- 3) основний метал, що має феритну-перлітну структуру

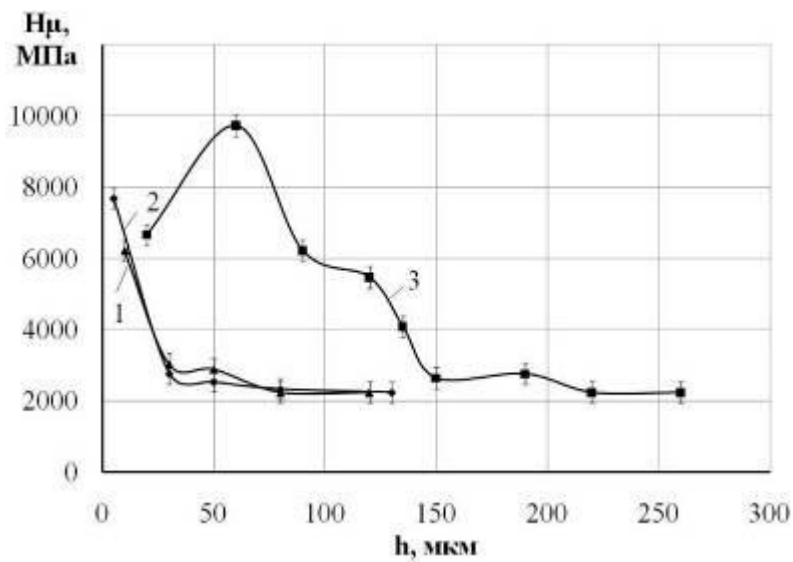
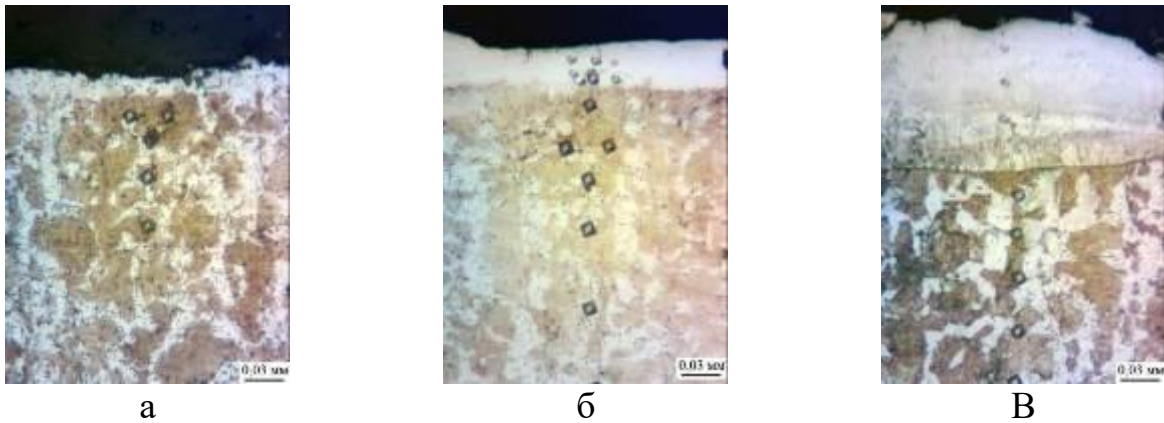
Результати вимірювання товщини, мікротвердості і суцільності «білого шару», а також величини шорсткості поверхні, зведені до табл. 4.12. Показано, що зі збільшенням енергії розряду зростає товщина «білого» шару, а також його мікротвердість. При заміні матеріалу підкладки зі сталі 20 на сталь 40 спостерігається збільшення товщини «білого» зміцненого шару, а також його мікротвердості. Так, при $W_p = 3,4$ Дж сталі 20 та 40 товщина і мікротвердість «білого» складає, 30-40 мкм і 8969 МПа та 30-50 мкм і 9160 МПа, відповідно.

На рисунку 4.20 а, б, в зображені мікроструктури поверхневого шару зразка сталі 40 після ЕІЛ електродом-інструментом з графіту з використанням енергії розряду $W_p = 0,13; 0,52$ і $3,4$ Дж, відповідно, а також розподіл мікротвердості по мірі поглиблення від поверхні. Результати вимірювання товщини, мікротвердості і суцільності «білого» шару, а також величини шорсткості поверхні, зведені до табл. 4.13.

Результати визначення товщини, мікротвердості і суцільності «білого» шару, а також величини шорсткості поверхні, зразків зі сталей 20 та 40 після ЕІЛ електродом-інструментом з графіту з використанням енергії розряду $W_p = 0,13; 0,52$ і $3,4$ Дж, зведені до табл. 4.13.

Аналізуючи, рис. 4.20 і табл. 4.13 слід зазначити, що для сталі 20 і сталі 40 зі збільшенням енергії розряду товщина, мікротвердість і суцільність «білого» шару, а також величина шорсткості поверхні збільшуються.

Необхідно відмітити, що при нітроцементації порівняно з азотуванням товщина, мікротвердість і суцільність «білого» шару більші, а величина шорсткості поверхні менша (див. таблиці 4.12 і 4.13).



а – 0,13 Дж; б – 0,52 Дж; в – 3,4 Дж

на графіку 1 – 0,13 Дж; 2 – 0,52 Дж; 3 – 3,4 Дж

Рисунок 4.20 – Мікроструктура (а-в) і розподіл мікротвердості (Г) в поверхневому шарі сталі 40 після нітроцементації методом ЕІЛ

Таблиця 4.13 – Якісні параметри N+C шарів, отриманих методом ЕІЛ

Енергія розряду, Дж	Товщина білого шару, мкм	Мікротвердість білого шару, МПа	Шорсткість, мкм			Суцільність білого шару, %
			Ra	Rz	Rmax	
Сталь 20						
0,13	10-20	6228	0,8	1,9	6,5	80
0,52	30-40	7689	1,2	2,1	8,1	90
3,4	80-110	9731	4,1	11,3	25,1	100
Сталь 40						
0,13	20-30	7135	0,9	2,2	7,3	90
0,52	30-50	7920	1,3	2,7	8,7	100
3,4	80-120	9932	4,7	16,2	35,1	100

Таким чином, проведений аналіз особливостей структуроутворення поверхневих шарів вуглецевих сталей після азотування та нітроцементациї методом ЕІЛ показав, що структура шару складається з трьох ділянок: «білого» шару, дифузійної зони і основного металу. Зі збільшенням енергії розряду зростають такі якісні параметри поверхневого шару, як товщина, мікротвердість «білого» шару і дифузійної зони, шорсткість. Суцільність «білого» шару при $W_p = 0,13$ Дж складає 80%, при подальшому збільшенні енергії розряду зростає і при $W_p = 3,4$ Дж становить 100%.

Порівняльний аналіз впливу підкладки на якісні параметри поверхневого шару при азотуванні та нітроцементациї методом ЕІЛ показав, що при заміні сталі 20 на сталь 40 збільшується шорсткість поверхневого шару, товщина «білого» шару і перехідної зони, тобто глибина зони підвищеної твердості, а також величина її мікротвердості.

4.5. Висновки до розділу

1. Проведений аналіз особливостей структуро- та фазоутворення поверхневих шарів вуглецевих сталей після алітування методом ЕІЛ показав, що структура шару складається з трьох ділянок: «білого» шару, дифузійної зони і основного металу. Зі збільшенням енергії розряду зростають такі якісні параметри поверхневого шару, як товщина, мікротвердість «білого» шару і перехідної зони, шорсткість. Суцільність «білого» шару при $W_p = 0,52$ Дж низька (50-60%), при подальшому збільшенні енергії розряду зростає і при $W_p = 6,8$ Дж становить 100%. При збільшенні енергетичних параметрів процесу ЕІЛ відбувається зміна хімічного і фазового складу шару: при низьких енергіях розряду формується шар, що складається переважно з α -Fe і оксидів алюмінію. Зі збільшенням W_p шар складається з інтерметалідів заліза і алюмінію, а також вільного алюмінію, що підтверджується даними локального мікрорентгеноспектрального аналізу.

2. Порівняльний аналіз впливу підкладки на якісні параметри поверхневого шару при алітуванні методом ЕІЛ показав, що при заміні сталі 20 на сталь 40 збільшується товщина «білого» шару і перехідної зони, тобто глибина зони підвищеної твердості, а також величина її мікротвердості. Шорсткість поверхні практично не змінюється.

3. Для практичного застосування можна рекомендувати процес алітування методом ЕІЛ, використовуючи режими (енергію розряду в межах $W_p = 4,6-6,8$ Дж і продуктивність $2,0-3,0$ см² / хв), які забезпечують формування «білого» шару товщиною 70-130 мкм, мікротвердістю 5000-7500 МПа, шорсткістю (Ra) 6-9 мкм і суцільністю 95-100%. З метою зниження шорсткості поверхневого шару і отримання суцільних покриттів рекомендується проводити ЕІЛ цим же електродом (алюмінієм), але на менших режимах.

4. Порівняльні дослідження жаростійкості алітованих покриттів, отриманих за класичною технологією (в розплаві алюмінію) і ЕІЛ алюмінієвим електродом показав, що електроіскрові покриття характеризуються високою жаростійкістю. Проведений металографічний аналіз характеру окиснення зразків після випробування на жаростійкість свідчить про те, що після випробування основний метал окиснюється, про що свідчить наявність оксидів в поверхневому шарі. Особливо інтенсивно окислюються зразки без захисного покриття. Алітовані покриття, отримані в розплаві алюмінію і методом ЕІЛ, зберігають підвищену твердість, захищають від окиснення основний метал, про що свідчить менший вміст оксидів в при поверхневому шарі основного металу і достатня твердість покриття. Результати дослідження дають можливість рекомендувати технологію ЕІЛ алюмінієвим електродом з метою підвищення стійкості сталі до окиснення при підвищених температурах.

5. Досліджені два способи ЦЕІЛ: традиційна технологія, яка полягає в ЕІЛ поверхні компактним графітовим електродом-інструментом на одному режимі і з однаковою продуктивністю ЦЕІЛ, і пропонована із використанням СТС. Мікроструктури після ЦЕІЛ складаються з 3-х зон: верхній «білий» шар, що не піддається хімічному травленню, дифузійна зона і основа з ферито-перлітною структурою, що відповідає сталі 20. ДюрOMETричні дослідження свідчать про те, що зі збільшенням енергії розряду збільшується мікротвердість і товщина підвищеної твердості. Максимальна мікротвердість після ЦЕІЛ при $W_p = 4,6 \text{ Дж } 8492 \text{ МПа}$.

6. Порівняльний аналіз якісних параметрів шару після традиційної і пропонованої технологій ЦЕІЛ показав, що після обробки поверхні за пропонованою технологією зменшується шорсткість поверхні. Так, після традиційної ЦЕІЛ при $W_p = 4,6 \text{ Дж}$ шорсткість поверхні складає $R_a = 8,3-9,0 \text{ мкм}$, а після пропонованої – $R_a = 3,2-4,8 \text{ мкм}$. При цьому збільшується суцільність легованого шару до 100%, до 80 мкм збільшується глибина

дифузійної зони вуглецю, а також мікротвердість «білого» шару і його товщина, до 9932 МПа і до 230 мкм відповідно.

7. Досліджено вплив пропонованої технології ЕІЛ на кількість вуглецю в цементованому шарі. На поверхні формується шар з вмістом вуглецю до 0,86 %. У приповерхневому шарі покриття формуються невелика кількість ділянок у вигляді пор, в яких міститься графіт. Очевидно, вільний графіт буде позитивно впливати на антифрикційні властивості оброблених поверхонь під час тертя.

8. При насиченні сіркою поверхні сталі 20 методом ЕІЛ з використанням СТС при енергії розряду $W_p = 0,55$ Дж концентрація сірки на поверхні становить 0,53-0,60%. По мірі поглиблення концентрація сірки плавно знижується і на відстані 75 мкм складає близько 0,06%.

9. З огляду на те, що метод сульфидування застосовується для усунення схоплювання деталей в парах тертя, то для зниження їх шорсткості поверхні доцільно застосовувати: при сульфидуванні з енергією розряду $W_p < 0,55$ Дж – метод БУФО; при сульфидуванні з енергією розряду $W_p = 0,55-1,7$ Дж – метод шліфування. При цьому товщина сульфидованого шару буде знижуватися на 50 мкм.

10. Проведений аналіз особливостей структуроутворення поверхневих шарів вуглецевих сталей після азотування та нітроцементациї методом ЕІЛ з використанням СТС показав, що структура шару складається з трьох ділянок: «білого» шару, дифузійної зони і основного металу. Зі збільшенням енергії розряду зростають такі якісні параметри поверхневого шару, як товщина, мікротвердість «білого» шару і дифузійної зони, шорсткість. Суцільність «білого» шару при $W_p = 0,13$ Дж складає 80%, при подальшому збільшенні енергії розряду зростає і при $W_p = 3,4$ Дж становить 100%.

11. Порівняльний аналіз впливу підкладки на якісні параметри поверхневого шару при азотуванні та нітроцементациї методом ЕІЛ показав, що при заміні сталі 20 на сталь 40 збільшується шорсткість поверхневого шару,

товщина «білого» шару і перехідної зони, тобто глибина зони підвищеної твердості, а також величина її мікротвердості.

12. За матеріалами розділу опубліковані наступні роботи [149, 257, 259, 264, 287, 290, 294, 295, 297, 301, 306, 307, 312, 313, 315, 316, 319].

РОЗДІЛ 5

УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ДЕТАЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЗАСНОВАНИХ НА МЕТОДІ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ

5.1. Аналіз якості сульфоцементованих покриттів, отриманих методами ЕІЛ

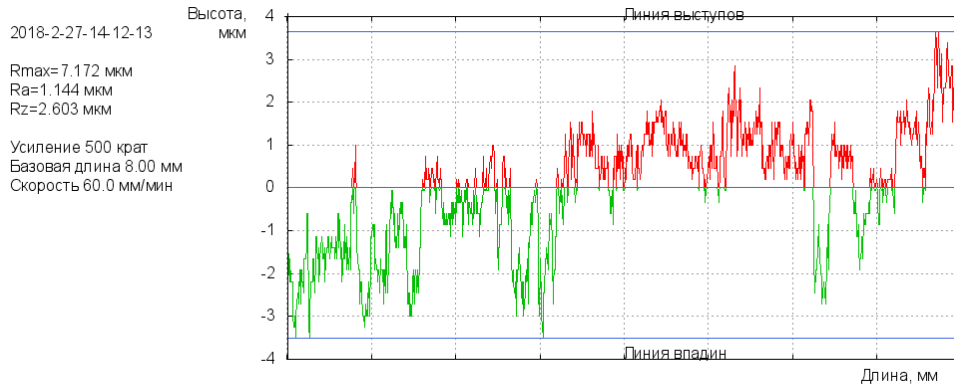
Для поліпшення твердості та зносостійкості, а також забезпечення спеціальних трибологічних властивостей поверхонь деталей перспективним напрямком є створення сульфоцементованих покриттів методом ЕІЛ.

На рис. 5.1 представлені профілограми поверхневих шарів, сформованих при сульфоцементации методом ЕІЛ з $W_p = 0,13; 0,55$ і $3,4$ Дж на сталі 20. Зі збільшенням енергії розряду, шорсткість поверхні збільшується (табл. 5.1). Так, при сульфоцементации методом ЕІЛ з $W_p = 0,13$ Дж $R_a = 1,1$ мкм, а з $W_p = 3,4$ Дж $R_a = 2,5$ мкм.

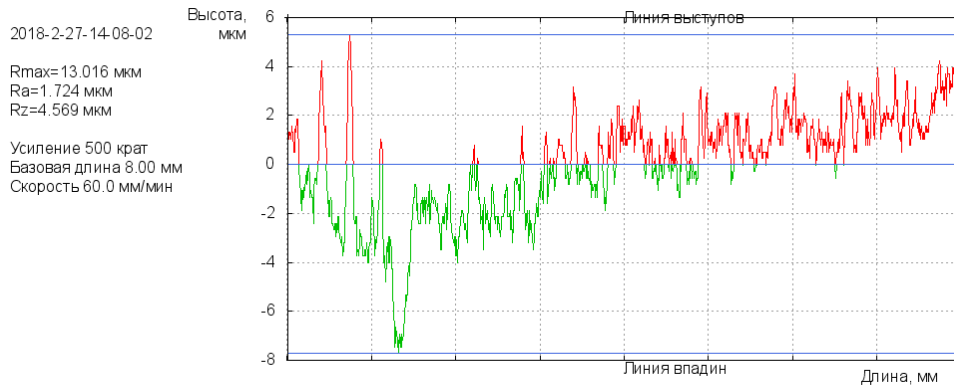
На рис. 5.2 представлені мікроструктури зразків зі сталі 20 після сульфоцементации при різних режимах ЕІЛ. Проведений металографічний аналіз показав, що характерний для електроіскрових покриттів білий шар не виражений. Чітко спостерігається дифузійна зона, товщина якої збільшується з підвищенням енергії розряду. В результаті нагрівання в міжкритичний температурний інтервал в процесі ЕІЛ (для сталі 20 $724-845$ °С) в дифузійній зоні формується ділянка неповної фазової перекристалізації.

ДюрOMETричні дослідження сульфоцементованих покриттів свідчать про те, що в поверхневому шарі утворюються дві зони: у приповерхневому шарі – зона зниженої мікротвердості, далі розташована зона підвищеної мікротвердості – зміцнений шар (рис. 5.2 і табл. 5.1). Необхідно відзначити, що зі збільшенням енергії розряду твердість і глибина шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару збільшуються. Мабуть, така особливість формування

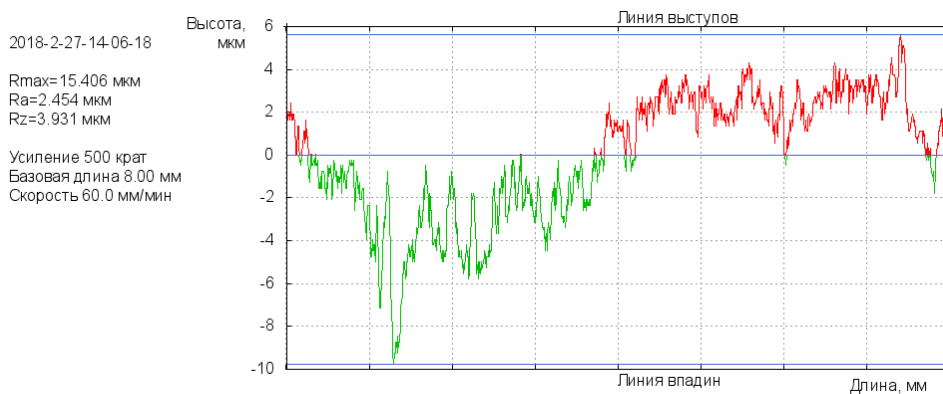
сульфоцементованого шару, отриманого методом ЕІЛ, пов'язана з різною дифузією вуглецю та сірки вглиб металу [254, 261, 262].



а



б



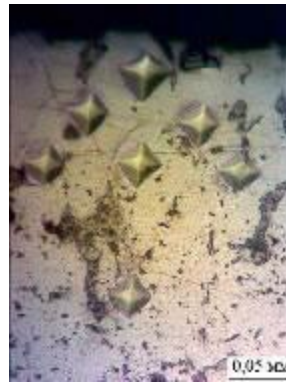
в

а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 3,4$ Дж

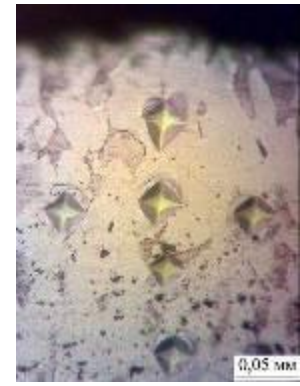
Рисунок 5.1 – Профілограми поверхневих шарів, сформованих при сульфоцементатії методом ЕІЛ на сталі 20



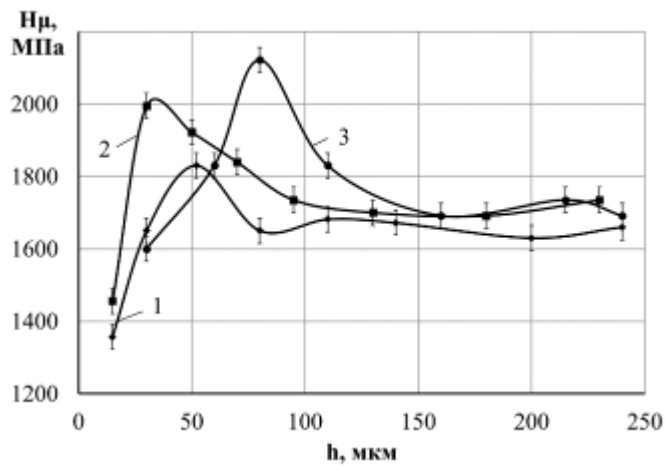
а



б



в



г

а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 3,4$ Дж;

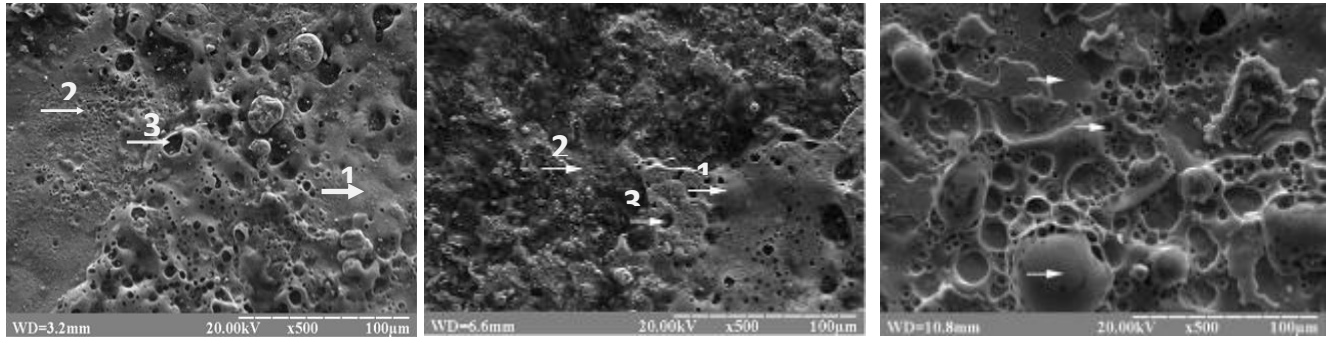
г – на графіку 1 – $W_p = 0,13$ Дж, 2 – $W_p = 0,55$ Дж, 3 – $W_p = 3,4$ Дж

Рисунок 5.2 – Мікроструктура (а-в) і розподіл мікротвердості (г) в поверхневому шарі сталі 20 після сульфоцементації методом ЕІЛ

Таблиця 5.1 – Якісні параметри сульфоцементованих покриттів, отриманих методом ЕІЛ, на сталі 20

Енергія розряду, Дж	Шорсткість, мкм			Шар зниженої мікротвердості			Зміцнений шар			Кількість сірки на поверхні, %	Глибина шару з підвищеним вмістом сірки, мкм
	Ra	Rz	Rmax	Hμ, МПа	h, мкм	S, %	Hμ, МПа	h, мкм	S, %		
	0,13	1,1	2,6	7,1	1350	15	80	1830	30			100	1,01	60
0,55	1,7	4,6	13,0	1460	20	95	2000	40	100	0,65	90
3,4	2,5	3,9	15,4	1600	30	100	2150	50	100	0,45	150

На рис. 5.3 показані топографії різних ділянок поверхневих шарів при сульфоцементації сталі 20, сформованих, відповідно, з енергією розряду $W_p = 0,13, 0,55$ і $3,4$ Дж. Для оцінки хімічного складу на поверхні обрані три характерні зони: 1 – гладка поверхня, 2 – шорстка поверхня, 3 – пора.



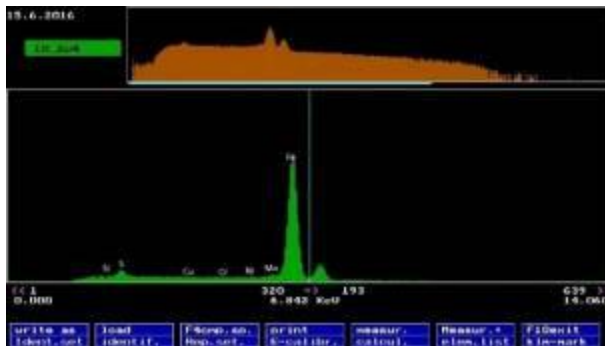
а

б

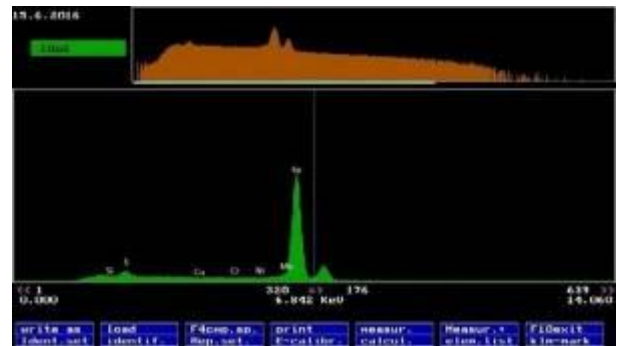
в

а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 3,4$ Дж

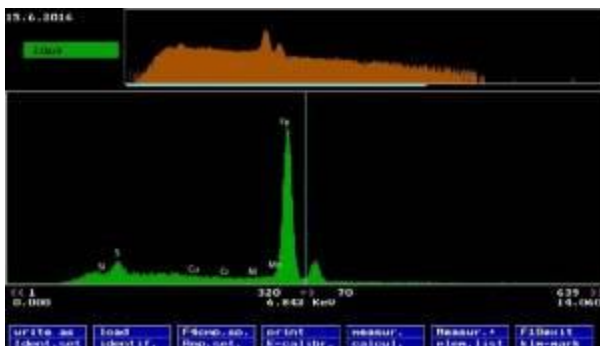
Рисунок 5.3 – Топографії ділянок поверхні сталі 20 після сульфоцементації



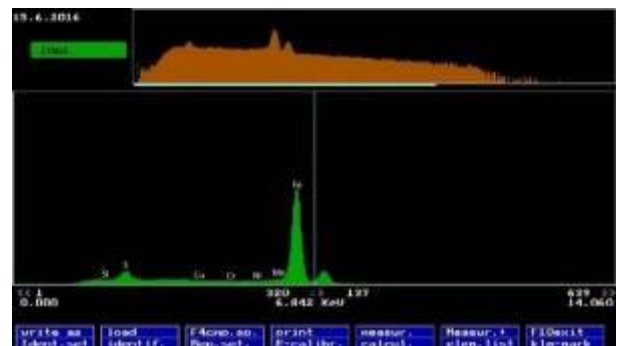
а



б



в



г

а – гладка поверхня, б – шорстка поверхня, в – пора, г – з усієї поверхні

Рисунок 5.4 – Спектри з сульфоцементованої поверхні, $W_p = 0,13$ Дж

Спектри характерних зон сульфоцементованої поверхні при $W_p = 0,13$ Дж, а також хімічний склад характерних зон сформованих покриттів, отриманих на різних режимах ЕІЛ, показані на рис. 5.4 і в табл. 5.2, відповідно.

Таблиця 5.2 – Хімічний склад поверхні сталі 20 в характерних зонах і з усієї досліджуваної поверхні після сульфоцементатації методом ЕІЛ

Досліджувана точка, ділянка (Σ) поверхні*	Елементи, %						
	S	Cu	Cr	Ni	Mn	Si	Fe
$W_p = 0,13$ Дж							
1	0,97	0,23	0,20	0,21	0,60	0,24	97,55
2	1,2	0,23	0,24	0,19	0,58	0,22	97,34
3	0,87	0,21	0,19	0,16	0,62	0,18	97,77
Σ	1,01	0,22	0,21	0,19	0,60	0,21	97,56
$W_p = 0,55$ Дж							
1	0,77	0,20	0,21	0,21	0,61	0,24	97,76
2	0,64	0,22	0,23	0,17	0,59	0,22	97,93
3	0,53	0,24	0,19	0,14	0,56	0,23	98,11
Σ	0,65	0,22	0,21	0,17	0,59	0,23	97,93
$W_p = 3,4$ Дж							
1	0,57	0,25	0,21	0,19	0,56	0,26	97,96
2	0,34	0,23	0,22	0,17	0,57	0,24	98,23
3	0,53	0,20	0,23	0,15	0,57	0,22	98,10
Σ	0,45	0,27	0,26	0,15	0,59	0,25	98,03
* 1 – гладка поверхня, 2 – шорстка поверхня, 3 – пора, Σ – вся поверхня							

В результаті аналізу таблиці 5.2 встановлено, що зі збільшенням енергії розряду на всіх характерних зонах спостерігається зменшення кількості сірки,

що, очевидно, пов'язано з вигоранням сірки при протіканні імпульсного розряду в процесі ЕІЛ. Крім того, підвищений вміст сірки виявляється в місцях пор, що пояснюється скупченням сірковмісної речовини на цих ділянках.

Досліджено розподіл елементів в перерізі, від поверхні до основи при кроці сканування 15 мкм. Результати представлені на рис. 5.5 і в табл. 5.3.

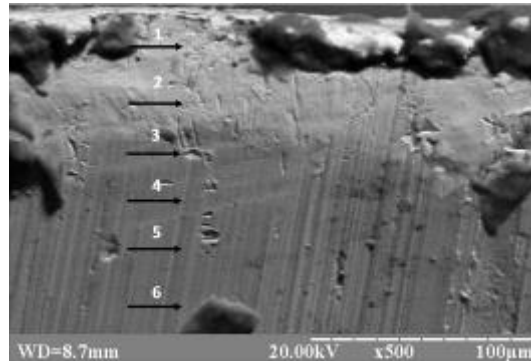


Рисунок 5.5 – Визначення хімічного складу поверхневого шару по глибині сталі 20 після сульфоцементації методом ЕІЛ

Таблиця 5.3 – Розподіл хімічного складу поверхневого шару сталі 20 в перерізі після сульфоцементації

Досліджу- вана точка поверхні	Елементи, %						
	S	Cu	Cr	Ni	Mn	Si	Fe
1	2	3	4	5	6	7	8
$W_p = 0,13$ Дж							
1	0,78	0,21	0,23	0,21	0,62	0,23	97,72
2	0,58	0,19	0,20	0,18	0,59	0,22	98,04
3	0,17	0,21	0,19	0,16	0,62	0,20	98,45
4	0,05	0,22	0,11	0,19	0,61	0,19	98,63
5	0,03	0,18	0,24	0,23	0,59	0,24	98,49
6	0,02	0,20	0,23	0,16	0,63	0,23	98,53
$W_p = 0,55$ Дж							
1	0,54	0,23	0,21	0,21	0,57	0,24	98,00
2	0,41	0,19	0,23	0,19	0,59	0,22	98,17

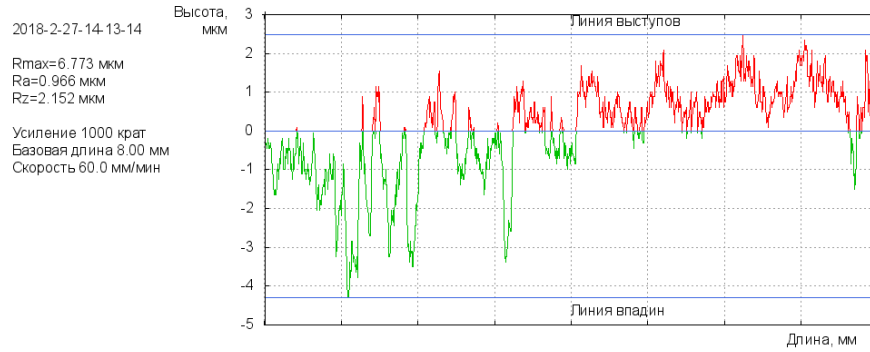
Продовження таблиці 5.3

1	2	3	4	5	6	7	8
3	0,25	0,16	0,19	0,23	0,61	0,20	98,36
4	0,12	0,21	0,16	0,21	0,54	0,23	98,53
5	0,08	0,18	0,23	0,16	0,53	0,24	98,58
6	0,05	0,24	0,21	0,25	0,52	0,17	98,56
7	0,03	0,22	0,24	0,19	0,58	0,24	98,50
$W_p = 3,4$ Дж							
1	0,47	0,22	0,24	0,21	0,56	0,23	98,07
2	0,39	0,19	0,23	0,19	0,59	0,22	98,17
3	0,28	0,17	0,18	0,23	0,51	0,20	98,43
4	0,18	0,22	0,17	0,21	0,55	0,23	98,44
5	0,12	0,19	0,24	0,15	0,55	0,23	98,52
6	0,08	0,24	0,21	0,25	0,52	0,17	98,56
7	0,08	0,25	0,23	0,19	0,56	0,23	98,46
8	0,07	0,23	0,20	0,20	0,53	0,25	98,52
9	0,06	0,25	0,21	0,26	0,50	0,20	98,52
10	0,05	0,19	0,20	0,16	0,55	0,23	98,55
11	0,03	0,20	0,19	0,14	0,40	0,23	98,81

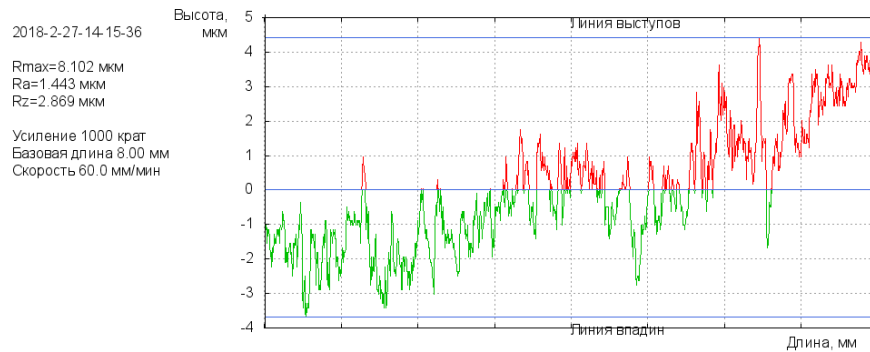
Зі збільшенням енергії розряду з 0,13 до 3,4 Дж при ЕІЛ сталі 20 кількість сірки на поверхні покриття зменшується, очевидно, в результаті вигорання її з поверхні при проходженні електроіскрового розряду, однак за рахунок інтенсифікування дифузії при ЕІЛ з енергією розряду 3,4 Дж товщина сульфидованого шару збільшується (табл. 5.3).

Результати рентгеноспектрального аналізу свідчать про те, що сірка накопичується в поверхні металу на глибині до 30 мкм, її концентрація на цій відстані становить близько 0,4% (табл. 5.3). При ЕІЛ графітовим електродом вуглець дифундує вглиб металу і на відстані 30-50 мкм від поверхні формується зміцнених шар з мікротвердістю близько 2000 МПа (табл. 5.1, рис. 5.1).

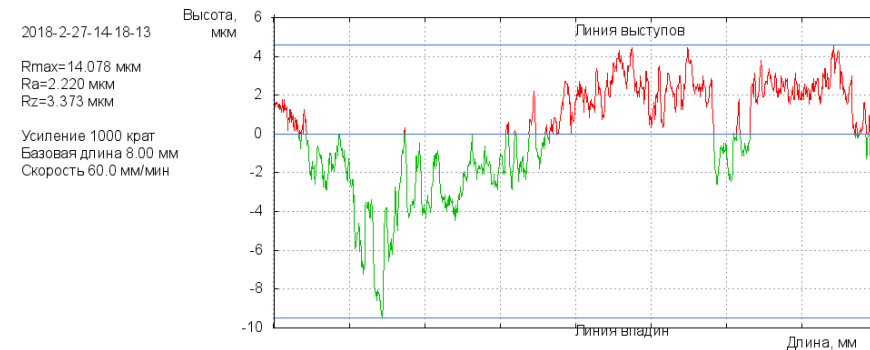
Досліджено вплив сульфоцементатії методом ЕІЛ на якісні параметри отриманих покриттів на сталі 40.



а



б



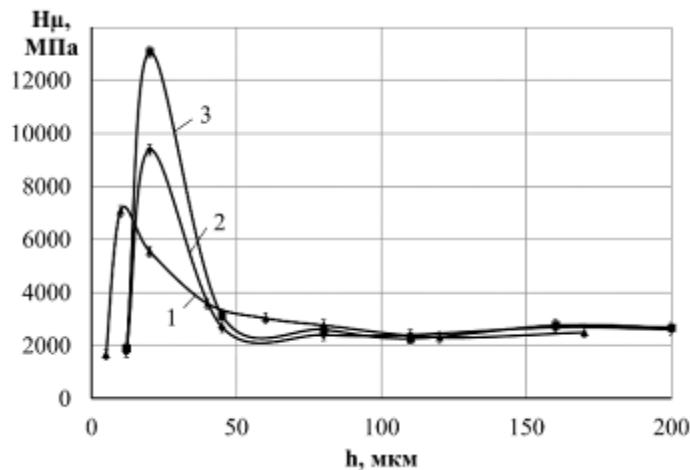
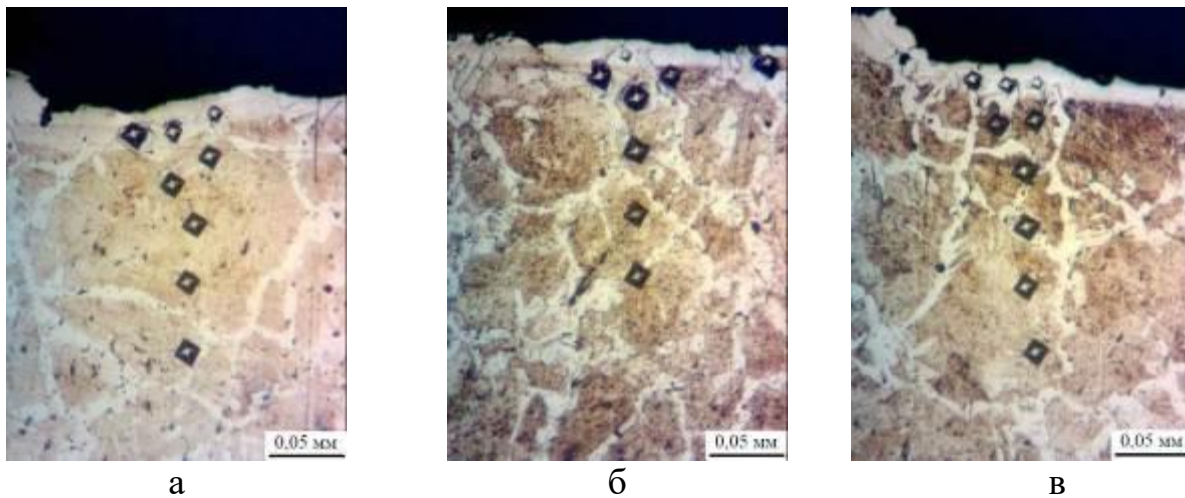
в

а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,27$ Дж; в – $W_p = 0,52$ Дж

Рисунок 5.7 – Профілограми поверхневих шарів сталі 40, сформованих при сульфоцементації методом ЕІЛ

Проведений металографічний аналіз електроіскрових сульфоцементованих покриттів з використанням оптичного та електронного мікроскопів показав, що на сталі 40 на відміну від сталі 20 присутній чітко

виражений «білий» шар (рис. 5.8 і 5.9). Очевидно, при вмісті більшої кількості вуглецю в сталі підкладки, поверхневі шари в специфічних умовах охолодження при ЕІЛ зазнають помітного мартенситного перетворення, при цьому утворюється мартенсит з більшим ступенем тетрагональності кристалічної ґратки [119].



в

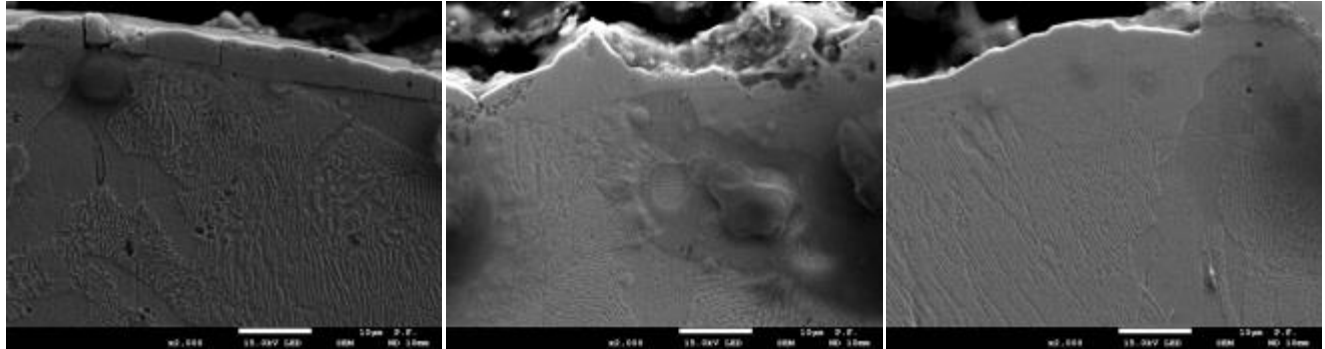
а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,27$ Дж; в – $W_p = 0,52$ Дж;

г – на графіку 1 – $W_p = 0,13$ Дж, 2 – $W_p = 0,27$ Дж, 3 – $W_p = 0,52$ Дж

Рисунок 5.8 – Мікроструктура (а-в) і розподіл мікротвердості (г) в поверхневому шарі сталі 40 після сульфоцементації методом ЕІЛ

У зв'язку з проходженням гартівних процесів, а також в результаті підвищеного вмісту вуглецю в поверхневому шарі мікротвердість отриманих

шарів на сталі 40 також більше (рис. 5.8): при $W_p = 0,13$ Дж Нм = 7074 МПа, а при $W_p = 0,52$ Дж Нм = 13065 МПа (табл. 5.4). Суцільність «білого» шару при $W_p = 0,13$ Дж становить близько 70%, а при $W_p = 0,52$ Дж прагне до 100%.



а

б

в

а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,27$ Дж; в – $W_p = 0,52$ Дж

Рисунок 5.9 – Результати електронно-мікроскопічних досліджень сульфоцементованих шарів на сталі 40, отриманих методом ЕІЛ

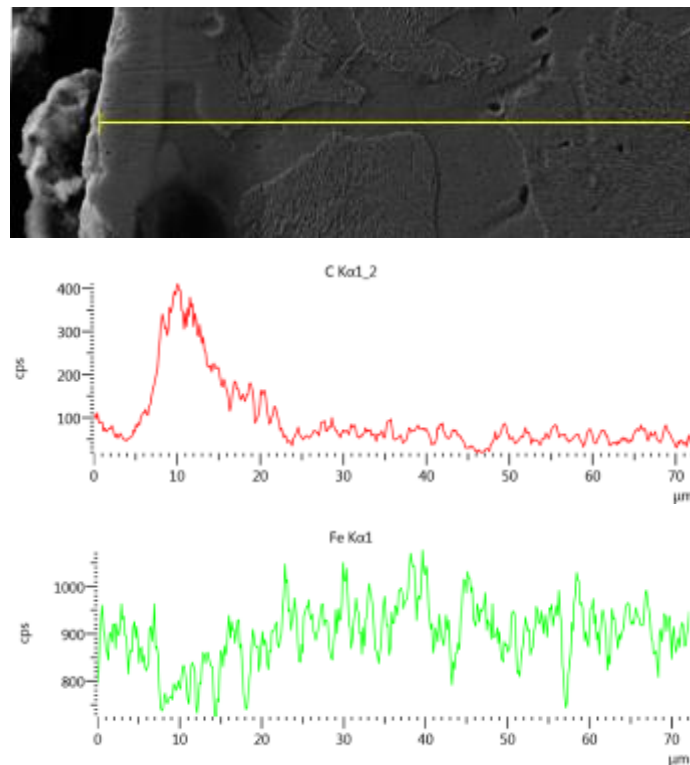


Рисунок 5.10 – Розподіл вуглецю і заліза в поверхневому шарі після сульфоцементатії сталі 40 методом ЕІЛ при $W_p = 0,13$ Дж

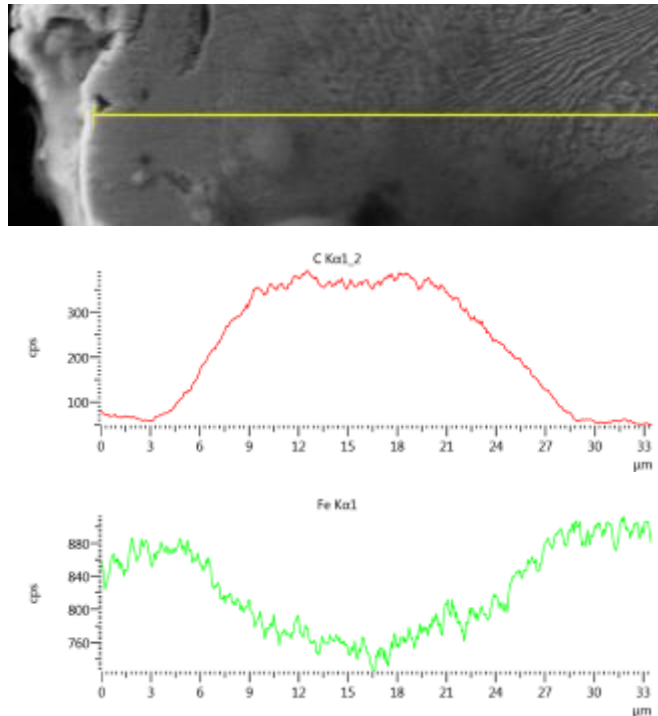


Рисунок 5.11 – Розподіл вуглецю і заліза в поверхневому шарі після сульфоцементації сталі 40 методом ЕІЛ при $W_p = 0,27$ Дж

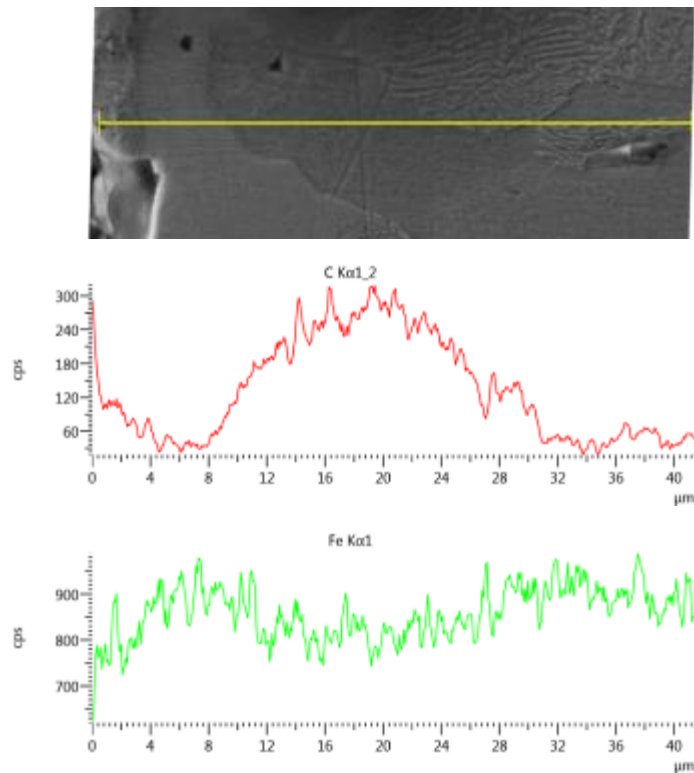
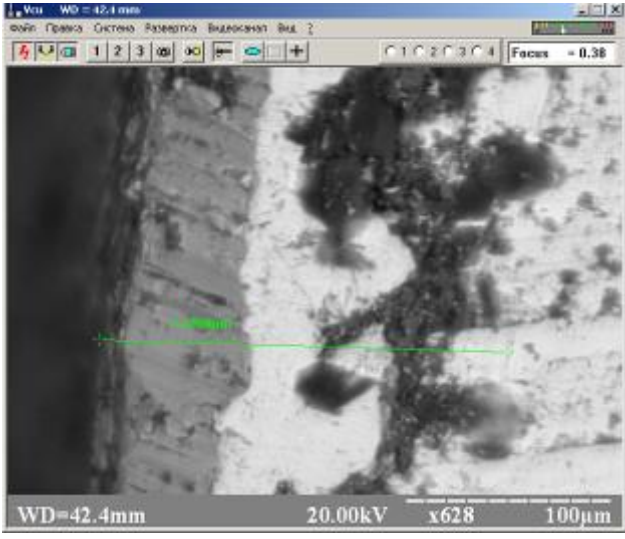


Рисунок 5.12 – Розподіл вуглецю і заліза в поверхневому шарі після сульфоцементації сталі 40 методом ЕІЛ при $W_p = 0,52$ Дж

Результати мікрорентгеноспектрального аналізу (рисунки 5.10-5.12 і табл. 5.5) підтверджують наше припущення про те, що при сульфоцементації методом ЕІЛ поверхневі шари на глибині 10-40 мкм, залежно від енергетичних параметрів процесу, насичені сіркою. Ця зона – шар зниженої мікротвердості, так само, як і на сталі 20, характеризується зниженою мікротвердістю (рис. 5.8). Під цим шаром формується зміцнений шар, він характеризується підвищеним вмістом вуглецю і високою мікротвердістю. Товщина зміцненого шару так само залежить від енергетичних параметрів ЕІЛ і становить 15-40 мкм.

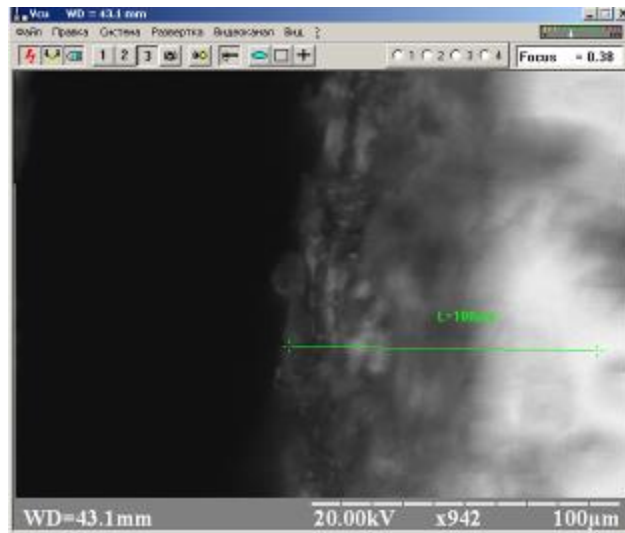
Таблиця 5.5 – Розподіл хімічних елементів в поверхневому шарі сталі 40 після сульфоцементації методом ЕІЛ

Досліджувана точка поверхні (крок 10-20 мкм)	Елементи, %						
	S	Cu	Cr	Ni	Mn	Si	Fe
1	2	3	4	5	6	7	8
Сталь 40, $W_p = 0,52$ Дж (крок 20 мкм)							
							
	S	Cu	Cr	Ni	Mn	Si	Fe
1	0,68	–	–	–	0,58	2,95	102,22
2	0,76	–	–	–	0,54	1,50	96,44
3	0,08	–	–	–	0,58	1,16	94,70

Продовження таблиці 5.5

1	2	3	4	5	6	7	8
4	0,07	–	–	–	0,78	1,13	92,23
5	0,33	–	–	–	0,58	1,01	98,44
6	0,15	–	–	–	0,40	0,81	102,35
7	0,13	–	–	–	0,48	8,21	36,13
8	0,21	–	–	–	0,43	8,44	99,80
9	0,03	–	–	–	0,52	6,24	24,11
10	0,31	–	–	–	0,82	3,63	100,26
11	0,21	–	–	–	0,66	0,83	104,59

Сталь 40, $W_p = 0,13$ Дж (крок 10 мкм)



	S	Cu	Cr	Ni	Mn	Si	Fe
1	1,22	–	–	–	0,19	50,38	50,74
2	0,54	–	–	–	0,29	40,87	19,07
3	0,62	–	–	–	0,43	5,73	55,58
4	0,72	–	–	–	0,49	5,09	73,79
5	0,83	–	–	–	0,43	20,55	38,26
6	0,40	–	–	–	0,32	37,74	25,57
7	1,11	–	–	–	0,45	17,08	42,63

Продовження таблиці 5.5

1	2	3	4	5	6	7	8
8	1,35	–	–	–	0,35	3,64	83,39
9	0,83	–	–	–	0,72	1,93	94,94
10	0,25	–	–	–	0,76	1,83	96,20
11	0,25	–	–	–	0,92	0,59	98,27

Таким чином, вивчені можливості застосування енергоефективного та екологічно чистого методу одночасного насичення вуглецем і сіркою сталевих поверхонь деталей методом електроіскрового легування. В результаті аналізу топографії поверхневого шару після сульфоцементації методом ЕІЛ встановлений однотипний характер форми сформованих елементів мікронерівностей поверхні. Значне збільшення мікронерівностей на поверхні зразка спостерігається зі збільшенням енергії розряду до $W_p = 3,4$ Дж. Шорсткість поверхні при цьому становить $R_a = 2,5$ мкм. Металографічний і дюрOMETричний аналіз після сульфоцементації методом ЕІЛ показали, що оброблена поверхня складається із шарів: «м'якого», зміцненого й основного металу. З ростом енергії розряду збільшується товщина, мікротвердість і суцільність покриття. Наявність в консистентній речовині сірки сприяє процесу сульфідуювання.

Зі збільшенням енергії розряду з 0,13 до 3,4 Дж при ЕІЛ сталі 20 кількість сірки на поверхні покриття зменшується, однак за рахунок інтенсифікування дифузійних процесів при проходженні електроіскрового розряду товщина сульфідованого шару збільшується. Сірка накопичується в поверхні металу на глибині до 30 мкм, її концентрація на цій відстані становить близько 0,4%.

При сульфоцементації сталі 40 будова покриття не змінюється. У зв'язку з проходженням гартівних процесів, а також в результаті підвищеного вмісту вуглецю в поверхневому шарі мікротвердість отриманих шарів на сталі 40

збільшується: при $W_p = 0,13$ Дж $H_{\mu} = 7074$ МПа, а при $W_p = 0,52$ Дж $H_{\mu} = 13065$ МПа. Суцільність «білого» шару при $W_p = 0,13$ Дж становить близько 70%, а при $W_p = 0,52$ Дж прагне до 100%.

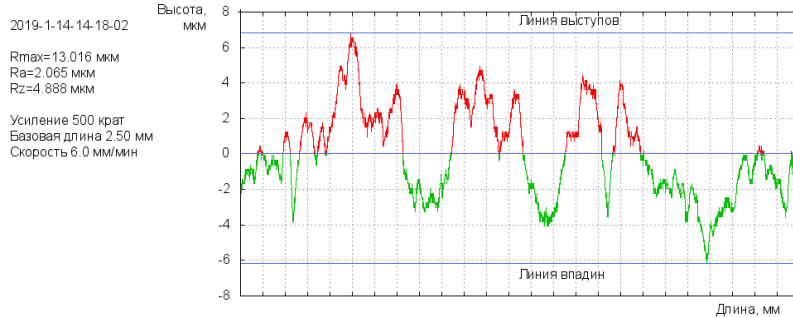
Результати мікрорентгеноспектрального аналізу зразків зі сталі 40 свідчать про те, що при сульфоцементзації методом ЕІЛ поверхневі шари на глибині 10-40 мкм, залежно від енергетичних параметрів процесу, насичені сіркою. Ця зона – шар зниженої мікротвердості, так само, як і на сталі 20, характеризується зниженою мікротвердістю. Під цим шаром формується зміцнений шар, він характеризується підвищеним вмістом вуглецю і високою мікротвердістю. Товщина зміцненого шару так само залежить від енергетичних параметрів ЕІЛ і становить 15-40 мкм.

5.2. Аналіз якості сульфоалітованих покриттів, отриманих методами ЕІЛ

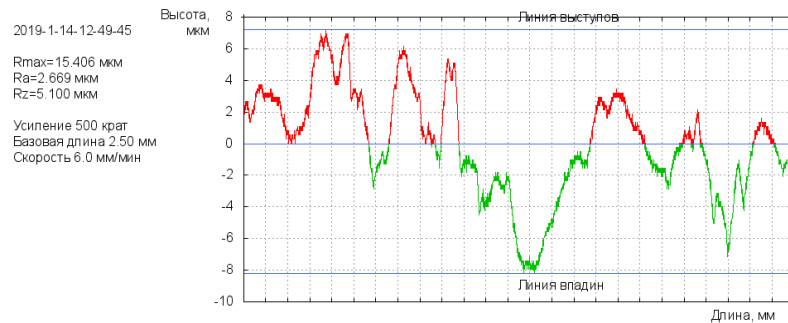
Аналіз отриманих профілів поверхонь зразків після сульфоалітування методом ЕІЛ і розрахованих за ними параметрів шорсткості досліджуваних поверхонь показує, що параметри: R_a , R_z , R_{max} змінюються залежно від енергії розряду, а також від матеріалу основи (рис. 5.13). Параметри збільшуються в наступному напрямку: зі збільшенням енергії розряду та вмісту вуглецю в сталі основи (табл. 5.6).

На рис. 5.14 представлені мікроструктури зразків зі сталі 20 після сульфоалітування методом ЕІЛ, який полягав у нанесенні консистентної речовини, що містить сірку, і легування алюмінієвим електродом. Проведений металографічний і дюрOMETричний аналізи свідчать про те, що на мікроструктурах можна виділити три зони: приповерхневий, не суцільний пухкий шар, товщиною 10-100 мкм і мікротвердістю 1368-2073 МПа, «білий» зміцнений шар товщиною 20-40 мкм і мікротвердістю 4094-5157 МПа, дифузійна зона й основний метал з ферито-перлітною структурою. Необхідно

відзначити, що зі зростанням енергії розряду збільшуються параметри шару: товщина, мікротвердість верхнього і білого шару, а також їх суцільність (табл. 5.6).



а



б

а – сталь 20; б – сталь 40

Рисунок 5.13 – Профілограми поверхні після сульфоалітування, $W_p = 0,55$ Дж

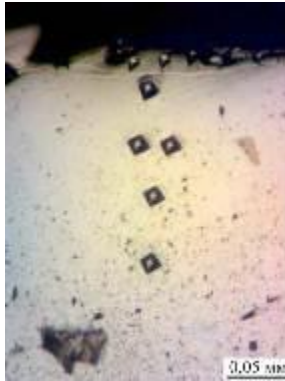
Таблиця 5.6 – Якісні параметри сульфоалітованих покриттів, отриманих методом ЕІЛ

Енергія розряду, Дж	Шорсткість, мкм			Шар зниженої мікротвердості			Зміцнений шар		
	Ra	Rz	Rmax	H _ц , МПа	h, мкм	S, %	H _ц , МПа	h, мкм	S, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сталь 20									
0,13	0,8	2,3	6,8	1368	40	50	4094	20	70
0,55	2,1	4,9	13,0	1666	30	65	4575	30	85
3,4	6,2	18,3	40,8	2073	20	80	7150	80	95

Продовження таблиці 5.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сталь 40									
0,13	0,9	2,6	7,1	1670	40	50	5147	20	75
0,55	2,7	5,1	15,4	1820	30	70	9123	40	90
3,4	6,1	18,7	38,8	2240	30	80	10380	70	95

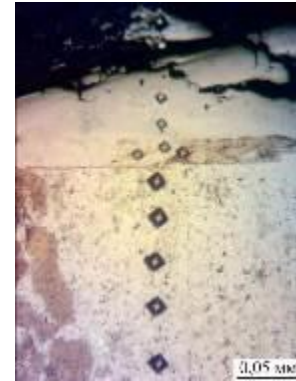
S, % - суцільність шару



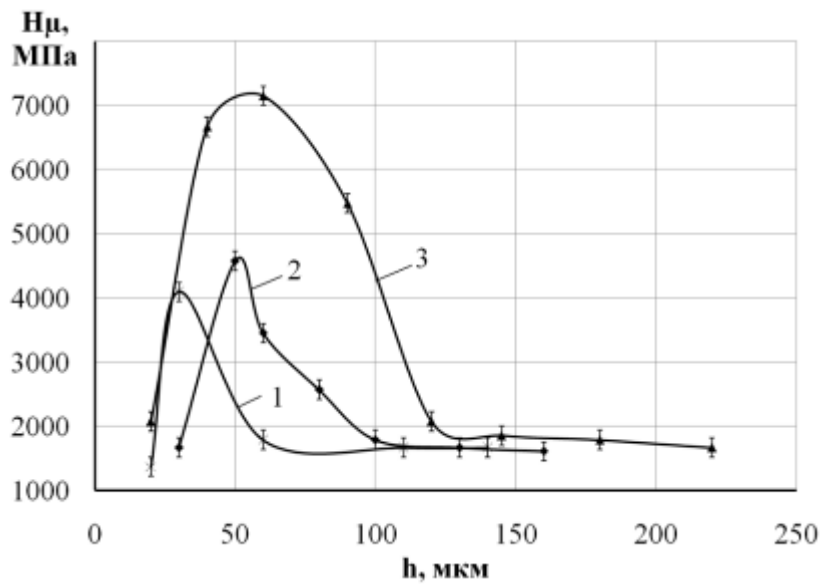
а



б



в

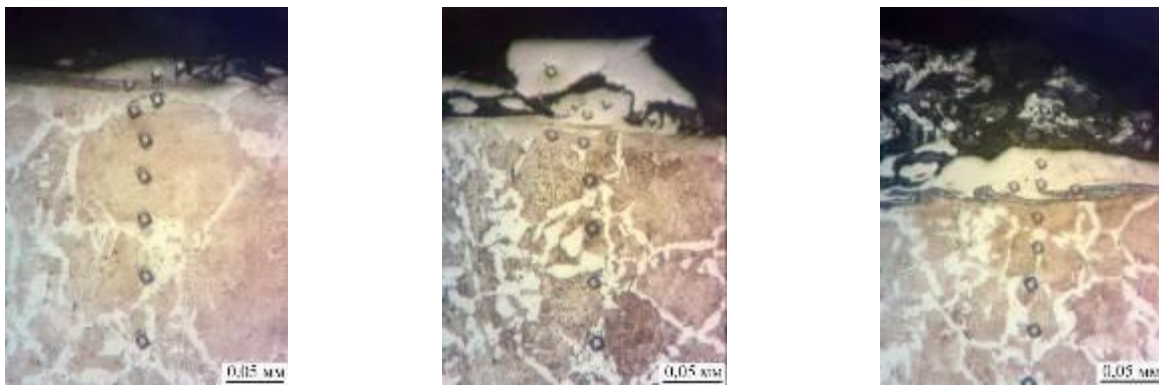


г

а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 3,4$ Дж;

г – на графіку 1 – $W_p = 0,13$ Дж, 2 – $W_p = 0,55$ Дж, 3 – $W_p = 3,4$ Дж

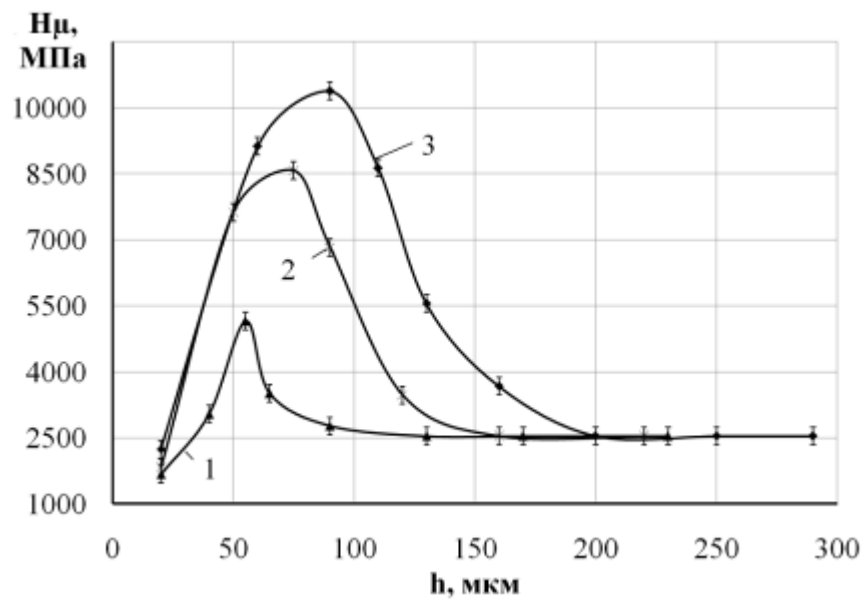
Рисунок 5.14 – Мікроструктури (а-в) і розподіл мікротвердості (г) в поверхневому шарі сталі 20 після сульфоалітування методом ЕІЛ



а

б

в



г

а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 3,4$ Дж;

г – на графіку 1 – $W_p = 0,13$ Дж, 2 – $W_p = 0,55$ Дж, 3 – $W_p = 3,4$ Дж

Рисунок 5.15 – Мікроструктури (а-в) і розподіл мікротвердості (г) в поверхневому шарі сталі 40 після сульфалітування методом ЕІЛ

При заміні матеріалу підкладки на сталь 40 збільшується як твердість верхнього шару (1670 і 2240 МПа при енергіях розряду 0,13 і 3,4 Дж відповідно), так і зміцненого шару (5147 і 10380 МПа при енергіях розряду 0,13 і 3,4 Дж відповідно). Збільшення мікротвердості зі збільшенням вмісту вуглецю підкладки спостерігалось і при інших процесах легування, наприклад,

алітуванні [264, 295, 339], сульфоцементації [268, 298, 300]. Очевидно, вплив вмісту вуглецю в основному матеріалі обумовлений формуванням багатофазної гартівної структури.

Електронно-мікроскопічні дослідження свідчать про те, що в результаті сульфоалітування методом ЕІЛ утворюються якісні шари високої щільності (рис. 5.16).



а

б

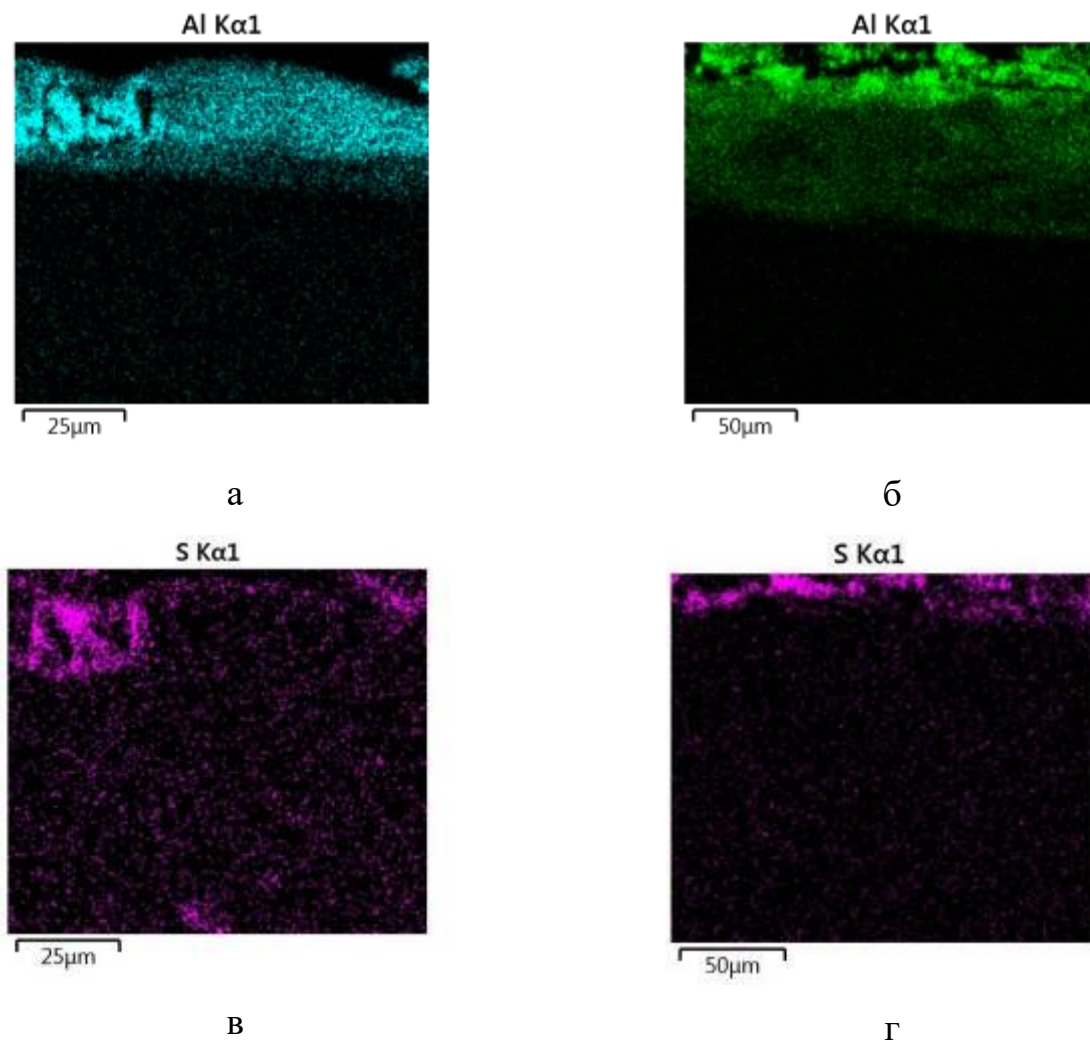
в

а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 3,4$ Дж;

Рисунок 5.16 – Структури поверхневих шарів сталі 40 після сульфоалітування методом ЕІЛ

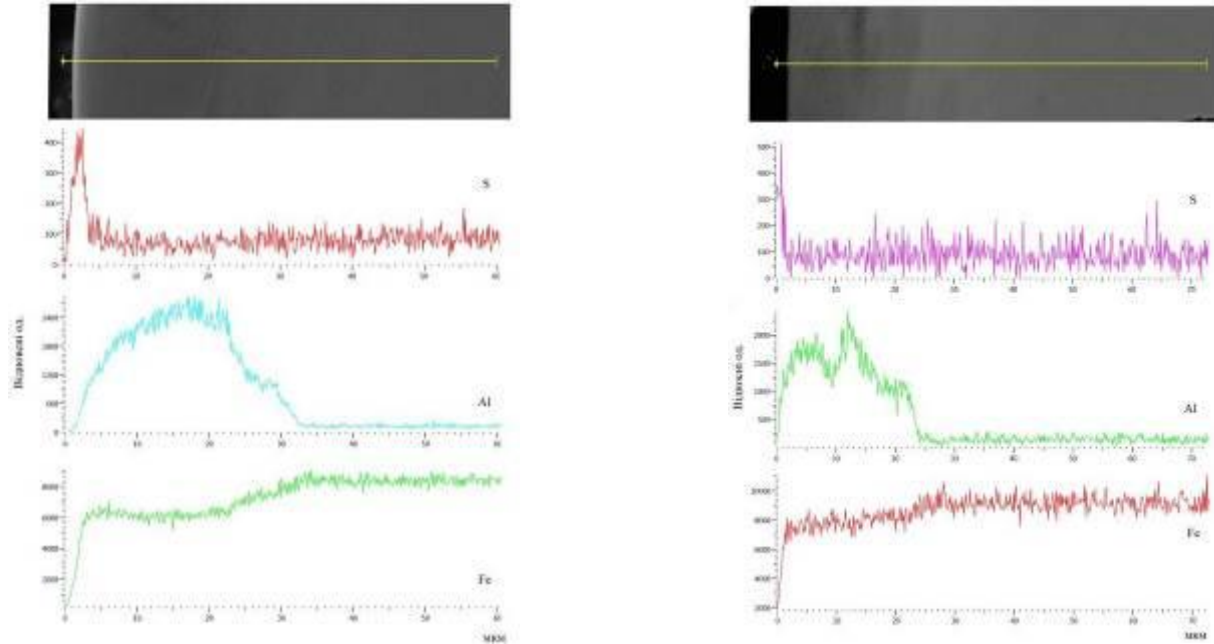
На рисунку 5.17 представлені карти розподілу сірки й алюмінію в сульфоалітованих покриттях, отриманих при різних режимах ЕІЛ. Як показали дослідження, найбільша кількість сірки знаходиться у поверхневому шарі, що характеризує шар зниженої мікротвердості і розподіляється по глибині до 10 мкм. Дифузійна зона алюмінію складає 30-80 мкм, залежно від енергетичних параметрів процесу ЕІЛ. Необхідно відзначити, що найбільший вміст алюмінію характерний для ділянок покриття, що знаходяться на відстані 7-15 мкм від поверхні (рис. 5.18). Отже, приповерхневий «м'який» шар збагачений сіркою, зміцнений – алюмінієм.

Як свідчать результати рентгенографічних досліджень, фазовий склад покриттів залежить від енергетичних параметрів ЕІЛ, а також від вмісту вуглецю в матеріалі основи. При всіх досліджуваних енергіях розряду в поверхневому шарі утворюється інтерметалід FeAl , зі збільшенням енергії розряду – FeAl_2 (рис. 5.19-5.20). Крім того, в сталі 20 виявляється твердий розчин ОЦК, а в сталі 40 при енергіях розряду $W_p = 0,13$ Дж і $W_p = 0,55$ Дж – твердий розчин ГЦК, при $W_p = 3,4$ Дж – твердий розчин ОЦК (табл. 5.7-5.8).



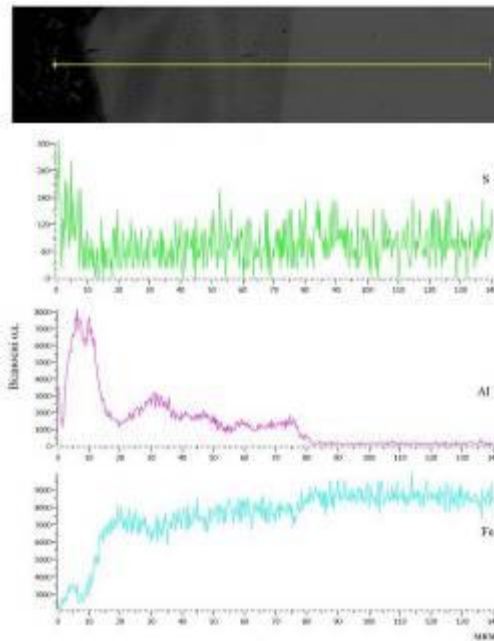
а, в – $W_p = 0,13$ Дж; б, г – $W_p = 3,4$ Дж;

Рисунок 5.17 – Карти розподілу хімічних елементів в покритті після сульфоалітування сталі 40 методом ЕІЛ з різною енергією розряду



а

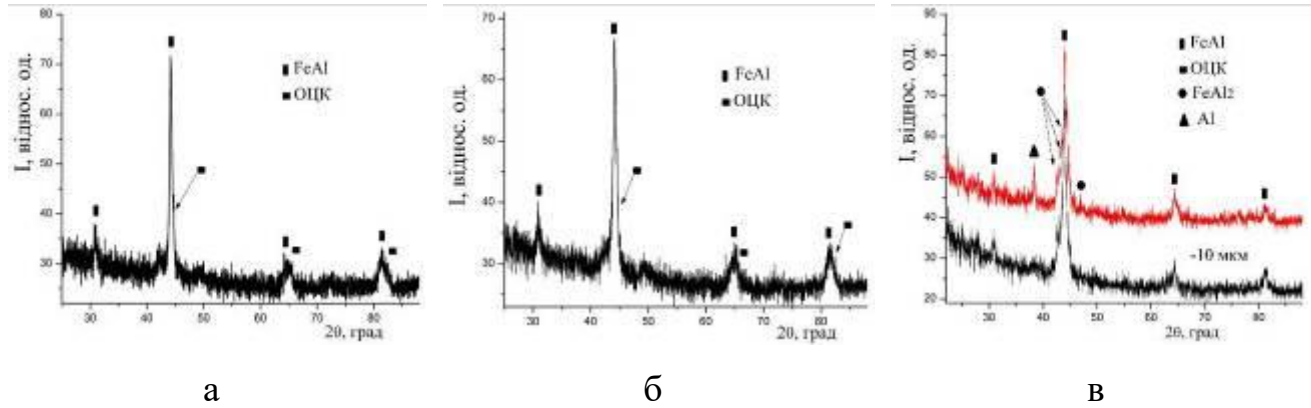
б



в

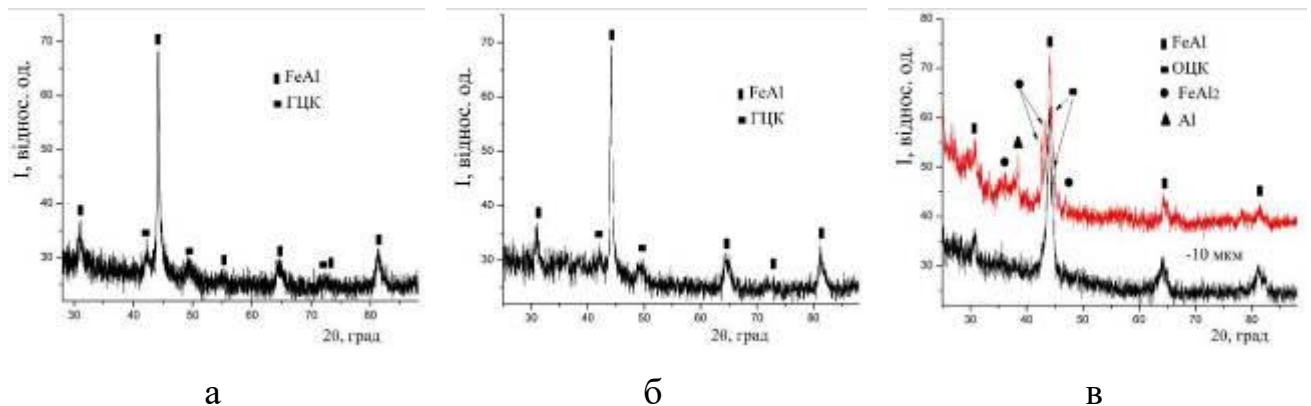
а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 3,4$ Дж;

Рисунок 5.18 – Концентраційні криві розподілу елементів в покритті сталі 40 після сульфалітування методом ЕІЛ



а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; а – $W_p = 3,4$ Дж

Рисунок 5.19 – Дифрактограми сульфоалітованих покриттів, отриманих методом ЕІЛ, на сталі 20



а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; а – $W_p = 3,4$ Дж

Рисунок 5.20 – Дифрактограми сульфоалітованих покриттів, отриманих методом ЕІЛ, на сталі 40

Формування фазового складу сульфоалітованих покриттів, утворення сульфідів і зміна їх хімічного складу значно залежить від розчинності і дифузійної рухливості сірки в аустеніті та фериті. У зв'язку з цим в ряді робіт [340-343] досліджена дифузія сірки в залізі і сталях. Встановлено, що введення сірки в альфа-залізо знижує коефіцієнт дифузії вуглецю (D_0) й енергію активації дифузії (Q), зменшує його розчинність в ньому. Щодо впливу на дифузію і

розчинність вуглецю в альфа-залізі сірка виявляє себе як типовий некарбідотвірний елемент. Також досліджений вплив алюмінію на розчинність сірки в гамма-залізі. Отримані авторами концентраційні криві розподілу сірки показали, що алюміній підвищує розчинність сірки в залізі.

Таблиця 5.7 – Параметри кристалічних ґраток фаз і кількісний фазовий аналіз сульфоалітованих покриттів на сталі 20

Енергія розряду, Дж	Фаза	Період ґраток, a , Å	Вміст фази, % (мас.)	
1	2	3	4	
0,13	FeAl	$a=2,9040$	78,58	
	Твердий розчин ОЦК	$a=2,8750$	21,42	
0,55	FeAl	$a=2,9040$	79,25	
	Твердий розчин ОЦК	$a=2,8750$	20,75	
3,4	FeAl	$a=2,9040$	33,58	
	Твердий розчин ОЦК	$a=2,8650$	10,58	
	FeAl ₂	$a=4,8745$ $b=6,4545$ $c=8,7710$ $\alpha=87,9300$ $\beta=74,3960$ $\gamma=83,0620$	47,49	
	Al	$a=4,0610$	8,35	
	На відстані 10 мкм від поверхні			
	FeAl	$a=2,9040$	37,31	
	Твердий розчин ОЦК	$a=2,8650$	10,52	
	FeAl ₂	$a=4,8745$ $b=6,4545$ $c=8,7710$ $\alpha=87,9300$ $\beta=74,3960$ $\gamma=83,0620$	52,17	

Таблиця 5.8 – Параметри кристалічних ґраток фаз і кількісний фазовий аналіз сульфоалітованих покриттів на сталі 40

Енергія розряду, Дж	Фаза	Період ґраток, a , Å	Вміст фази, % (мас.)	
0,13	FeAl	$a=2,8970$	85,37	
	Твердий розчин ГЦК	$a=3,6820$	14,63	
0,55	FeAl	$a=2,9040$	93,71	
	Твердий розчин ГЦК	$a=3,6980$	6,29	
3,4	FeAl	$a=2,9040$	36,72	
	Твердий розчин ОЦК	$a=2,8650$	13,60	
	FeAl ₂	$a=4,8745$ $b=6,4545$ $c=8,7710$ $\alpha=87,9300$ $\beta=74,3960$ $\gamma=83,0620$	41,21	
	Al	$a=4,0610$	8,47	
	На відстані 10 мкм від поверхні			
	FeAl	$a=2,9040$	47,35	
	Твердий розчин ОЦК	$a=2,8800$	13,11	
	FeAl ₂	$a=4,8745$ $b=6,4545$ $c=8,7700$ $\alpha=87,9300$ $\beta=74,3960$ $\gamma=83,0620$	39,55	

Очевидно, у зв'язку зі складним впливом сірки на фазові перетворення в поверхневому шарі сталі при ЕІЛ алюмінієвим електродом, сірка розчиняється у твердому розчині і сульфіді не утворюються.

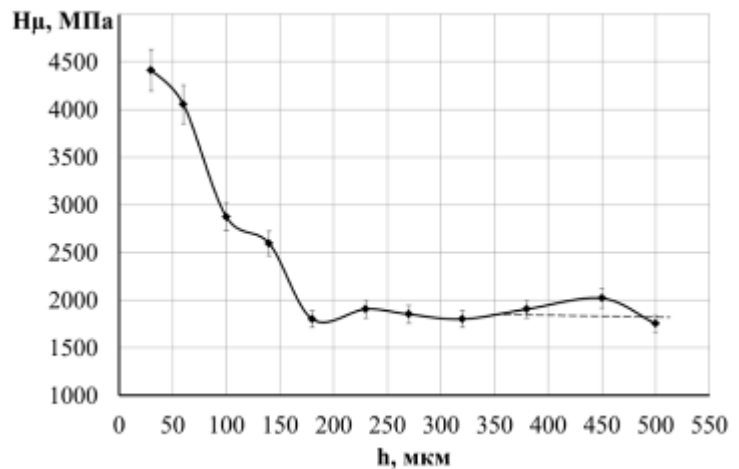
Наявність піків твердих розчинів ГЦК на дифрактограмах сульфоалітованих покриттів на сталі 40 при енергіях розряду $W_p = 0,13$ Дж та $W_p = 0,55$ Дж є наслідком невеликої товщини покриттів (до 40 мкм), низького коефіцієнту поглинання рентгенівських променів алюмінієм, а також більшого

ступеня перемішування матеріалу основи з матеріалом електроду. У зв'язку з цим, виникає імовірність фіксування фазового складу перехідної зони, що знаходиться під покриттям. Очевидно, утворення твердого розчину ГЦК пов'язане з легуванням матеріалу основи, гартівними процесами середньовуглецевих сталей під час прискореного охолодження, і, як наслідок, утворення залишкового аустеніту.

З метою створення товстошарових покриттів апробувалася технологія сульфолітування методом ЕІЛ за схемою: змішування сірчаної мазі й алюмінієвої пудри у відношенні 33,3% S і 56% Al (вагові %), ЕІЛ алюмінієвим електродом при $W_p = 6,8$ Дж. На рис. 5.21 показана мікроструктура сформованого поверхневого шару на зразку зі сталі 20 і розподіл мікротвердості по глибині покриття. Характерною особливістю структури, сформованої поверхні, є масивний «білий» шар, товщина якого на окремих ділянках складає від 160 до 200 мкм (рис. 5.21, а). Мікротвердість на поверхні становить близько 5000 МПа. Від поверхні до основи мікротвердість плавно знижується і на глибині 170 мкм переходить в мікротвердість основи (1700 МПа).



а



б

Рисунок 5.21 – Мікроструктура (а) і розподіл мікротвердості в поверхневому шарі (б) зразка сталі 20 після ЕІЛ алюмінієм ($W_p = 6,8$ Дж)

Дослідження показали, що збільшення енергії розряду не приводить до значного зміцнення поверхневого шару – мікротвердість зміцненого шару на сталі 20 при $W_p = 3,4$ Дж становить 7150 МПа, а при $W_p = 6,8$ Дж – близько 5000 МПа і товщина шару збільшується з 80 до 200 мкм. Однак із посиленням енергетичного впливу при ЕІЛ збільшується шорсткість поверхні (рис. 5.22). Таким чином, з метою отримання товстошарових сульфоалітованих покриттів можна рекомендувати розглянуту технологію.

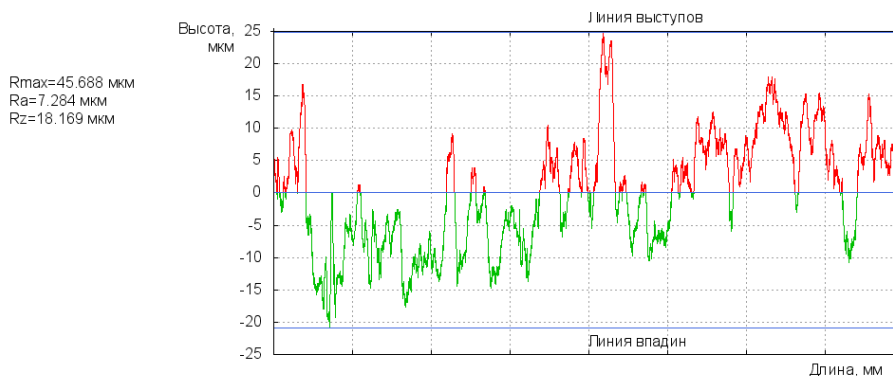


Рисунок 5.22 – Профілограма поверхні зразка зі сталі 20 після сульфоалітування (33,3% S і 56% Al (вагові %), ЕІЛ алюмінієвим електродом при $W_p = 6,8$ Дж)

Таким чином, аналіз профілів поверхонь зразків після сульфоалітування методом ЕІЛ і параметрів шорсткості досліджуваних поверхонь показав, що зі збільшенням енергії розряду, а також вмісту вуглецю в сталі параметри R_a , R_z , R_{max} зростають. Металографічний та дюрOMETричний аналізи отриманих покриттів на сталі 20 свідчать про те, що на мікроструктурах можна виділити три зони: приповерхневий, не суцільний пухкий шар, товщиною 10-100 мкм і мікротвердістю 1368-2073 МПа, «білий» зміцнений шар товщиною 20-40 мкм і мікротвердістю 4094-5157 МПа, дифузійна зона й основний метал з ферито-перлітною структурою. Необхідно відзначити, що зі зростанням енергії розряду збільшуються параметри шару: товщина, мікротвердість верхнього і білого шару, а також їх суцільність. При заміні матеріалу підкладки на сталь 40

збільшується як твердість верхнього шару (1670 і 2240 МПа при енергіях розряду 0,13 і 3,4 Дж відповідно), так і зміцненого шару (5147 і 10380 МПа при енергіях розряду 0,13 і 3,4 Дж відповідно). Локальний мікрорентгено-спектральний аналіз показав, що найбільша кількість сірки знаходиться у поверхневому шарі, що характеризує шар зниженої мікротвердості і розподіляється по глибині до 10 мкм. Дифузійна зона алюмінію складає 30-80 мкм, залежно від енергетичних параметрів процесу ЕІЛ. Найбільший вміст алюмінію характерний для ділянок покриття, що знаходяться на відстані 7-15 мкм від поверхні. Приповерхневий «м'який» шар збагачений сіркою, зміцнений – алюмінієм.

Як свідчать результати рентгенографічних досліджень, фазовий склад покриттів залежить від енергетичних параметрів ЕІЛ, а також від вмісту вуглецю в матеріалі основи. При всіх досліджуваних енергіях розряду в поверхневому шарі утворюється інтерметалід $FeAl$, зі збільшенням енергії розряду – інтерметалід $FeAl_2$. Крім того, в сталі 20 виявляється твердий розчин ОЦК, а в сталі 40 при енергіях розряду $W_p = 0,13$ Дж і $W_p = 0,55$ Дж – твердий розчин ГЦК, а при $W_p = 3,4$ Дж – твердий розчин ОЦК.

5.3. Аналіз якості покриттів системи Al-C-S, отриманих методами ЕІЛ

Комплексні Al-C-S покриття отримували методом ЕІЛ за технологією, що представлена у табл. 5.9.

Таблиця 5.9 – Технологія отримання комплексних Al-C-S покриттів

Склад консистентної речовини	Легуючий електрод (анод)
33,3%S + 56%Al (вагові %)	графіт

Мікроструктурний аналіз зразків показав, що у поверхневому шарі спостерігається утворення окремих лунок, глибиною до 150 мкм. Як показано в

роботі [119] при проходженні електроіскрового розряду в металі утворюється лунка – кратер, глибина і діаметр якої залежать від параметрів електроіскрового впливу. Іскровий розряд супроводжується виділенням тепла, швидкість наростання температури становить 10^5 °С / сек, що характерно тільки для вибухових процесів [344]. За даними роботи [238], близько 25% об'єму металу електроерозійних кратерів набуває температуру кипіння, миттєві тиски на поверхні досягають сотень тисяч атмосфер.

На зразку сталі 20 в області кратера виокремлюється три зони (рис. 5.23).

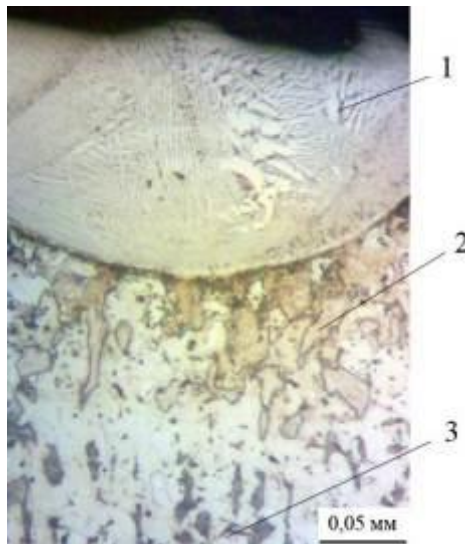


Рисунок 5.23 – Мікроструктура зразка зі сталі 20: 1, 2, 3 – зони в області кратера (електрод – графіт, $W_p = 6,8$ Дж, поверхня зразка зі сталі 20 перед ЕІЛ покрита консистентною речовиною, що містить 33,3% сірки і 56% алюмінієвої пудри)

Перша зона – оплавлення, погано витравлюється, метал цієї зони при ЕІЛ знаходився в рідкому стані. Вона складається зі стовпчастих кристалів, велика швидкість кристалізації визначила анізотропію росту кристалів, тобто прискорене зростання головних осей дендритів, орієнтованих у напрямку відводу тепла. Товщина шару стовпчастих кристалів на бічній поверхні зростає від дна до виходу лунки [345, 346].

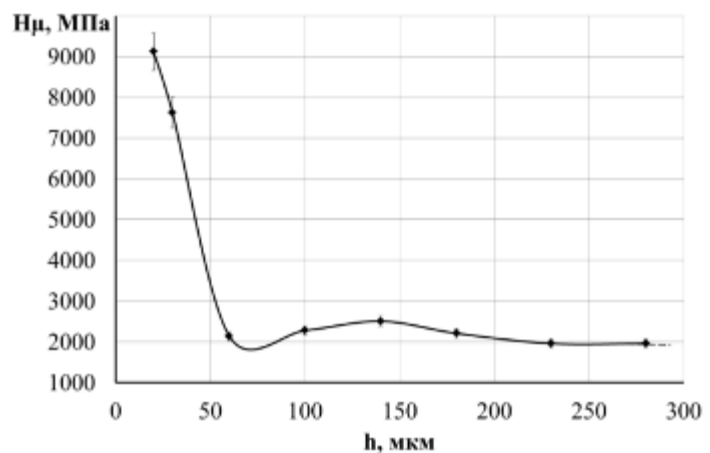
Друга – перехідна зона прилягає до першої, складається із зерен складної форми – зона термічного впливу. Третя – зона вихідного металу прилягає до перших двох, має вихідну структуру.

Вивчено вплив режимів ЕІЛ на якісні параметри Al-C-S-покриттів.

Мікроструктурний аналіз Al-C-S-покриттів на сталі 20 показав (рис. 5.24, а), що на поверхні формується «білий» шар, далі дифузійна зона і основний метал. Також необхідно відзначити, що при ЕІЛ сталі 20 графітом суцільність і товщина «білого» шару становить 50% і 60 мкм, відповідно (при $W_p = 6,8$ Дж). У свою чергу мікротвердість на поверхні складає 9000 МПа (рис. 5.22, б і табл. 5.10). У роботі [119] показано, що при електроіскровий обробці сплавів на основі заліза виникає значне зменшення розмірів блоків субструктури, збільшення щільності дефектів і зростання мікрвикривлень у зоні термічного впливу. Такі зміни в мікроструктурі і субструктурі сталі призводять до помітного підвищення мікротвердості «білого шару» (рис. 5.24). Певну роль у підвищенні твердості можуть грати елементи атмосфери (азот, кисень), які, переходячи під дією електричних розрядів в активний стан, можуть взаємодіяти з поверхневими шарами і зміцнювати матеріал.



а



б

Рисунок 5.24 – Мікроструктура (а) і розподіл мікротвердості в поверхневому шарі (б) зразка сталі 20 після ЕІЛ графітом ($W_p = 6,8$ Дж)

Таблиця 5.10 – Якісні параметри поверхневих шарів системи Al-C-S, отриманих методом ЕІЛ, на сталях 20 і 40

Енергія розряду, Дж	Товщина білого шару, мкм	Мікротвердість білого шару, МПа	Шорсткість, мкм			Суцільність білого шару, %
			Ra	Rz	Rmax	
Сталь 20						
0,52	150	9300±50	2,1	3,9	8,9	90
2,60	110	9200±70	4,2	8,7	30,2	80
6,8	до 60	9000±50	8,5	10,2	62,4	50
Поетапно 6,8 і 2,6	до 60	9000±50	4,3	8,4	32,3	70
Поетапно 6,8; 2,6 і 0,52	до 60	9000±50	2,6	4,4	11,5	80
Сталь 40						
0,52	до 180	9500±50	1,9	3,8	8,7	90
2,60	до 130	9300±50	3,9	8,5	15,3	80
6,8	до 80	9100±50	7,8	11,3	58,1	60

Наявність у консистентній речовині сірки сприяє процесу сульфідуювання. У таблиці 5.11 представлена зміна вмісту сірки за глибиною від поверхні сталі 20 після ЕІЛ з енергією розряду 6,80 Дж. Так, на поверхні кількість сірки максимальна і зменшується в міру віддалення від поверхні.

Таблиця 5.11 – Вміст сірки в поверхневому шарі сталі 20 при одночасному насиченні сталі вуглецем, сіркою і алюмінієм методом ЕІЛ

Відстань від поверхні, мкм	20	40	60	80	100	120	140	160	180
Вміст сірки, %	0,21	0,15	0,12	0,09	0,08	0,05	0,05	0,03	0,03

Слід зазначити, що при одночасному насиченні сталі вуглецем, сіркою і алюмінієм, методом ЕІЛ при значному збільшенні енергії розряду (з 0,52 до 6,8 Дж) відбувається зростання шорсткості поверхні і зменшення суцільності

покриття (табл. 5.10). На рис. 5.25 представлена профілограма поверхні зразка після ЕІЛ.

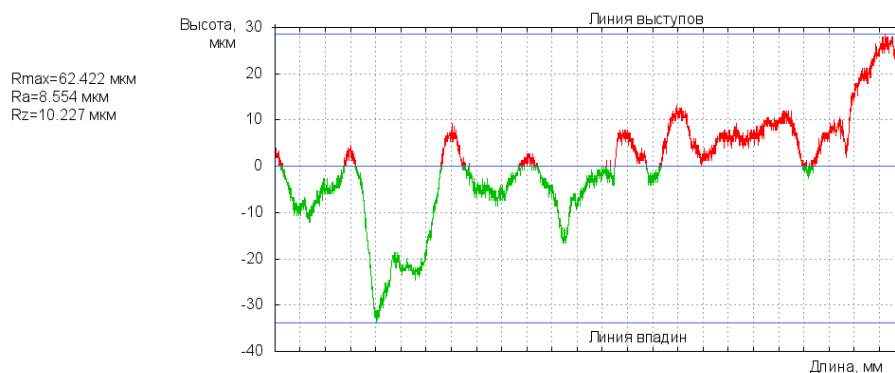


Рисунок 5.25 – Профілограми поверхневих шарів зразків зі сталі 20 (33,3% S + 56% Al (вагові %), ЕІЛ графітовим електродом при $W_p = 6,8$ Дж)

Проведене дослідження одночасного насичення сталі 38Х2МЮА вуглецем, сіркою й алюмінієм методом ЕІЛ графітовим електродом на різних режимах.

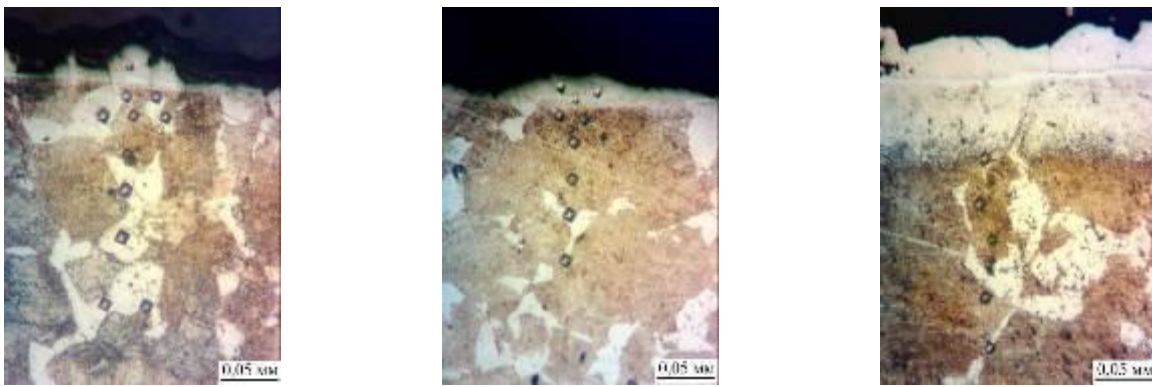
Металографічний аналіз показав, що покриття, отримані при $W_p = 0,13$ Дж і $0,52$ Дж складаються з 3-х зон (рис. 5.26):

- 1) білий шар,
- 2) перехідна зона,
- 3) основний метал.

Однак, зі збільшенням енергії розряду до $4,9$ Дж, між білим шаром і перехідною зоною формується підшар товщиною до 10 мкм (рис. 5.26, в).

Крім того, зі збільшенням енергії розряду збільшується товщина білого шару і його суцільність (табл. 5.12). Так, при $W_p = 0,13$ Дж і $W_p = 4,9$ Дж товщина «білого» шару становить 10 і 70 мкм, суцільність 60 і 100% , відповідно.

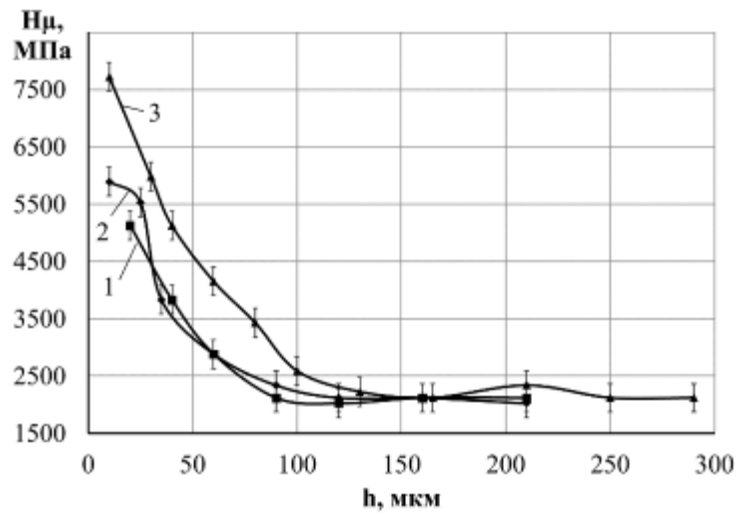
ДюрOMETричні дослідження показали, що зі збільшенням енергії розряду збільшується мікротвердість «білого шару». Так, при енергії розряду $W_p = 0,13$ Дж $H_\mu = 5126$ МПа, а при $W_p = 4,9$ Дж $H_\mu = 7721$ МПа (рис. 5.26).



а

б

в



г

а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,52$ Дж; в – $W_p = 4,9$ Дж;

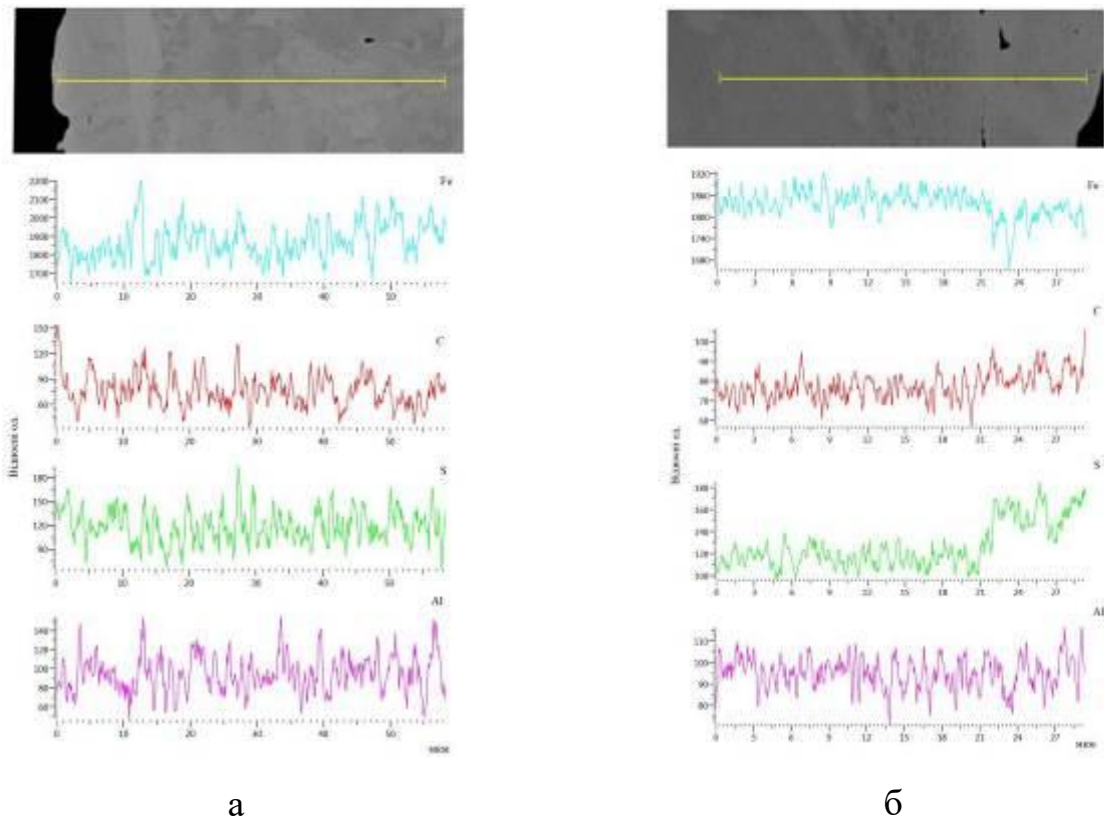
г – на графіку 1 – $W_p = 0,13$ Дж, 2 – $W_p = 0,52$ Дж, 3 – $W_p = 4,9$ Дж

Рисунок 5.26 – Мікроструктури (а, б, в) і розподіл мікротвердості в поверхневому шарі (г) зразків сталі 38X2MЮА після насичення сіркою, алюмінієм і вуглецем методом ЕІЛ

Енергія розряду, при якій відбувається процес ЕІЛ впливає на розподіл елементів в отриманому покритті. В результаті аналізу рисунку 5.27 встановлено, що зі збільшенням енергії розряду на поверхні покриттів спостерігається зменшення кількості сірки, що, мабуть, пов'язано з вигоранням сірки при протіканні імпульсного розряду в процесі ЕІЛ.

Таблиця 5.12 – Якісні параметри поверхневих шарів при одночасному насиченні сталі 38Х2МЮА вуглецем, сіркою й алюмінієм методом ЕІЛ

Енергія розряду, Дж	Товщина білого шару, мкм	Мікротвердість білого шару, МПа	Шорсткість, мкм			Суцільність білого шару, %
			Ra	Rz	Rmax	
0,13	10	5126	0,8	2,1	6,5	60
0,52	30	5890	2,3	4,4	15,1	90
4,9	70	7721	8,2	18,3	47,3	100



а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 4,9$ Дж

Рисунок 5.27 – Розподіл елементів в Al-C-S покритті, отриманого методом ЕІЛ

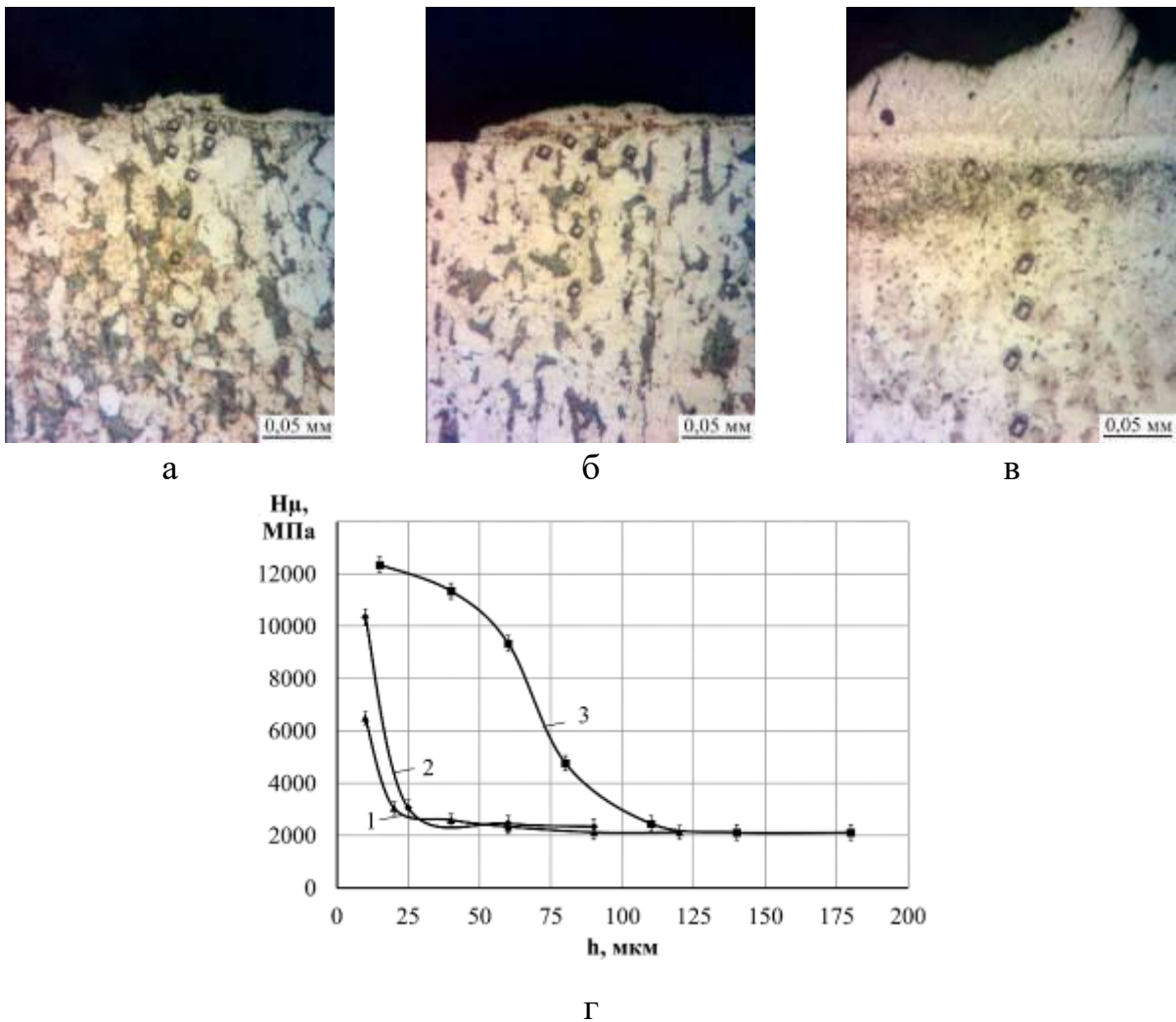
Таким чином, досліджені особливості структуроутворення Al-C-S покриттів, отриманих методом ЕІЛ. Показано, що у поверхневому шарі спостерігається утворення окремих лунок, глибиною до 150 мкм. На зразку

сталі 20 в області кратера виокремлюється три зони: перша зона – оплавлення, погано витравлюється, метал цієї зони при ЕІЛ знаходився в рідкому стані. Друга – перехідна зона прилягає до першої, складається із зерен складної форми – зона термічного впливу. Третя – зона вихідного металу прилягає до перших двох, має вихідну структуру. Вивчено вплив режимів ЕІЛ на якісні параметри Al-C-S-покриттів. При значному збільшенні енергії розряду (з 0,52 до 6,8 Дж) відбувається зростання шорсткості поверхні і зменшення суцільності покриття.

Мікроструктурний аналіз Al-C-S-покриттів на сталі 20 показав, що суцільність і товщина «білого» шару становить 50% і 60 мкм, відповідно (при $W_p = 6,8$ Дж). У свою чергу мікротвердість на поверхні складає 9000 МПа. Наявність у консистентній речовині сірки сприяє процесу сульфидування: на поверхні кількість сірки максимальна і зменшується в міру віддалення від поверхні. Проведене дослідження одночасного насичення сталі 38X2МЮА вуглецем, сіркою й алюмінієм методом ЕІЛ графітовим електродом на різних режимах. Металографічний аналіз показав, що покриття, отримані при $W_p = 0,13$ Дж і $0,52$ Дж складаються з 3-х зон: білий шар, перехідна зона і основний метал. Однак, зі збільшенням енергії розряду до 4,9 Дж, між білим шаром і перехідною зоною формується підшар товщиною до 10 мкм. Крім того, зі збільшенням енергії розряду зростає товщина білого шару, його мікротвердість і суцільність. Так, при $W_p = 0,13$ Дж і $W_p = 4,9$ Дж товщина «білого» шару становить 10 і 70 мкм, $H_\mu = 5126$ МПа і $H_\mu = 7721$ МПа, суцільність 60 і 100%, відповідно. Мікрорентгеноспектральний аналіз показав, що вміст сірки на поверхні максимальний і різко зменшується вглиб металу.

5.4. Аналіз якості покриттів системи Al-C-V, отриманих методами ЕІЛ, алюмінієвим електродом

Результати досліджень свідчать про те, що мікроструктура Al-C-V покриттів складається з декількох ділянок, кількість і параметри яких визначаються енергетичними режимами процесу ЕІЛ (рис. 5.28).



а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 4,9$ Дж;

г – на графіку 1 – $W_p = 0,13$ Дж, 2 – $W_p = 0,55$ Дж, 3 – $W_p = 4,9$ Дж

Рисунок 5.28 – Мікроструктури (а-в) і розподіл мікротвердості (г) Al-C-V покриттів на сталі 40

При відносно невисоких енергіях розряду (0,13 і 0,55 Дж) шари складаються з 3-х ділянок – верхній «білий» зміцнений шар, дифузійна зона і основний метал – сталь 40 з ферито-перлітною структурою (рис. 5.28, а, б). При цьому, величина «білого» шару для цих режимів становить 15-20 мкм (табл. 5.13). Збільшення енергії розряду до 4,9 Дж призводить до зміни кількості ділянок та їх структури (рис. 5.28, в): верхній шар з дендритною структурою (до

60 мкм), прошарок (до 20 мкм), дифузійна зона, що характеризується подрібненими структурними складовими і в зв'язку з цим має підвищену травимість в реактиві, а також основного металу.

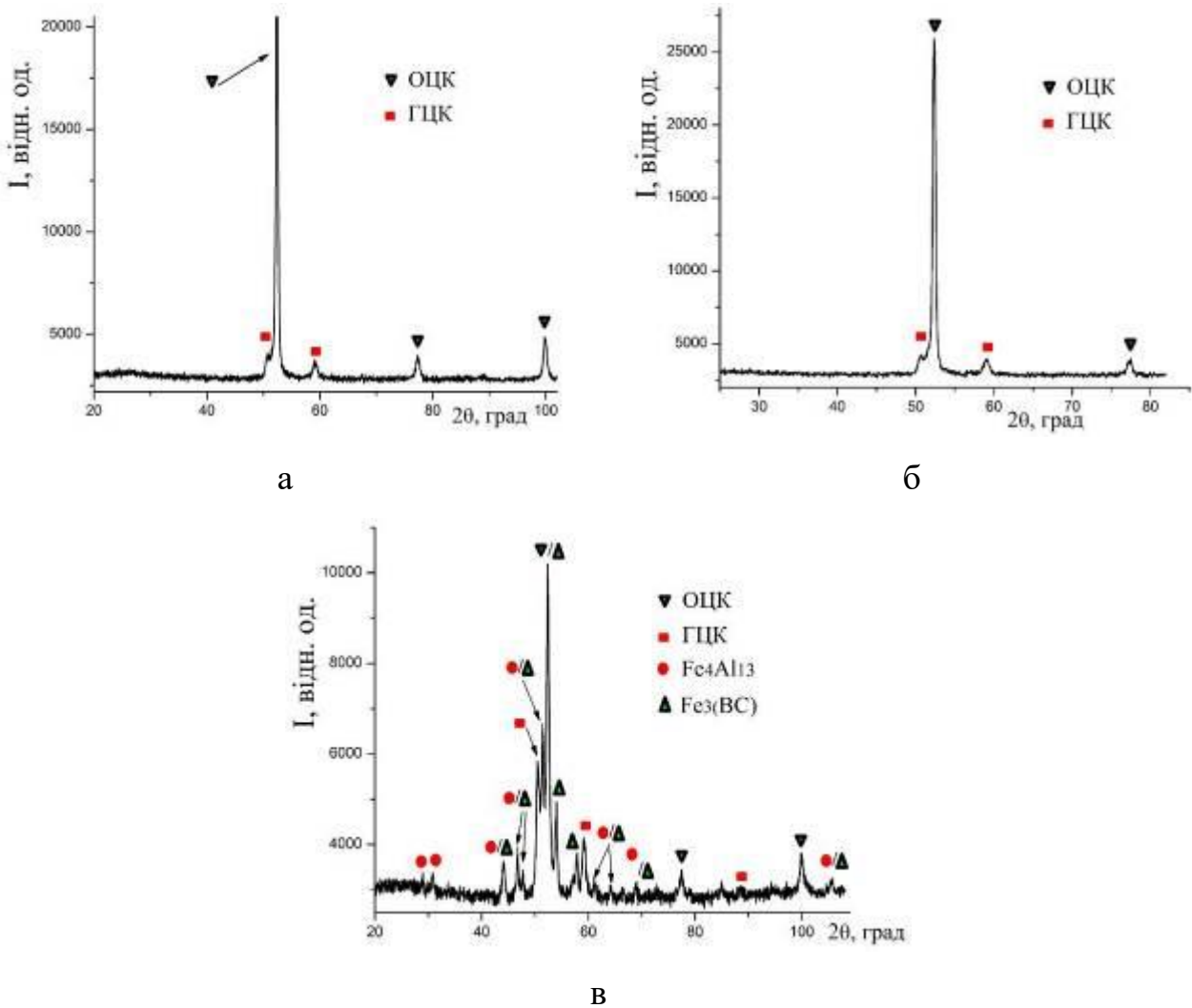
Таблиця 5.13 – Якісні параметри Al-C-V покриттів, отриманих методом ЕІЛ

Енергія розряду, Дж	Шорсткість, мкм			Зміцнений шар		
	Ra	Rz	Rmax	H _ц , МПа	h, мкм	S, %
Сталь 20						
0,13	1,1	2,7	7,2	5474	20	60
0,55	2,9	4,1	16,3	10196	30	80
4,9	8,9	18,7	46,1	11345	75	98
Сталь 40						
0,13	1,2	2,9	7,4	6487	15	55
0,55	2,9	4,5	17,3	10351	20	75
4,9	9,3	19,5	48,2	12350	60	95

S, % - суцільність шару

ДюрOMETричні дослідження показали, що з посиленням енергетичного впливу при ЕІЛ збільшується мікротвердість як верхнього зміцненого шару, так і дифузійної зони (рис. 5.28, г). Так, при $W_p = 0,13$ Дж $H_{ц} = 6487$ МПа, а при $W_p = 4,9$ Дж - 12350 МПа (табл. 5.13).

Результати рентгеноструктурного аналізу свідчать про те, що при відносно невисоких енергіях розряду (0,13 і 0,55 Дж) фазовий склад покриттів представлений твердими розчинами ОЦК і ГЦК (рис. 5.29), з параметром $a = 28,651$ нм і 36,189 нм, відповідно (табл. 5.14). Тому, можна припустити, що при одночасному насиченні сталі 40 Al, C і V методом ЕІЛ, в результаті перемішування матеріалу основи, консистентної речовини, що містить алюмінієву пудру, і матеріалу електрода – графіту, відбувається легування ОЦК-твердого розчину і збільшення його параметра. Крім того, прискорене охолодження після ЕІЛ призводить до утворення термічних напружень, в зв'язку з чим спостерігається додаткове збільшення параметру a і мікротвердості покриття.



а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 4,9$ Дж

Рисунок 5.29 – Дифрактограми Al-C-V покриттів на сталі 40

Покриття, отримані при $W_p = 4,9$ Дж, характеризуються наявністю, крім твердих розчинів ОЦК і ГЦК зі зміненими в більшу сторону параметрами кристалічної ґратки (табл. 5.14), інтерметалідів Fe_4Al_{13} і легованого цементиту $Fe_3(BC)$. Утворення цих фаз сприяє значному зміцненню і збільшенню мікротвердості поверхневого шару до 12350 МПа (табл. 5.13).

Таблиця 5.14 – Параметри кристалічних ґраток фаз і кількісний фазовий аналіз Al-C-B покриттів на сталі 40

Енергія розряду, Дж	Фаза	Період ґраток, a , нм	Вміст фази, % (мас.)
0,13	Твердий розчин ГЦК	36,189	8,25
	Твердий розчин ОЦК	28,651	91,75
0,55	Твердий розчин ГЦК	36,189	8,31
	Твердий розчин ОЦК	28,651	91,69
4,9	Fe_4Al_{13}	$a = 153,920$ $b = 81,779$ $c = 124,914$ $\beta = 107,3709$	9,46
	$Fe_3(CB)$	$a = 50,818$ $b = 67,791$ $c = 45,170$	43,43
	Твердий розчин ГЦК	$a = 36,209$	14,24
	Твердий розчин ОЦК	$a = 28,699$	32,88

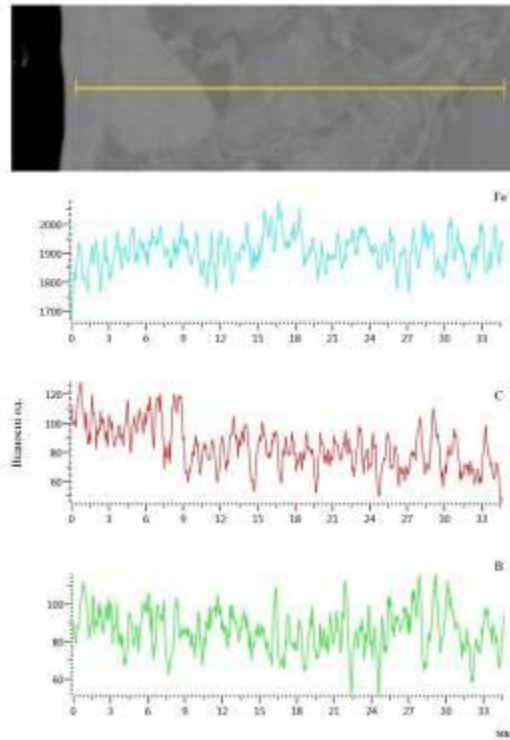
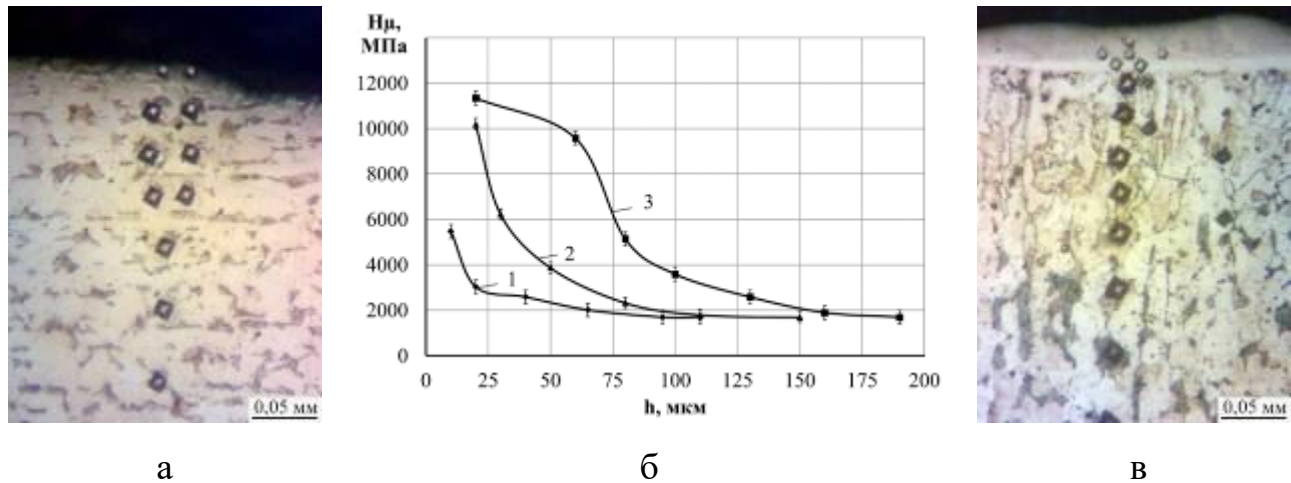


Рисунок 5.30 – Розподіл елементів (заліза, вуглецю, бору) у Al-C-B покриттях на сталі 40, $W_p = 0,13$ Дж

Мікрорентгеноспектральний аналіз отриманих покриттів свідчить про те, що при електроіскровому легуванні відбувається насичення поверхневих шарів алюмінієм, бором і вуглецем. Зі збільшенням енергії розряду дифузійна зона збільшується. Так, при ЕІЛ з $W_p = 0,13$ Дж сталі 40 дифузійна зона складає 10-15 мкм (рис. 5.30).

При заміні підкладки зі сталі 40 на сталь 20 в результаті ЕІЛ спостерігається збільшення товщини поверхневого шару при деякому зниженні мікротвердості (рис. 5.31).

На рисунку 5.32 представлені результати електронно-мікроскопічних досліджень Al-C-B покриттів на сталі 20. При $W_p = 0,13$ Дж формуються тонкі і не суцільні шари. Зі збільшенням енергії розряду товщина покриттів, їх суцільність, збільшуються. Необхідно відмітити, що зі збільшенням енергії розряду відбувається збільшення дифузійної зони Al, C і B. Так, при $W_p = 0,13$ Дж ця зона складає 5-7 мкм, тоді як при $W_p = 4,9$ Дж – 23-25 мкм (рис. 5.33). Більшою мірою вглиб від поверхні дифундує вуглець і алюміній.



а

б

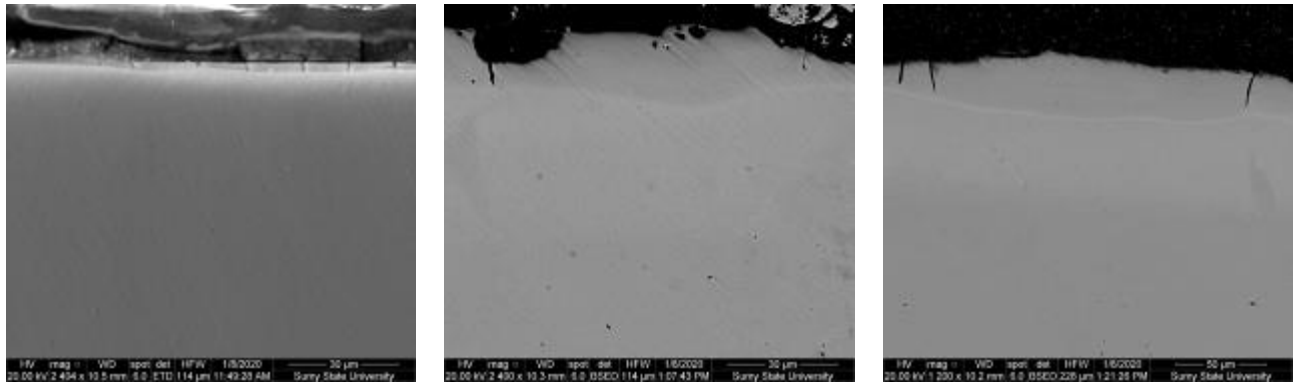
в

а – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 0,55$ Дж;

б – на графике 1 – $W_p = 0,13$ Дж, 2 – $W_p = 0,55$ Дж, 3 – $W_p = 4,9$ Дж

Рисунок 5.31 – Мікроструктури (а, в) і розподіл мікротвердості (б)

Al-C-B покриттів на сталі 20



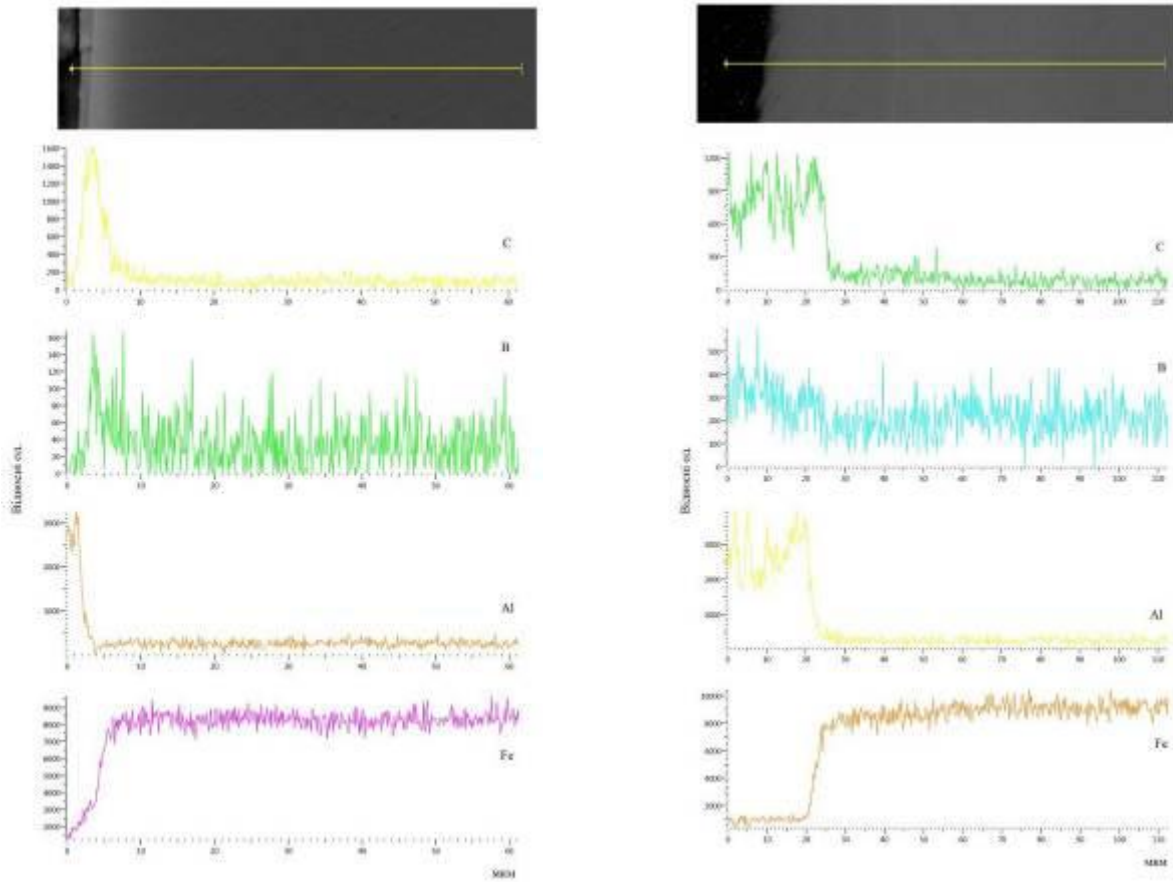
а

б

в

а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 4,9$ Дж

Рисунок 5.32 – Структури поверхневих Al-C-V покриттів на сталі 20, отриманих методом ЕІЛ



а

б

а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 4,9$ Дж

Рисунок 5.33 – Розподіл елементів у Al-C-V покриттях, отриманих методом ЕІЛ графітовим електродом на сталі 20

Таким чином, мікроструктурний аналіз Al-C-B покриттів на сталі 40 показав, що поверхневий шар складається з декількох ділянок, кількість і параметри яких визначаються енергетичними режимами процесу ЕІЛ. При енергіях розряду 0,13 і 0,55 Дж шари складаються з 3-х ділянок – верхній «білий» зміцнений шар, дифузійна зона і основний метал – сталь 40 з ферито-перлітною структурою. При цьому, величина «білого» шару для цих режимів становить 15-20 мкм. Збільшення енергії розряду до 4,9 Дж призводить до зміни кількості ділянок та їх структури: верхній шар з дендритною структурою (до 60 мкм), прошарок (до 20 мкм), дифузійна зона, що характеризується подрібненими структурними складовими і в зв'язку з цим має підвищену травимість в реактиві, а також основного металу. ДюрOMETричні дослідження показали, що з посиленням енергетичного впливу при ЕІЛ збільшується мікротвердість як верхнього зміцненого шару, так і дифузійної зони: при $W_p = 0,13$ Дж $H_u = 6487$ МПа, а при $W_p = 4,9$ Дж - 12350 МПа.

Результати рентгеноструктурного аналізу свідчать про те, що при енергіях розряду 0,13 і 0,55 Дж фазовий склад покриттів представлений твердими розчинами ОЦК і ГЦК, з параметрами $a = 28,651$ нм і $36,189$ нм, відповідно. Покриття, отримані при $W_p = 4,9$ Дж, характеризуються наявністю, крім твердих розчинів ОЦК і ГЦК зі зміненими в більшу сторону параметрами кристалічної ґратки, інтерметалідів Fe_4Al_{13} і легованого цементиту $Fe_3(CB)$. Утворення цих фаз сприяє значному зміцненню і збільшенню мікротвердості поверхневого шару до 12350 МПа.

Мікрорентгеноспектральний аналіз отриманих покриттів свідчить про те, що при електроіскровому легуванні відбувається насичення поверхневих шарів алюмінієм, бором і вуглецем. Зі збільшенням енергії розряду дифузійна зона збільшується: при ЕІЛ з $W_p = 0,13$ Дж сталі 40 дифузійна зона складає 10-15 мкм. При заміні підкладки зі сталі 40 на сталь 20 в результаті ЕІЛ спостерігається збільшення товщини поверхневого шару при деякому зниженні

мікротвердості. При $W_p = 0,13$ Дж формуються тонкі і не суцільні шари. Зі збільшенням енергії розряду товщина покриттів, їх суцільність, збільшуються. Необхідно відмітити, що зі збільшенням енергії розряду відбувається збільшення дифузійної зони Al, C і V: при $W_p = 0,13$ Дж ця зона складає 5-7 мкм, тоді як при $W_p = 4,9$ Дж – 23-25 мкм. Більшою мірою вглиб від поверхні дифундує вуглець і алюміній.

5.5. Аналіз якості сульфомолібденових покриттів, отриманих методами ЕІЛ

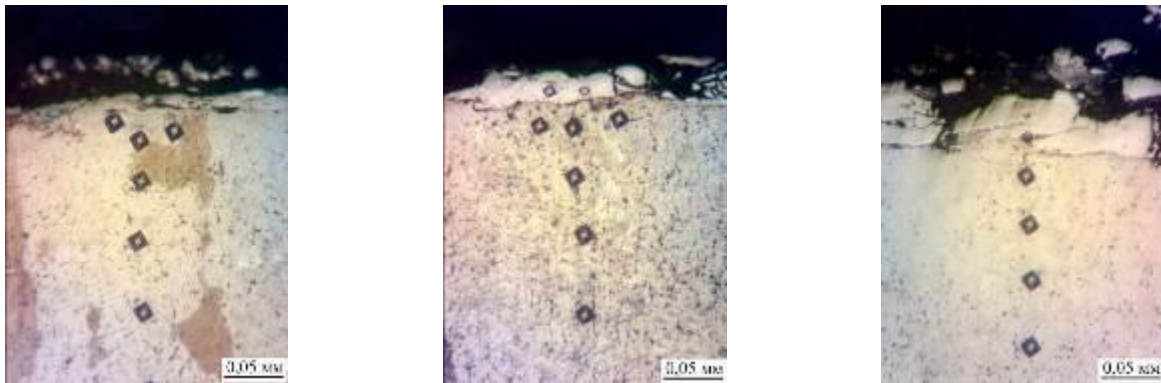
Нами запропонований спосіб сульфомолібденування металевих поверхонь, що полягає в нанесенні консистентної речовини, що містить сірку, і електроіскрове легування молібденовим електродом при енергіях розряду 0,13; 0,55; 3,4 Дж (табл. 5.15).

Таблиця 5.15 – Якісні параметри сульфомолібденових покриттів, отриманих методом ЕІЛ

Енергія розряду, Дж	Шорсткість, мкм			Шар зниженої мікротвердості			Зміцнений шар		
	Ra	Rz	Rmax	H μ , МПа	h, мкм	S, %	H μ , МПа	h, мкм	S, %
Сталь 20									
0,13	0,6	2,1	6,1	1112	20	45	5147	20	65
0,55	1,9	3,3	14,2	1368	30	65	7150	30	75
3,4	5,5	14,7	38,5	1666	40	75	10596	50	90
Сталь 40									
0,13	0,8	2,3	6,5	1320	10	50	5474	25	75
0,55	2,0	3,5	14,7	1670	20	70	7832	40	90
3,4	5,7	14,9	38,7	2040	30	80	10731	70	95

S, % – суцільність шару

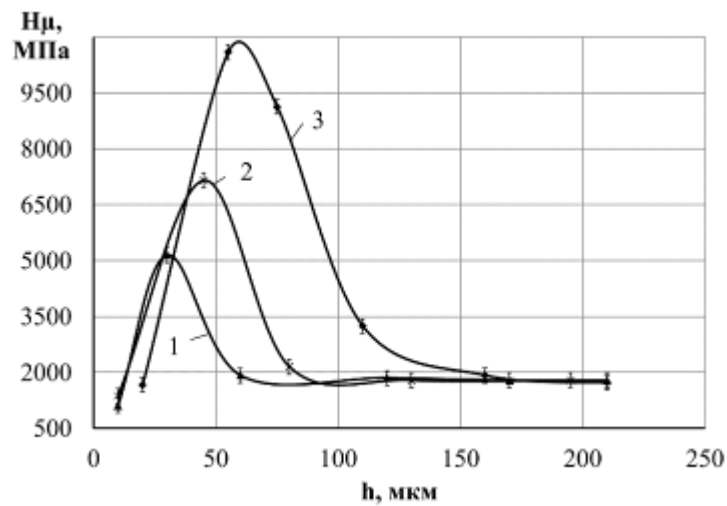
Металографічні та дюрOMETричні дослідження показали, що сульфомолібденові покриття складаються з 4-х зон: верхній пухкий шар з мікротвердістю $H_{\mu} = 1112-2040$ МПа, «білий» зміцнений шар з $H_{\mu} = 5147-5474$ МПа для $W_p = 0,13$ Дж і $H_{\mu} = 10596-10731$ МПа для $W_p = 3,4$ Дж, дифузійна зона і основний метал (рис. 5.34 і 5.35). При заміні підкладки зі сталі 20 на 40 спостерігається підвищення мікротвердості, товщини зміцненого шару, а також суцільності (табл. 5.15).



а

б

в

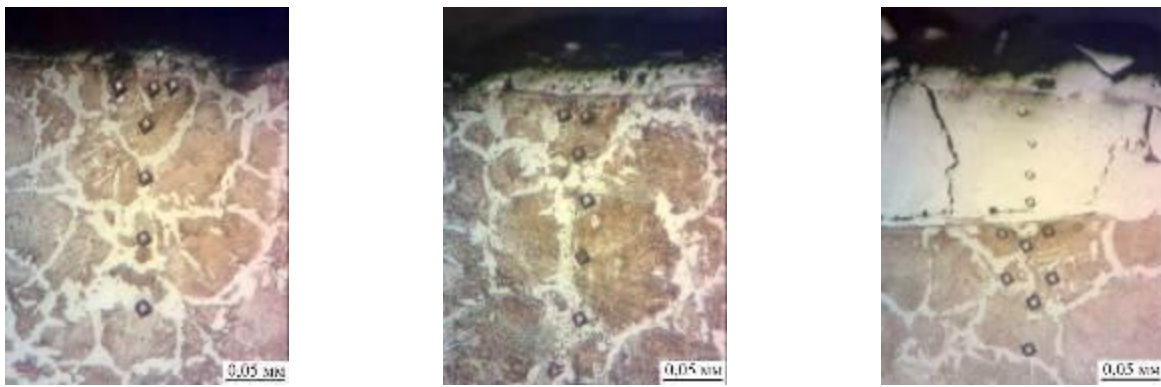


г

а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 3,4$ Дж;

г – на графіку 1 – $W_p = 0,13$ Дж, 2 – $W_p = 0,55$ Дж, 3 – $W_p = 3,4$ Дж

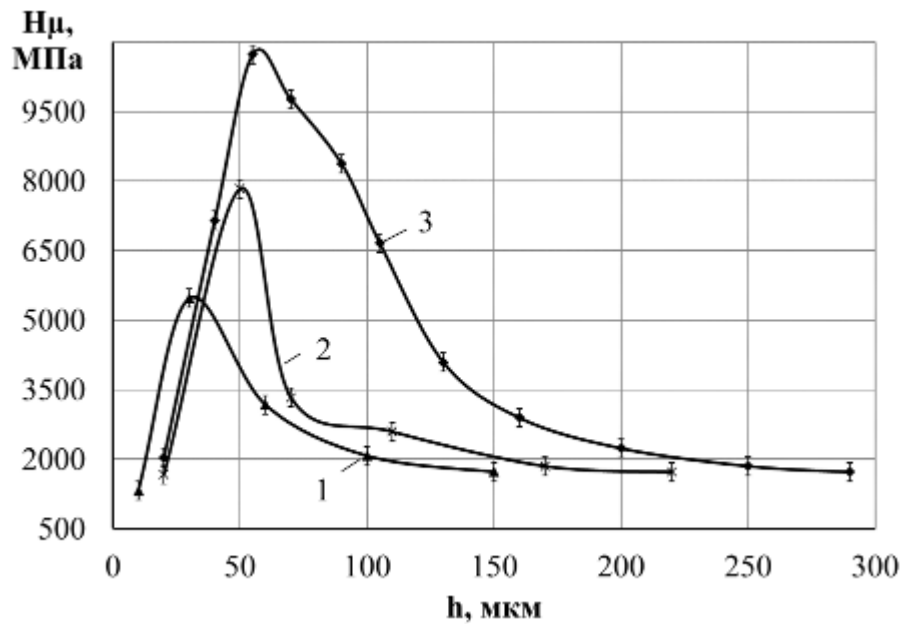
Рисунок 5.34 – Мікроструктури (а-в) и розподіл мікротвердості (г) у поверхневому шарі сталі 20 після сульфомолібденування методом ЕІЛ



а

б

в



г

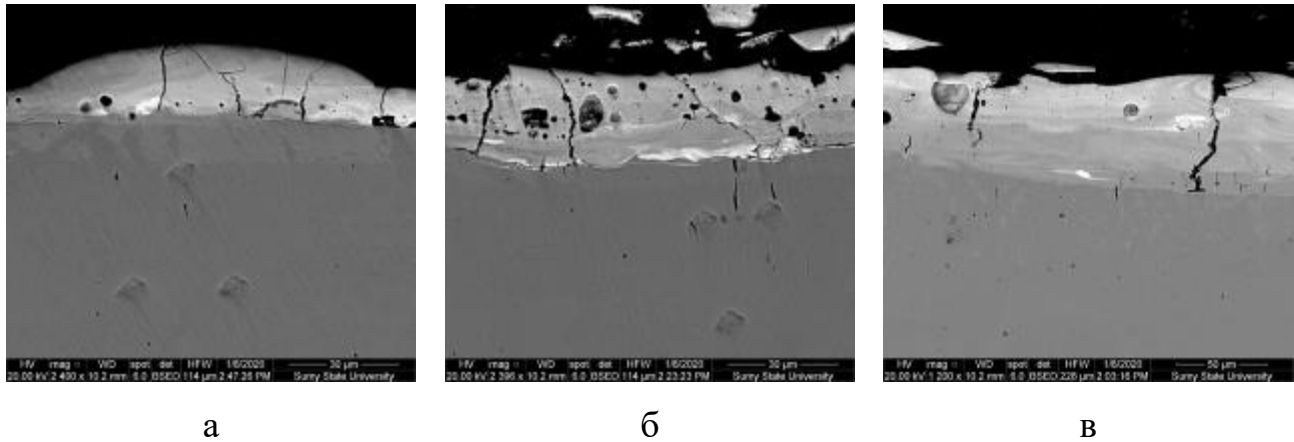
а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 3,4$ Дж;

г – на графіку 1 – $W_p = 0,13$ Дж, 2 – $W_p = 0,55$ Дж, 3 – $W_p = 3,4$ Дж

Рисунок 5.35 – Мікроструктури (а-в) и розподіл мікротвердості (г) у поверхневому шарі сталі 40 після сульфомолібденування методом ЕІЛ

Для вивчення сульфомолібденових покриттів застосовували сканувальний електронний мікроскоп з системою мікроаналізу. Використовували зображення, отримане за допомогою BSE-детектора зворотно-розсіяних (відображених) електронів, і що містить добре помітні області з чіткими межами, що відрізняються за відтінком залежно від атомного номера хімічного елемента. У

таких зображеннях світлі області – це ділянки, що містять більш важкі елементи (в нашому випадку молібден), від яких електрони пучка відображаються краще, ніж від більш легких. Аналіз ділянки поверхні, що містить покриття, і фрагмент основного металу з доєвтектоїдною структурою, показав, що отриманий шар має неоднорідний склад з різною концентрацією елементів (рис. 5.36). Так, згідно з картами розподілу елементів за площею досліджуваних зразків (рис. 5.37), на поверхні концентрується сірка, молібден розподіляється більш рівномірно в покритті.

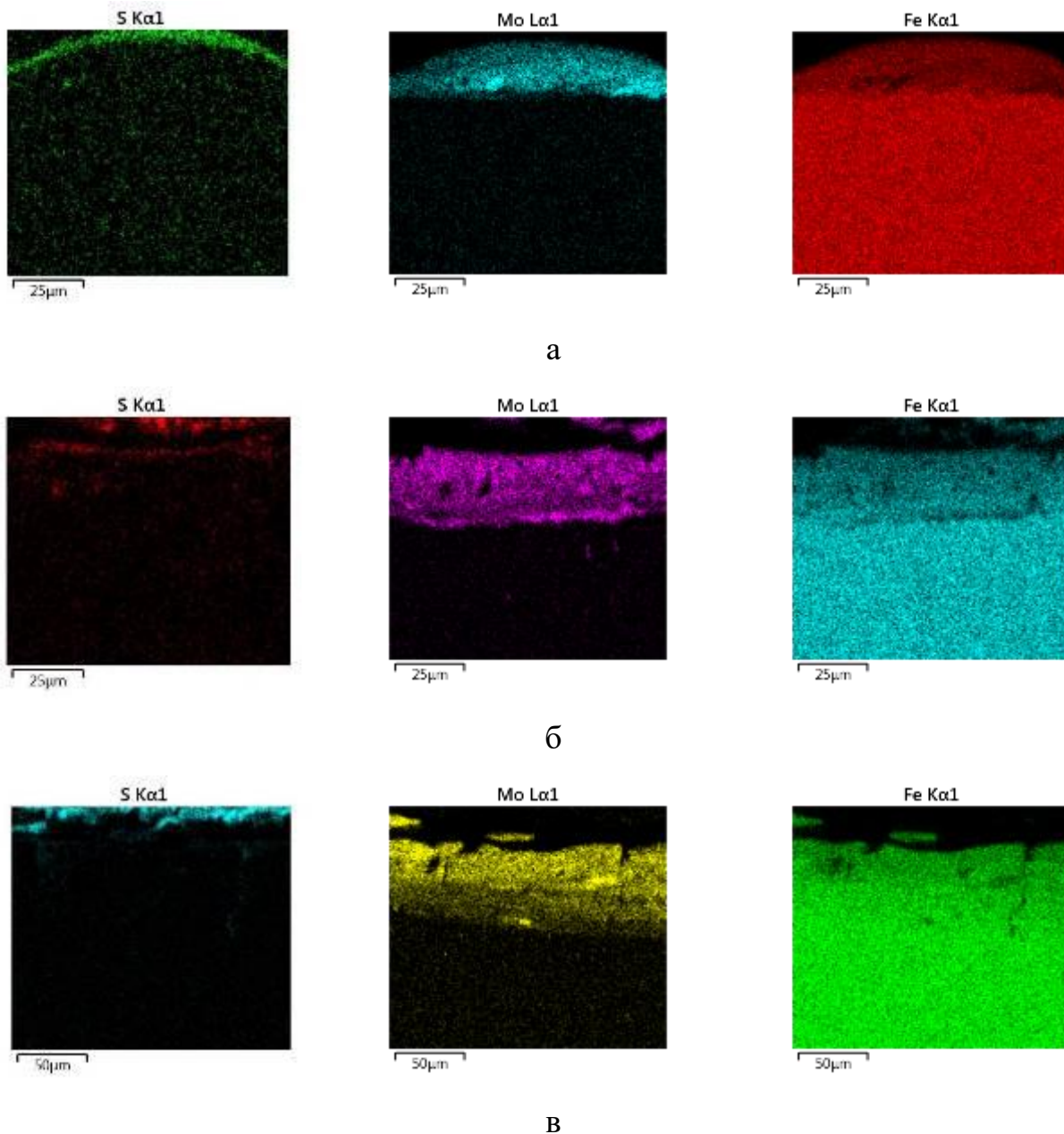


а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 3,4$ Дж;

Рисунок 5.36 – Результати електронно-мікроскопічних досліджень сульфомолібденових покриттів на сталі 40, отриманих методом ЕІЛ

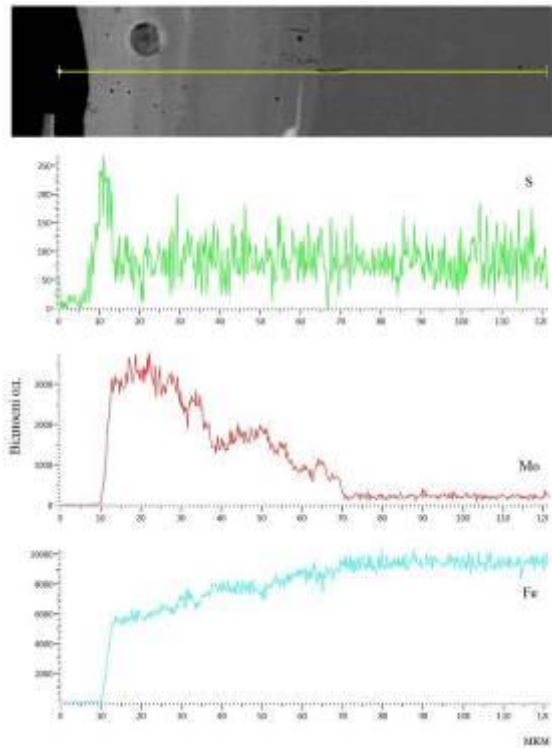
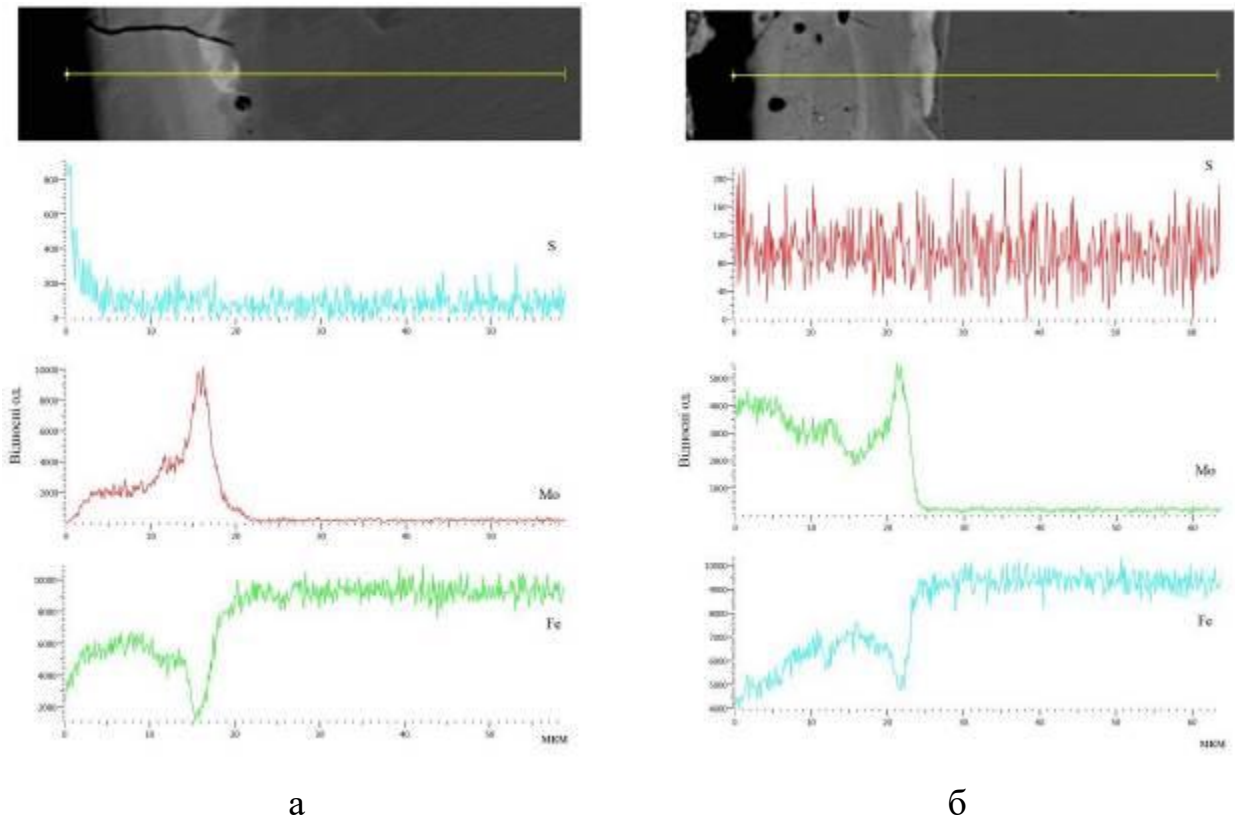
В результаті локального енергодисперсійного рентгенівського мікроаналізу отримані криві розподілу сірки, молібдену і заліза (рис. 5.38). Показано, що сірка та молібден концентруються на глибині до 4 і 19 мкм, відповідно, при $W_p = 0,13$ Дж, до 5 і 25 мкм при $W_p = 0,55$ Дж, до 15 і 70 мкм при $W_p = 3,4$ Дж, відповідно. Рентгеноструктурний аналіз отриманих покриттів підтверджує результати енергодисперсійного аналізу (рис. 5.39). Так, при невисоких енергіях розряду фазовий склад покриттів на сталі 40 представлений твердим розчином ОЦК, за періодом ґратки близьким до фериту, мартенсит,

ГЦК твердий розчин і інтерметалід FeMo (σ -фаза). Очевидно, у зв'язку з легуванням ОЦК-твердого розчину (фериту) сіркою і молібденом, не рівноважними умовами охолодження збільшується параметр a (табл. 5.16).



а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; B – $W_p = 3,4$ Дж

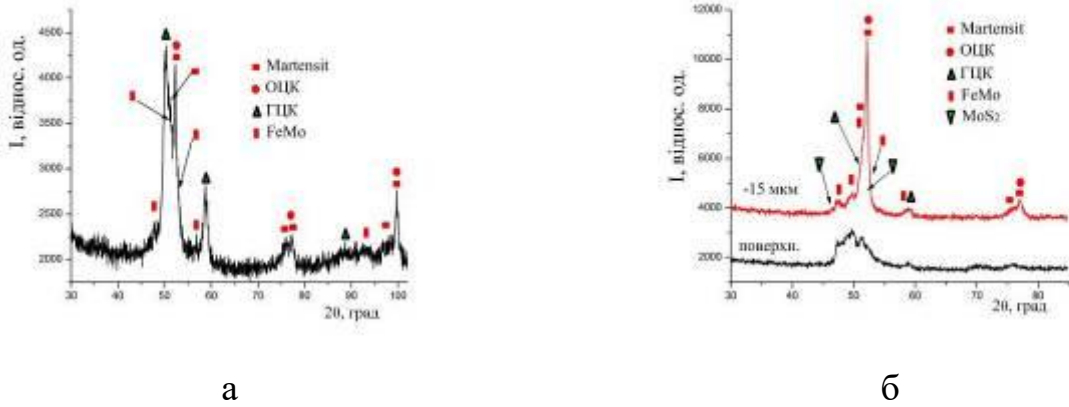
Рисунок 5.37 – Карти розподілу хімічних елементів у покритті після сульфомолібденування сталі 40 методом ЕІЛ з різною енергією розряду



В

а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 3,4$ Дж

Рисунок 5.38 – Розподіл елементів в сульфомолібденових покриттях сталі 40



а

б

а – $W_p = 0,55$ Дж; б – $W_p = 3,4$ Дж

Рисунок 5.39 – Дифрактограми сульфомолібденових покриттів, отриманих методом ЕІЛ, на сталі 40

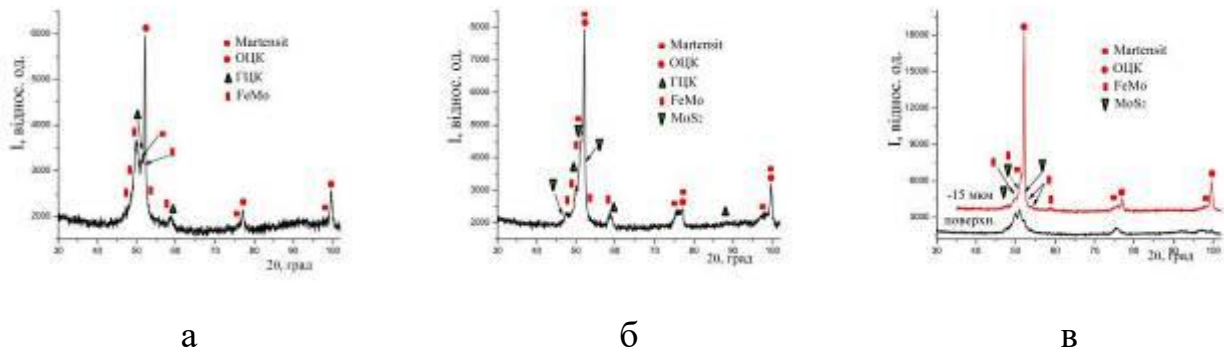
Таблиця 5.16 – Параметри кристалічних ґраток фаз і кількісний фазовий аналіз сульфомолібденових покриттів на сталі 40

Енергія розряду, Дж	Фаза	Період ґраток, a , нм	Вміст фази, % (мас.)
0,55	Твердий розчин ОЦК	2,8720	23,90
	Твердий розчин ГЦК	3,6450	25,38
	Мартенсит	$a = 2,8740$ $c = 2,9200$	10,98
	FeMo (σ -фаза)	$a = 9,1280$ $c = 4,8130$	39,74
3,4	На відстані 15 мкм		
	Твердий розчин ОЦК	2,8720	46,36
	Твердий розчин ГЦК	3,6450	6,10
	Мартенсит	$a = 2,8640$ $c = 2,9200$	30,14
	FeMo (σ -фаза)	$a = 9,1280$ $c = 4,8130$	12,53
	MoS ₂	$a = 3,1212$ $c = 12,2410$	4,87

В умовах високих швидкостей нагрівання і охолодження мікрооб'ємів поверхневого шару, що призводять до формування нерівноважних структур, а також, у результаті перемішування матеріалу основи і легуючого електрода, взаємодії рідкої ванни сплаву при ЕІЛ з навколишнім середовищем – повітрям, інтенсивних ударних хвиль, що виникають при ЕІЛ і призводять до термомеханічного зміцнення та інших процесів, що впливають на фазоутворення, очевидно, в поверхневому шарі при температурі легування (більше $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) утворюється два легованих аустеніту. Один з них, мартенситна точка M_n якого лежить вище кімнатної температури, при охолодженні зазнає мартенситного перетворення, при цьому утворюється мартенсит з параметром ґратки $a = 2,8740\text{ нм}$, $c = 2,9200\text{ нм}$. У зв'язку з тим, що молібден інтенсивно знижує температури мартенситного перетворення, воно не відбувається до кінця, і в покритті залишається не перетвореним залишковий аустеніт – твердий розчин ГЦК (табл. 5.16). Крім твердих розчинів в поверхневому шарі утворюється до 40% інтерметалідів $FeMo$, що сприяє помітному збільшенню мікротвердості поверхневого шару після ЕІЛ при $W_p = 0,55\text{ Дж}$ (при $W_p = 0,13\text{ Дж}$ – $H_c = 5474\text{ МПа}$, при $W_p = 0,55\text{ Дж}$ – $H_c = 7832\text{ МПа}$, табл. 5.15).

Сульфомолібденування методом ЕІЛ при $W_p = 3,4\text{ Дж}$ сталі 40 призводить до підвищення кількості мартенситної фази до 30%, порівняно з 11% при $W_p = 0,55\text{ Дж}$, зменшення кількості залишкового аустеніту (ГЦК фази) з 25% до 6%, а також до 5% дисульфиду молібдену. Необхідно відзначити, що зі збільшенням енергії розряду збільшується шорсткість поверхні, що призводить до унеможливлення отримання достовірних результатів рентгеноструктурного аналізу. Тому дифрактограми оброблялися з поверхні після її зачищення наждачним папером на 15 мкм. При заміні підкладки зі сталі 40 на 20, у S-Mo-покритті виявляється менша кількість ГЦК-фази – залишкового аустеніту при однаковій енергії розряду (рис. 5.40). Дисульфід молібдену утворюється вже

при енергії розряду $W_p = 0,55$ Дж (3,77%), а при $W_p = 3,4$ Дж його виявляється близько 8% на поверхні і близько 5% на глибині до 15 мкм (табл. 5.17).



а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 3,4$ Дж

Рисунок 5.40 – Дифрактограми сульфомолибденових покриттів, отриманих методом ЕІЛ, на сталі 20

Таблиця 5.17 – Параметри кристалічних ґраток фаз і кількісний фазовий аналіз сульфомолибденових покриттів на сталі 20

Енергія розряду, Дж	Фаза	Період ґраток, a , нм	Вміст фази, % (мас.)
1	2	3	4
0,13	Твердий розчин ОЦК	2,8720	39,43
	Мартенсит	$a = 2,8640$ $c = 2,9200$	18,92
	FeMo (σ -фаза)	$a = 9,1280$ $c = 4,8130$	25,50
	Твердий розчин ГЦК	$a = 3,6450$	16,15
0,55	Твердий розчин ОЦК	2,8720	34,92
	Твердий розчин ГЦК	3,6450	13,72
	Мартенсит	$a = 2,8640$ $c = 2,9200$	30,46
	FeMo (σ -фаза)	$a = 9,1280$ $c = 4,8130$	17,14
	MoS ₂	$a = 3,1212$ $c = 12,2400$	3,77

Продовження таблиці 5.17

1	2	3	4
3,4	На відстані 15 мкм		
	Твердий розчин ОЦК	2,8800	59,86
	Мартенсит	$a = 2,8640$ $c = 2,9200$	25,46
	FeMo (σ -фаза)	$a = 9,1280$ $c = 4,8130$	9,56
	MoS ₂	$a = 3,1212$ $c = 12,2400$	5,12

Таким чином, досліджено процес сульфомолібденування металевих поверхонь, що полягає в нанесенні консистентної речовини, що містить сірку, і електроіскрове легування молібденовим електродом при енергіях розряду 0,13; 0,55; 3,4 Дж. Металографічні та дюрOMETричні дослідження показали, що сульфомолібденові покриття складаються з 4-х зон: верхній пухкий шар з мікротвердістю $H_{\mu} = 1112-2040$ МПа, «білий» зміцнений шар з $H_{\mu} = 5147-5474$ МПа для $W_p = 0,13$ Дж і $H_{\mu} = 10596-10731$ МПа для $W_p = 3,4$ Дж, дифузійна зона і основний метал. При заміні підкладки зі сталі 20 на 40 відбувається підвищення мікротвердості, товщини зміцненого шару, а також суцільності.

Електронно-мікроскопічні дослідження отриманих покриттів показали, що отриманий шар має неоднорідний склад з різною концентрацією елементів. Згідно з картами розподілу елементів за площею досліджуваних зразків, на поверхні концентрується сірка, молібден розподіляється більш рівномірно в покритті. Енергодисперсійний аналіз показав, що сірка та молібден концентруються на глибині до 4 і 19 мкм, відповідно, при $W_p = 0,13$ Дж, до 5 і 25 мкм при $W_p = 0,55$ Дж, до 15 і 70 мкм при $W_p = 3,4$ Дж, відповідно.

Рентгеноструктурний аналіз отриманих покриттів підтверджує результати енергодисперсійного аналізу. При невисоких енергіях розряду фазовий склад покриттів на сталі 40 представлений твердим розчином ОЦК, за періодом ґратки

близьким до фериту, мартенсит, ГЦК твердий розчин та інтерметалід FeMo (σ -фаза).

При заміні підкладки зі сталі 40 на сталь 20, у сульфомолібденовому покритті виявляється менша кількість ГЦК-фази – залишкового аустеніту при однаковій енергії розряду. Дисульфід молібдену утворюється вже при енергії розряду $W_p = 0,55$ Дж (3,77%), а при $W_p = 3,4$ Дж його виявляється близько 8% на поверхні і близько 5% на глибині до 15 мкм.

5.6. Створення квазібагатошарових зміцнених шарів методом електроіскрового легування

З метою отримання комплексних покриттів на сталі 12X18H10T легування здійснювали в такій послідовності:

- ЦЕІЛ при $W_p = 3,4$ Дж + алітування алюмінієвим електродом марки СВА99 при $W_p = 3,4$ Дж;
- ЦЕІЛ при $W_p = 3,4$ Дж + ЕІЛ твердим сплавом Т15К6 при $W_p = 3,4$ Дж;
- ЦЕІЛ при $W_p = 3,4$ Дж + алітування алюмінієвим електродом марки СВА99 при $W_p = 3,4$ Дж + ЕІЛ твердим сплавом Т15К6 при $W_p = 3,4$ Дж.

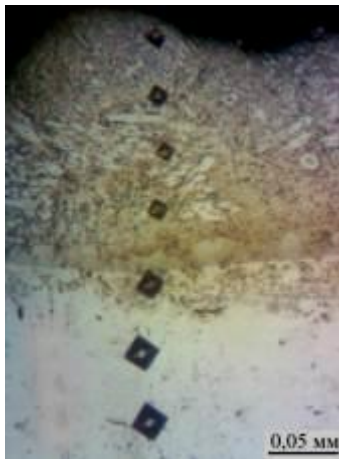
На рисунку 5.41 подана мікроструктура і розподіл мікротвердості поверхневого шару сталі 12X18H10T після ЦЕІЛ з енергією розряду (W_p), що дорівнює 3,4 Дж.

Металографічний аналіз отриманих покриттів показав, що мікроструктура складається з 3-х зон:

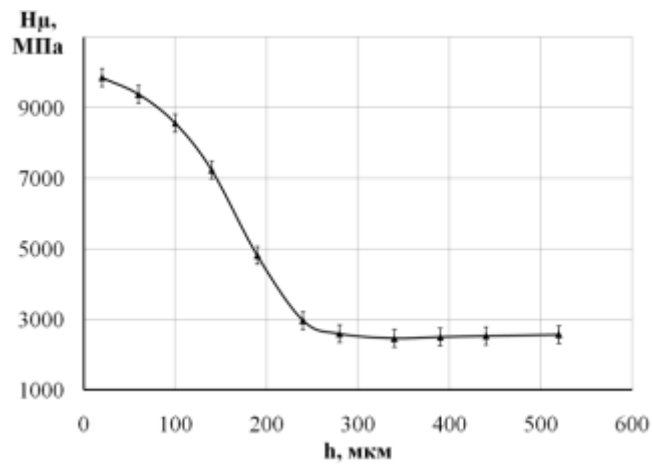
- 1) зміцнений шар;
- 2) дифузійна зона;
- 3) основний метал, що має аустенитну структуру.

Зміцнений шар нерівномірний за величиною, і становить 90-160 мкм. ДюрOMETричні дослідження показали, що шар після ЦЕІЛ має підвищену

твердість 9000-9500 МПа. В середньому глибина шару підвищеної твердості становить ~ 100 мкм.



а



б

Рисунок 5.41 – Мікроструктура (а) і розподіл мікротвердості (б) поперечного перерізу зразка зі сталі 12Х18Н10Т після ЦЕІЛ з $W_p = 3,4$ Дж

На рис. 5.42 подані результати електронномікроскопічних досліджень – ділянка поверхневого шару сталі 12Х18Н10Т після ЦЕІЛ з $W_p = 3,4$ Дж, а також розподіл по глибині шару вуглецю та інших елементів: хрому, заліза, нікелю і титану, що входять до складу сталі. Підвищений вміст вуглецю в поверхневому шарі, зберігається до 100 мкм, що узгоджується з даними металографічних і дюрOMETричних досліджень.

Металографічний аналіз комплексних С + Al покриттів, отриманих методом ЕІЛ, показав, що вони складаються з 4-х зон (рис. 5.43): м'який (темний); зміцнений (світлий); дифузійна зона; основний метал.

На поверхні розташований нерівномірний м'який і пористий шар, товщина якого становить на різних ділянках 70 – 100 мкм, а мікротвердість 1000-2500 МПа. Під ним розташований світлий шар, що має підвищену мікротвердість (до 7500 МПа), його товщина 80 – 120 мкм.

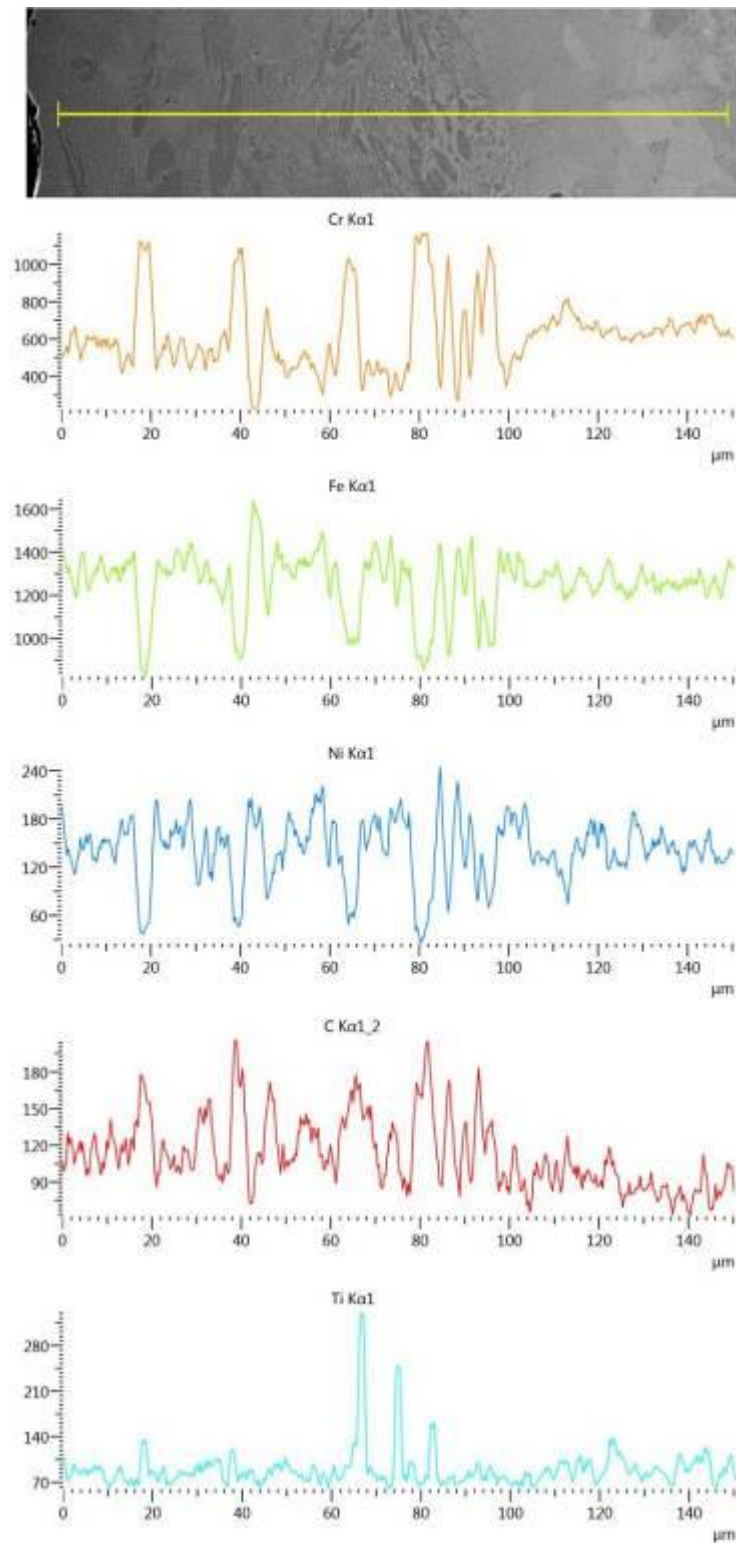
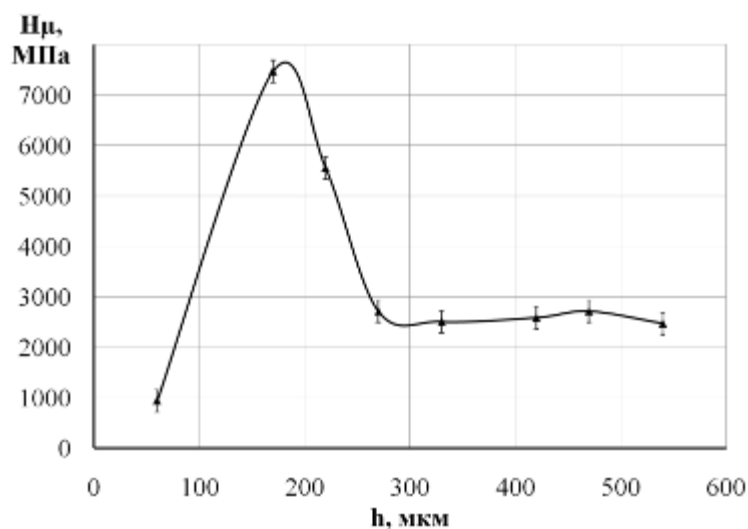


Рисунок 5.42 – Розподіл елементів у поверхневому шарі сталі 12X18H10T після ЦЕІЛ, $W_p = 3,4$ Дж



а



б

Рисунок 5.43 – Мікроструктура (а) і розподіл мікротвердості (б) поперечного перерізу зразка зі сталі 12X18H10T після ЦЕІЛ і ЕІЛ алюмінієм

Результати локального мікрорентгеноспектрального аналізу зразків з квазібагатошаровим покриттям (ЦЕІЛ і ЕІЛ алюмінієм) свідчать про те, що при ЕІЛ алюміній дифундує в сталеву підкладку на глибину до 100 мкм (рис. 5.44). Вміст елементів, що входять до складу сталі 12X18H10T (Fe, Cr, Ni, Ti) на поверхні мінімальний, а на відстані 80-100 мкм відповідає марочному складу.

Проведені дослідження фазового складу зміцненого шару показали, що поверхня покриття є багатофазною і складається з двох твердих розчинів з ОЦК і ГЦК ґратками, інтерметалевої сполуки ($\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$) і двох карбідів з гексагональною ($(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$) і кубічною (AlFe_3C) кристалічною ґраткою (рис. 5.45). Періоди ґраток утворених фаз подані в табл. 5.18. Необхідно відзначити, що період кристалічної ґратки ГЦК твердого розчину становить 36,123 нм, що дещо більше періоду ґратки сталі 12X18H10T до оброблення ($a = 35,936$ нм), що, очевидно, пов'язано з легуванням твердого розчину. Провести кількісний фазовий аналіз не представляється можливим, оскільки поверхня покриття багатофазна і дифракційні максимуми від різних фаз накладаються між собою.

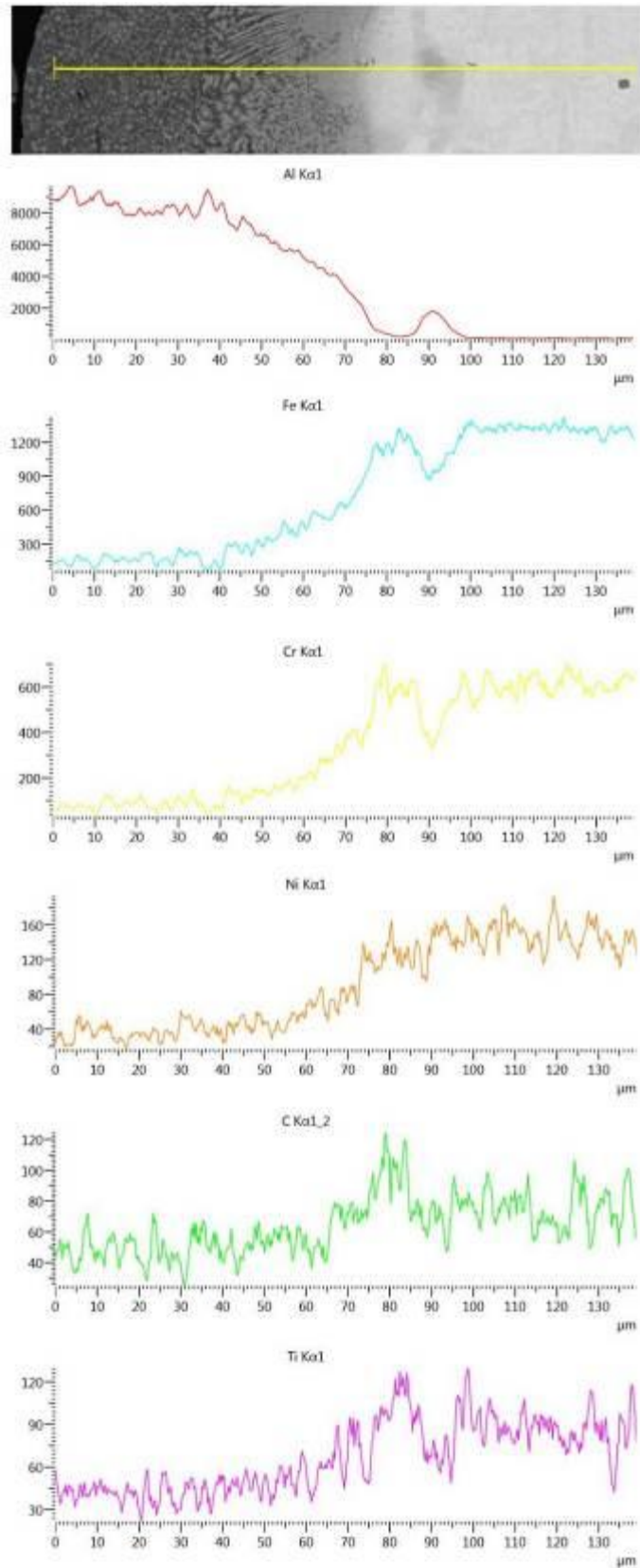


Рисунок 5.44 – Розподіл елементів в поверхневому шарі сталі 12Х18Н10Т після ЦЕІЛ і ЕІЛ алюмінієм

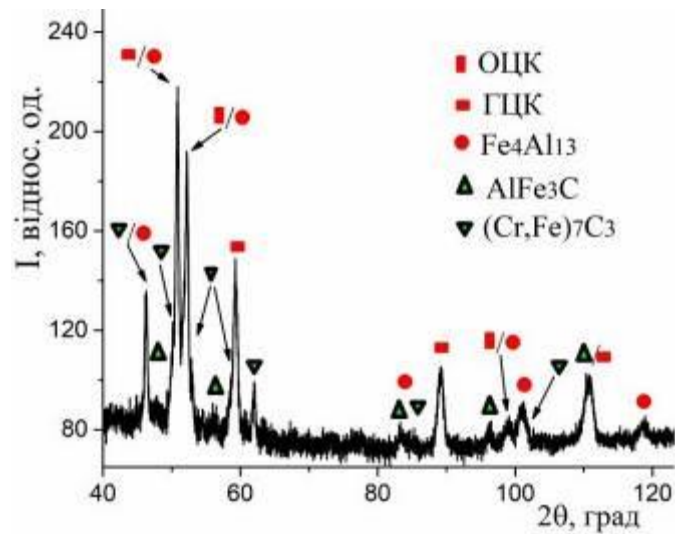


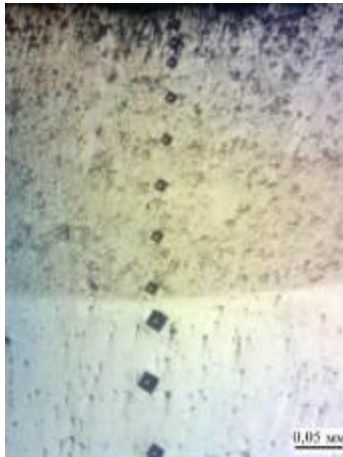
Рисунок 5.45 – Дифрактограми поверхні сталі 12X18H10T після ЦЕІЛ і ЕІЛ алюмінієм

Таблиця 5.18 – Параметри кристалічних ґраток фаз після ЦЕІЛ і ЕІЛ алюмінієм сталі 12X18H10T

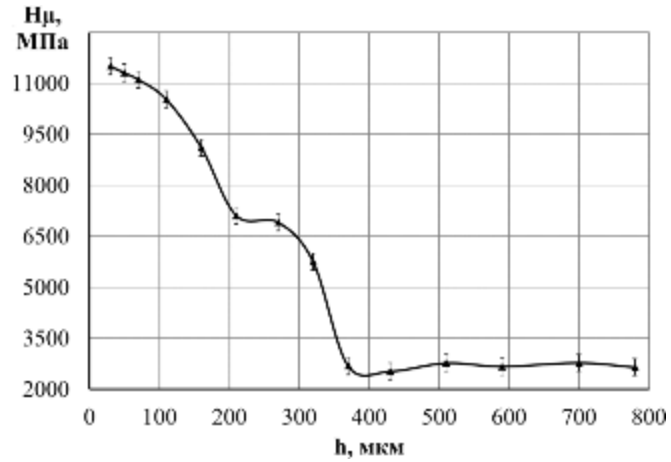
Фаза	Періоди ґраток, нм			
	a	b	c	β
ОЦК	28,812	28,812	28,812	90
ГЦК	36,123	36,123	36,123	90
Fe_4Al_{13}	154,92	80,78	124,71	107,69
$AlFe_3C$	37,90	37,90	37,90	90
$(Cr,Fe)_7C_3$	45,14	69,82	121,11	90

При послідовному легуванні сталі по схемі ЦЕІЛ \rightarrow ЕІЛ Al \rightarrow ЕІЛ T15K6 при $W_p = 3,4$ Дж спостерігається формування масивного шару завтовшки 320-360 мкм з максимальною мікротвердістю на поверхні 10500-11500 МПа (рис. 5.46). Результати фазового аналізу свідчать про те, що в квазібагатошаровому покритті основними фазами є карбід титану (62% мас.) і впорядкована сполука $(NiCoFe)Al$ (25% мас.) (рис. 5.47). Також встановлено

наявність інтерметаліда Fe_7W_6 (μ -фаза) у кількості 9% мас. і невелика кількість ОЦК твердого розчину (4% мас.). Утворення значної кількості карбідної фази, а також інтерметалідів обумовлює збільшення мікротвердості отриманих шарів (рис. 5.46).



а



б

Рисунок 5.46 – Мікроструктура (а) і розподіл мікротвердості (б) поперечного перерізу зразка зі сталі 12Х18Н10Т після ЦЕІЛ, ЕІЛ алюмінієм і ЕІЛ твердим сплавом Т15К6

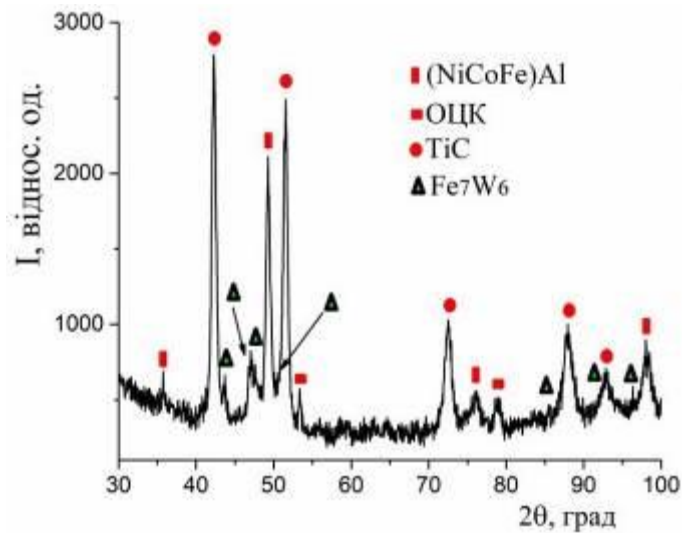


Рисунок 5.47 – Дифрактограми поверхні сталі 12Х18Н10Т після ЦЕІЛ, ЕІЛ алюмінієм і твердим сплавом Т15К6

Таблиця 5.19 – Параметри кристалічних ґраток фаз і кількісний фазовий аналіз після ЦЕІЛ, ЕІЛ алюмінієм і твердим сплавом Т15К6 сталі 12Х18Н10Т

Фаза	Періоди ґраток, нм				Вміст фази, % (мас.)
	a	b	c	β	
ОЦК	28,22	28,22	28,22	90	4
(NiCoFe)Al	29,112	29,112	29,112	90	25
TiC	42,84	42,84	42,84	90	62
Fe ₇ W ₆	47,80	47,80	259,88	90	9

Мікрорентгеноспектральний аналіз показав (рис. 5.48), що в результаті послідовного ЦЕІЛ, ЕІЛ алюмінієм і електродом з твердого сплаву Т15К6 з $W_p = 3,4$ Дж алюміній дифундує на глибину до 320 мкм, проте його вміст зменшується, вольфрам, як основний елемент твердого сплаву Т15К6 на глибину до 270 мкм, а вуглець – до 270 мкм. ЕІЛ за описаною технологією дозволяє збільшити дифузійну зону вуглецю й алюмінію, підвищити твердість і товщину зміцненого шару.

Дослідження показали, що при ЕІЛ за схемою ЦЕІЛ → ЕІЛ Т15К6 (без ЕІЛ алюмінієм) не вдається досягти необхідного значення мікротвердості (рис. 5.49) – на поверхні H_m становить 9000 МПа і при віддалення від поверхні плавно знижується до мікротвердості основи, $H_m \sim 2500-2600$ МПа. Товщина шару підвищеної твердості становить 200 – 220 мкм, що на 100 мкм менше, ніж в результаті ЕІЛ у послідовності ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Т15К6 (рис. 5.46). Суцільність шару складає $\sim 100\%$.

На рис. 5.50 подані результати дослідження розподілу елементів, що входять як до складу підкладки (сталі 12Х18Н10Т), так і до складу електрода-інструменту, по глибині шару, отриманого після ЦЕІЛ і ЕІЛ електродом з твердого сплаву Т15К6 при $W_p = 3,4$ Дж. Вольфрам дифундує на глибину до 125 мкм, а шар з підвищеним вмістом вуглецю становить ~ 120 мкм.

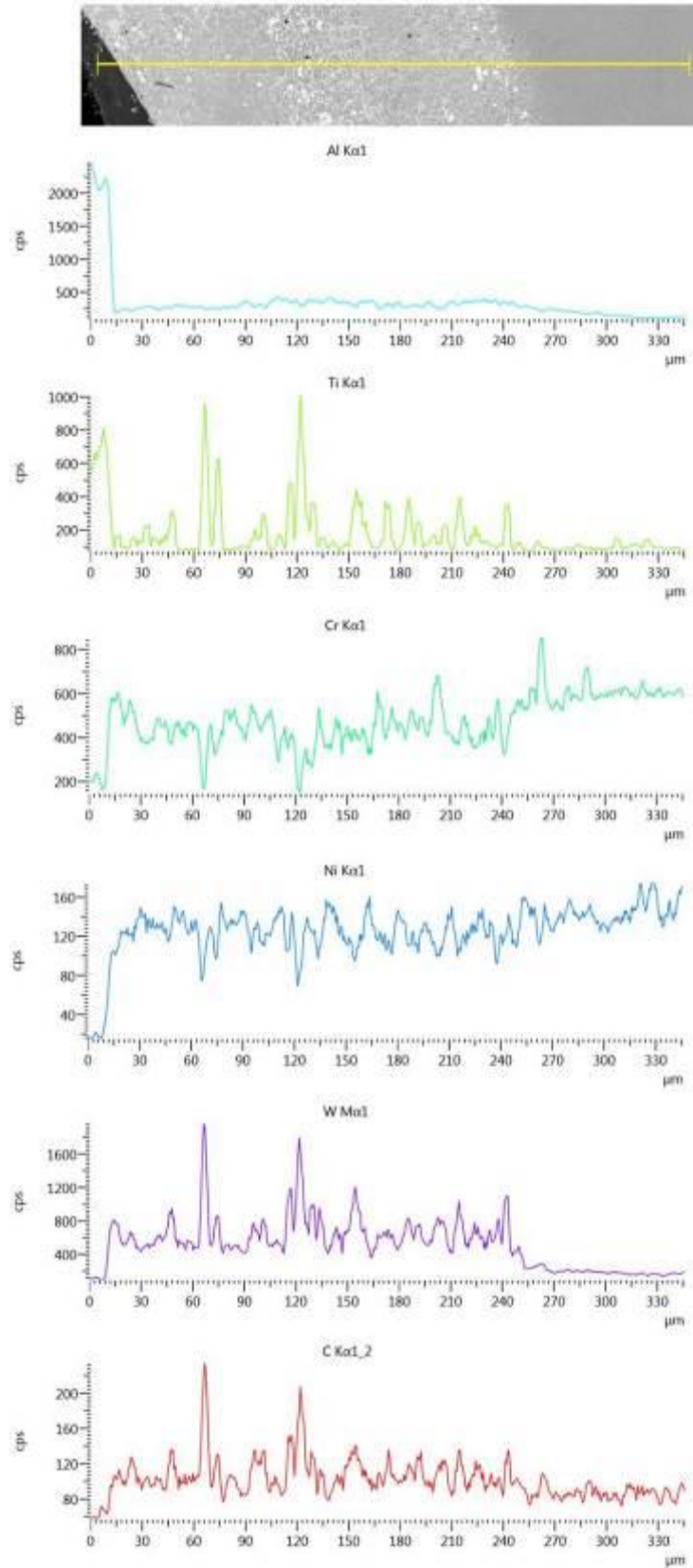
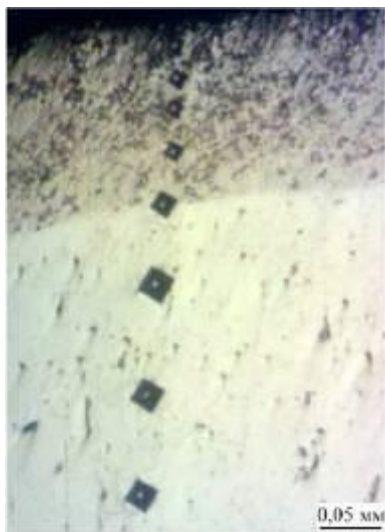
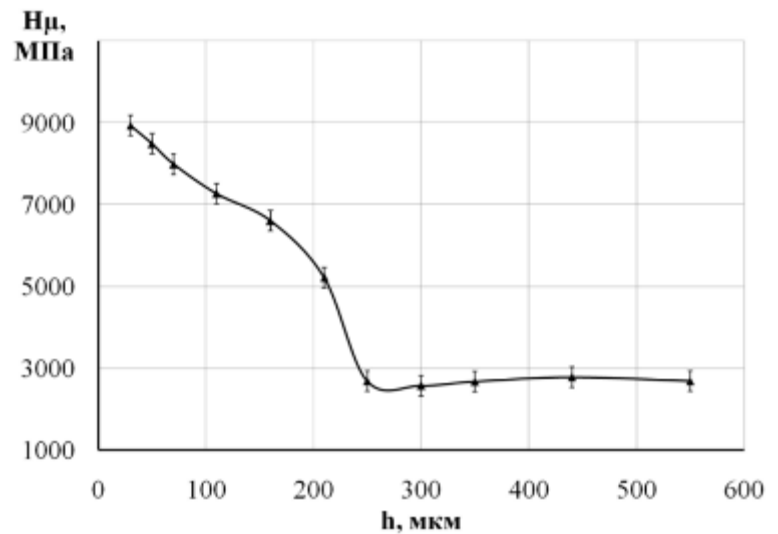


Рисунок 5.48 – Розподіл елементів у поверхневому шарі сталі 12X18H10T після ЦЕЛ, ЕЛ алюмінієм і твердим сплавом Т15К6



а



б

Рисунок 5.49 – Мікроструктура (а) і розподіл мікротвердості (б) поперечного перерізу зразка зі сталі 12X18H10T після ЦЕІЛ і ЕІЛ твердим сплавом Т15К6

Згідно результатів якісного рентгенофазового аналізу на поверхні отриманого покриття утворюються два твердих розчини з ОЦК і ГЦК ґратками, карбід титану і комплексний карбід Me_6C (типу W_3Fe_3C). Виходячи з дифрактограми наведеної на рис. 5.51, серед ідентифікованих чотирьох фаз домінуючими є карбід титану і твердий розчин на основі фази з ГЦК ґраткою.

Значення якісних параметрів квазібагатошарових покриттів, отриманих на сталі 12X18H10T, зведені до табл. 5.20. Дослідження показали, що найбільша товщина зони підвищеної твердості спостерігається в поверхневих шарах, сформованих у послідовності ЦЕІЛ + ЕІЛ Al + ЕЕЛ Т15К6. Підшар з алюмінію сприяє збільшенню товщини покриття, а також збільшенню мікротвердості за рахунок утворення значної кількості карбідів титану та інтерметалідів.

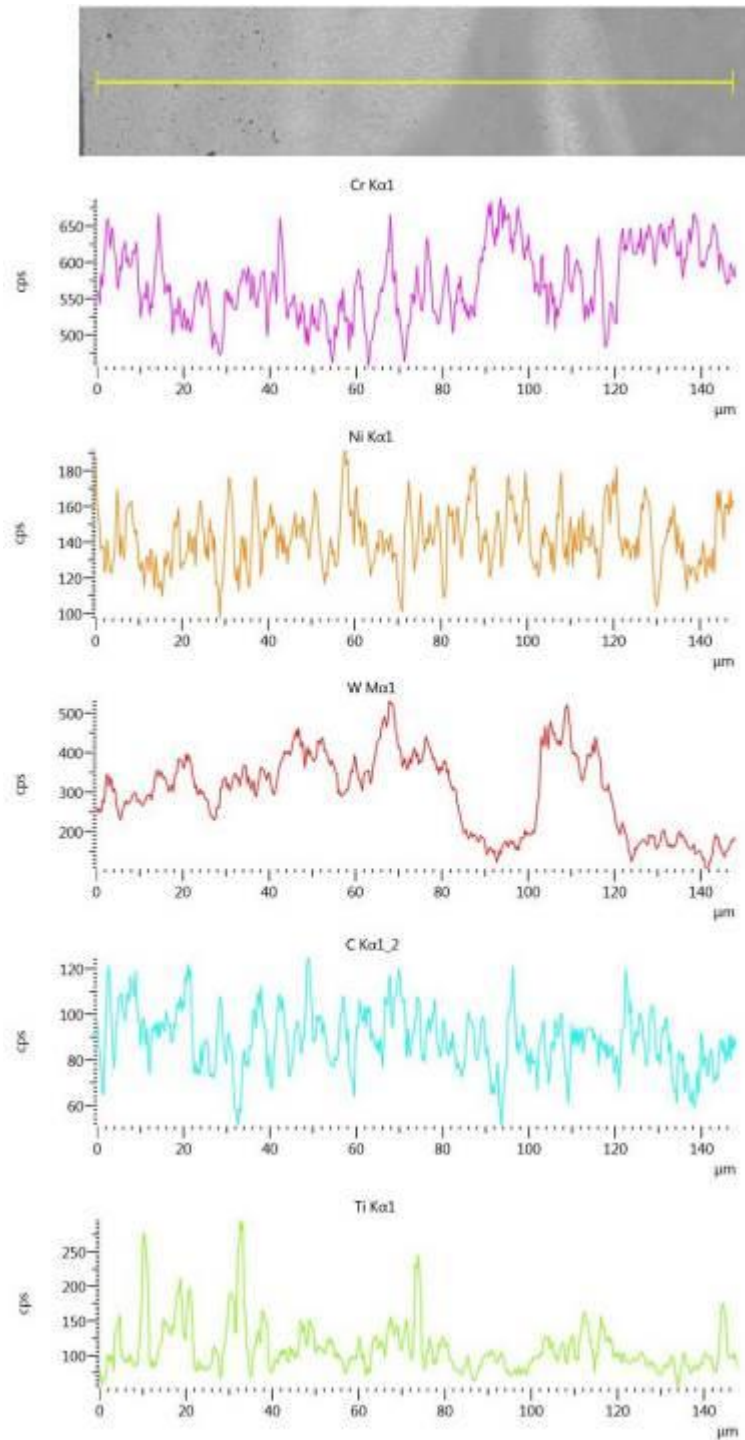


Рисунок 5.50 – Розподіл елементів у поверхневому шарі сталі 12Х18Н10Т після ЦЕІЛ і ЕІЛ електродом інструментом з твердого сплаву Т15К6

Таблиця 5.20 – Якісні параметри квазібагатошарових покриттів на сталі 12Х18Н10Т

Матеріал електрода - інструмента	Товщина зони підвищеної твердості поверхневого шару, мкм	Максимальна мікротвердість зміцненого поверхневого шару, МПа	Фазовий склад покриття	Шорсткість поверхні, Ra, мкм
С	90-160	9500	-	9,5
С + Al	80-120	7500	твердий розчин ОЦК, твердий розчин ГЦК, (Fe ₄ Al ₁₃), ((Cr,Fe) ₇ C ₃), (AlFe ₃ C)	25,5
С+Al+Т15К6	320-360	11500	твердий розчин ОЦК, (NiCoFe)Al, TiC, Fe ₇ W ₆	7,5
С + Т15К6	140-220	9000	твердий розчин ОЦК, твердий розчин ГЦК, TiC, комплексний карбід Me ₆ C	8,5

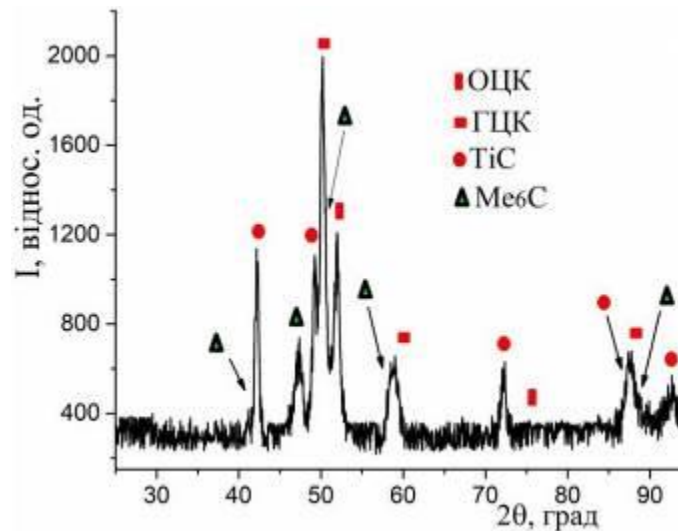


Рисунок 5.51 – Дифрактограми поверхні сталі 12Х18Н10Т після ЦЕІ і ЕІІ електродом інструментом з твердого сплаву Т15К6

Таким чином, наведено аналіз методу електроіскрового легування, що підвищує надійність і довговічність обладнання, що працює в складних умовах. Встановлено закономірності формування багатошарових покриттів при

електроіскровому легуванні в умовах чергування легуючих електродів для послідовного нанесення на підкладку зі сталі 12Х18Н10Т. Апробовані схеми:

- цементация електроіскровим легуванням (ЦЕІЛ) при $W_p = 3,4$ Дж + алітування алюмінієвим електродом марки СвА99 при $W_p = 3,4$ Дж;
- ЦЕІЛ при $W_p = 3,4$ Дж + ЕІЛ твердим сплавом Т15К6 при $W_p = 3,4$ Дж;
- ЦЕІЛ при $W_p = 3,4$ Дж + алітування алюмінієвим електродом марки СвА99 при $W_p = 3,4$ Дж + ЕІЛ твердим сплавом Т15К6 при $W_p = 3,4$ Дж.

Зміцнений шар покриття, отриманого в послідовності ЦЕІЛ → ЕІЛ АІ, має мікротвердість до 7500 МПа, його товщина 80 – 120 мкм і складається з двох твердих розчинів з ОЦК і ГЦК ґратками, інтерметалевої сполуки (Fe_4Al_{13}) і двох карбідів з гексагональною ($(Cr, Fe)_7C_3$) і кубічною ($AlFe_3C$) кристалічною ґраткою.

При ЕІЛ за схемою ЦЕІЛ → ЕІЛ Т15К6 не вдається досягти високого значення мікротвердості (Н_μ на поверхні становить 9000 МПа), оскільки в покритті утворюються два твердих розчини з ОЦК і ГЦК ґратками, карбід титану і комплексний карбід Me_6C (типу W_3Fe_3C), що не забезпечують достатньої мікротвердості. Товщина шару підвищеної твердості становить 200 - 220 мкм.

Запропоновано новий спосіб захисту сталевих виробів від абразивного та інших видів зносу шляхом нанесення на їх зношувані поверхні методом електроіскрового легування зносостійких покриттів з тугоплавких зносостійких металів, проводячи попередню ЦЕІЛ і ЕІЛ алюмінієм.

Покриття, сформовані в послідовності ЦЕІЛ → ЕІЛ АІ → ЕІЛ Т15К6 мають найбільшу зону підвищеної твердості (320-360 мкм) і найменшу шорсткість поверхні (7,5 мкм). За рахунок утворення, 62% (мас.) ТіС та інтерметалідів забезпечується отримання максимальної мікротвердості поверхневого шару (більше 11500 МПа). ЕІЛ за описаною технологією дозволяє

збільшити дифузійну зону вуглецю й алюмінію, підвищити твердість і товщину зміцненого шару.

5.7. Висновки до розділу

1. Проведений аналіз якісних параметрів сульфоцементованих покриттів, отриманих енергоефективним та екологічно чистим методом ЕІЛ із застосуванням СТС. В результаті аналізу топографії поверхневого шару після сульфоцементзації методом ЕІЛ встановлений однотипний характер форми сформованих елементів мікронерівностей поверхні. Значне збільшення мікронерівностей на поверхні зразка спостерігається зі збільшенням енергії розряду до $W_p = 3,4$ Дж. Шорсткість поверхні при цьому становить $Ra = 2,5$ мкм.

2. Металографічний і дюрOMETричний аналіз після сульфоцементзації методом ЕІЛ показали, що оброблена поверхня складається із шарів: «м'якого», зміцненого й основного металу. З ростом енергії розряду збільшується товщина, мікротвердість і суцільність покриття. Наявність в СТС сірки сприяє процесу сульфідкування. Зі збільшенням енергії розряду з 0,13 до 3,4 Дж при ЕІЛ сталі 20 кількість сірки на поверхні покриття зменшується, однак за рахунок інтенсифікування дифузійних процесів при проходженні електроіскрового розряду товщина сульфідованого шару збільшується. Сірка накопичується в поверхні металу на глибині до 30 мкм, її концентрація на цій відстані становить близько 0,4%.

3. При сульфоцементзації сталі 40 будова покриття не змінюється. У зв'язку з проходженням гартівних процесів, а також в результаті підвищеного вмісту вуглецю в поверхневому шарі мікротвердість отриманих шарів на сталі 40 збільшується: при $W_p = 0,13$ Дж $H_{\mu} = 7074$ МПа, а при $W_p = 0,52$ Дж $H_{\mu} = 13065$ МПа. Суцільність «білого» шару при $W_p = 0,13$ Дж становить близько 70%, а при $W_p = 0,52$ Дж прагне до 100%.

4. Результати мікрорентгеноспектрального аналізу зразків зі сталі 40 свідчать про те, що при сульфоцементації методом ЕІЛ поверхневі шари на глибині 10-40 мкм, залежно від енергетичних параметрів процесу, насичені сіркою. Ця зона – шар зниженої мікротвердості, так само, як і на сталі 20, характеризується зниженою мікротвердістю. Під цим шаром формується зміцнений шар, він характеризується підвищеним вмістом вуглецю і високою мікротвердістю. Товщина зміцненого шару так само залежить від енергетичних параметрів ЕІЛ і становить 15-40 мкм.

5. Проведений аналіз якісних параметрів сульфоалітованих покриттів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС. Дослідження профілів поверхонь зразків після ЕІЛ і параметрів шорсткості досліджуваних поверхонь показав, що зі збільшенням енергії розряду, а також вмісту вуглецю в сталі параметри Ra, Rz, Rmax зростають. Металографічний та дюрOMETричний аналізи отриманих покриттів на сталі 20 свідчать про те, що на мікроструктурах можна виділити три зони: приповерхневий, не суцільний пухкий шар, товщиною 10-100 мкм і мікротвердістю 1368-2073 МПа, «білий» зміцнений шар товщиною 20-40 мкм і мікротвердістю 4094-5157 МПа, дифузійна зона й основний метал з ферито-перлітною структурою. Зі зростанням енергії розряду збільшуються параметри шару: товщина, мікротвердість верхнього і білого шару, а також їх суцільність.

6. При заміні матеріалу підкладки на сталь 40 при сульфоалітуванні збільшується як твердість верхнього шару (1670 і 2240 МПа при енергіях розряду 0,13 і 3,4 Дж відповідно), так і зміцненого шару (5147 і 10380 МПа при енергіях розряду 0,13 і 3,4 Дж відповідно).

7. Локальний мікрорентгено-спектральний аналіз сульфоалітованих покриттів показав, що найбільша кількість сірки знаходиться у поверхневому шарі, що характеризує шар зниженої мікротвердості і розподіляється по глибині до 10 мкм. Дифузійна зона алюмінію складає 30-80 мкм, залежно від

енергетичних параметрів процесу ЕІЛ. Найбільший вміст алюмінію характерний для ділянок покриття, що знаходяться на відстані 7-15 мкм від поверхні. Приповерхневий «м'який» шар збагачений сіркою, зміцнений – алюмінієм.

8. За результатами рентгенографічних досліджень, фазовий склад сульфолітованих покриттів залежить від енергетичних параметрів ЕІЛ, а також від вмісту вуглецю в матеріалі основи. При всіх досліджуваних енергіях розряду в поверхневому шарі утворюється інтерметалід $FeAl$, зі збільшенням енергії розряду – інтерметалід $FeAl_2$. Крім того, в сталі 20 виявляється твердий розчин ОЦК, а в сталі 40 при енергіях розряду $W_p = 0,13$ Дж і $W_p = 0,55$ Дж – твердий розчин ГЦК, а при $W_p = 3,4$ Дж – твердий розчин ОЦК.

9. Досліджені особливості структуроутворення Al-C-S покриттів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС. Показано, що у поверхневому шарі спостерігається утворення окремих лунок, глибиною до 150 мкм. На зразку сталі 20 в області кратера виокремлюється три зони: перша зона – оплавлення, погано витравлюється, метал цієї зони при ЕІЛ знаходився в рідкому стані. Друга – перехідна зона прилягає до першої, складається із зерен складної форми – зона термічного впливу. Третя – зона вихідного металу прилягає до перших двох, має вихідну структуру.

10. Вивчено вплив режимів ЕІЛ на якісні параметри Al-C-S-покриттів. При значному збільшенні енергії розряду (з 0,52 до 6,8 Дж) відбувається зростання шорсткості поверхні і зменшення суцільності покриття. Мікроструктурний аналіз Al-C-S-покриттів на сталі 20 показав, що суцільність і товщина «білого» шару становить 50% і 60 мкм, відповідно (при $W_p = 6,8$ Дж). У свою чергу мікротвердість на поверхні складає 9000 МПа. Наявність в СТС сірки сприяє процесу сульфидування: на поверхні кількість сірки максимальна і зменшується в міру віддалення від поверхні.

11. Проведене дослідження одночасного насичення сталі 38Х2МЮА вуглецем, сіркою й алюмінієм методом ЕІЛ графітовим електродом на різних режимах. Металографічний аналіз показав, що покриття, отримані при $W_p = 0,13$ Дж і $0,52$ Дж складаються з 3-х зон: білий шар, перехідна зона і основний метал. Однак, зі збільшенням енергії розряду до $4,9$ Дж, між білим шаром і перехідною зоною формується підшар товщиною до 10 мкм. Крім того, зі збільшенням енергії розряду зростає товщина білого шару, його мікротвердість і суцільність. Так, при $W_p = 0,13$ Дж і $W_p = 4,9$ Дж товщина «білого» шару становить 10 і 70 мкм, $H_\mu = 5126$ МПа і $H_\mu = 7721$ МПа, суцільність 60 і 100% , відповідно. Мікрорентгеноспектральний аналіз показав, що вміст сірки на поверхні максимальний і різко зменшується вглиб металу.

12. Проведений аналіз якісних параметрів Al-C-B покриттів, отриманих із застосуванням СТС при ЕІЛ. Мікроструктурний аналіз покриттів на сталі 40 показав, що поверхневий шар складається з декількох ділянок, кількість і параметри яких визначаються енергетичними режимами процесу ЕІЛ. При енергіях розряду $0,13$ і $0,55$ Дж шари складаються з 3-х ділянок – верхній «білий» зміцнений шар, дифузійна зона і основний метал – сталь 40 з ферито-перлітною структурою. При цьому, величина «білого» шару для цих режимів становить $15-20$ мкм. Збільшення енергії розряду до $4,9$ Дж призводить до зміни кількості ділянок та їх структури: верхній шар з дендритною структурою (до 60 мкм), прошарок (до 20 мкм), дифузійна зона, що характеризується подрібненими структурними складовими і в зв'язку з цим має підвищену травимість в реактиві, а також основного металу. ДюрOMETричні дослідження показали, що з посиленням енергетичного впливу при ЕІЛ збільшується мікротвердість як верхнього зміцненого шару, так і дифузійної зони: при $W_p = 0,13$ Дж $H_\mu = 6487$ МПа, а при $W_p = 4,9$ Дж - 12350 МПа.

13. Результати рентгеноструктурного аналізу Al-C-B покриттів свідчать про те, що при енергіях розряду $0,13$ і $0,55$ Дж фазовий склад покриттів

представлений твердими розчинами ОЦК і ГЦК, з параметрами $a = 28,651$ нм і $36,189$ нм, відповідно. Покриття, отримані при $W_p = 4,9$ Дж, характеризуються наявністю, крім твердих розчинів ОЦК і ГЦК зі зміненими в більшу сторону параметрами кристалічної ґратки, інтерметалідів Fe_4Al_{13} і легованого цементиту $Fe_3(CB)$. Утворення цих фаз сприяє значному зміцненню і збільшенню мікротвердості поверхневого шару до 12350 МПа. Мікрорентгеноспектральний аналіз отриманих покриттів свідчить про те, що при електроіскровому легуванні відбувається насичення поверхневих шарів алюмінієм, бором і вуглецем. Зі збільшенням енергії розряду дифузійна зона збільшується: при ЕІЛ з $W_p = 0,13$ Дж сталі 40 дифузійна зона складає $10-15$ мкм.

14. При заміні підкладки зі сталі 40 на сталь 20 в результаті ЕІЛ спостерігається збільшення товщини поверхневого шару при деякому зниженні мікротвердості. При $W_p = 0,13$ Дж формуються тонкі і не суцільні шари. Зі збільшенням енергії розряду товщина покриттів, їх суцільність, збільшуються. Необхідно відмітити, що зі збільшенням енергії розряду відбувається збільшення дифузійної зони Al, C і B: при $W_p = 0,13$ Дж ця зона складає $5-7$ мкм, тоді як при $W_p = 4,9$ Дж – $23-25$ мкм. Більшою мірою вглиб від поверхні дифундує вуглець і алюміній.

15. Досліджено процес сульфомолібденування металевих поверхонь із застосуванням СТС при ЕІЛ. Металографічні та дюрOMETричні дослідження показали, що сульфомолібденові покриття складаються з 4-х зон: верхній пухкий шар з мікротвердістю $H_\mu = 1112-2040$ МПа, «білий» зміцнений шар з $H_\mu = 5147-5474$ МПа для $W_p = 0,13$ Дж і $H_\mu = 10596-10731$ МПа для $W_p = 3,4$ Дж, дифузійна зона і основний метал. При заміні підкладки зі сталі 20 на 40 відбувається підвищення мікротвердості, товщини зміцненого шару, а також суцільності.

16. Електронно-мікроскопічні дослідження отриманих покриттів показали, що отриманий шар має неоднорідний склад з різною концентрацією

елементів. Згідно з картами розподілу елементів за площею досліджуваних зразків, на поверхні концентрується сірка, молібден розподіляється більш рівномірно в покритті. Енергодисперсійний аналіз показав, що сірка та молібден концентруються на глибині до 4 і 19 мкм, відповідно, при $W_p = 0,13$ Дж, до 5 і 25 мкм при $W_p = 0,55$ Дж, до 15 і 70 мкм при $W_p = 3,4$ Дж, відповідно. Рентгеноструктурний аналіз отриманих покриттів підтверджує результати енергодисперсійного аналізу. При невисоких енергіях розряду фазовий склад покриттів на сталі 40 представлений твердим розчином ОЦК, за періодом гратки близьким до фериту, мартенсит, ГЦК твердий розчин та інтерметалід FeMo (σ -фаза).

17. При заміні підкладки зі сталі 40 на сталь 20, у сульфомолібденовому покритті виявляється менша кількість ГЦК-фази – залишкового аустеніту при однаковій енергії розряду. Дисульфід молібдену утворюється вже при енергії розряду $W_p = 0,55$ Дж (3,77%), а при $W_p = 3,4$ Дж його виявляється близько 8% на поверхні і близько 5% на глибині до 15 мкм.

18. Представлений аналіз закономірностей формування багат шарових покриттів при електроіскровому легуванні в умовах чергування легуючих електродів для послідовного нанесення на підкладку зі сталі 12X18H10T. Апробовані схеми: цементация електроіскровим легуванням (ЦЕІЛ) при $W_p = 3,4$ Дж + алітування алюмінієвим електродом марки СВА99 при $W_p = 3,4$ Дж; ЦЕІЛ при $W_p = 3,4$ Дж + ЕІЛ твердим сплавом Т15К6 при $W_p = 3,4$ Дж; ЦЕІЛ при $W_p = 3,4$ Дж + алітування алюмінієвим електродом марки СВА99 при $W_p = 3,4$ Дж + ЕІЛ твердим сплавом Т15К6 при $W_p = 3,4$ Дж.

19. Зміцнений шар покриття, отриманого в послідовності ЦЕІЛ → ЕІЛ Al, має мікротвердість до 7500 МПа, його товщина 80 – 120 мкм і складається з двох твердих розчинів з ОЦК і ГЦК гратками, інтерметалевої сполуки (Fe_4Al_{13}) і двох карбідів з гексагональною ($(Cr, Fe)_7C_3$) і кубічною ($AlFe_3C$) кристалічною граткою.

20. При ЕІЛ за схемою ЦЕІЛ → ЕІЛ Т15К6 не вдається досягти високого значення мікротвердості (Н_ц на поверхні становить 9000 МПа), оскільки в покритті утворюються два твердих розчини з ОЦК і ГЦК ґратками, карбід титану і комплексний карбід Me₆C (типу W₃Fe₃C), що не забезпечують достатньої мікротвердості. Товщина шару підвищеної твердості становить 200 - 220 мкм.

21. Покриття, сформовані в послідовності ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Т15К6 мають найбільшу зону підвищеної твердості (320-360 мкм) і найменшу шорсткість поверхні (7,5 мкм). За рахунок утворення, 62% (мас.) TiC та інтерметалідів забезпечується отримання максимальної мікротвердості поверхневого шару (більше 11500 МПа). ЕІЛ за описаною технологією дозволяє збільшити дифузійну зону вуглецю й алюмінію, підвищити твердість і товщину зміцненого шару.

22. За матеріалами розділу опубліковані наступні роботи [140, 254-256, 258, 260-263, 265-268, 268, 289, 291, 298-300, 302-304, 310, 320].

РОЗДІЛ 6

ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ДИНАМІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

6.1. Результати дослідження впливу способів підвищення якості робочих поверхонь на їх механічні властивості

Електроіскрові покриття, підвищуючи одні експлуатаційні характеристики, нерідко погіршують інші. Після нанесення покриттів міцність сталі не змінюється або незначно зменшується (σ_v , $\sigma_{0,2}$), а ударна в'язкість, показники пластичності (ψ , δ), малоциклова міцність і втомна міцність завжди зменшуються. Наявність електроіскрових покриттів може впливати на механічні властивості основного металу з наступних причин:

1) покриття характеризуються високою міцністю зчеплення з основним металом, тому деталь після ЕІЛ необхідно розглядати як систему, властивості поверхні якої визначаються властивостями покриття;

2) в покриттях, отриманих методом ЕІЛ, виникають значні залишкові напруження розтягнення, що поширюються на поверхню основного металу;

3) тверді зносостійкі електроіскрові покриття не витримують пластичної деформації основного металу і розтріскуються; тріщини є концентраторами напружень для основного металу;

4) в процесі ЕІЛ відбувається взаємодія матеріалу, що наноситься на поверхню, з повітрям (за умови проведення ЕІЛ в повітряному середовищі), при цьому можливе утворення оксидів, наявність яких викликає окрихчення поверхневого шару;

5) застосування ЕІЛ веде до збільшення шорсткості оброблюваної поверхні, створюються додаткові місця концентрації напружень і, отже, виникають умови для появи мікротріщин.

При визначенні впливу покриттів, отриманих методом ЕІЛ, на механічні властивості деталей слід враховувати такі важливі фактори, як фізико-механічні властивості основного металу, шорсткість, способи обробки покриття (наприклад, з ППД або без).

Для дослідження впливу різних методів зміцнення на механічні властивості деталей були виготовлені зразки, згідно ГОСТ 7855-84 із застосовуваних матеріалів (див. табл. 3.4 та 3.7).

Результати проведених досліджень зведені до таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Вплив методів формування поверхневих шарів зразків на їх механічні властивості

Матеріал зразка	Застосовувані методи	Межа текучості, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %	Відносне звуження, %
1	2	3	4	5	6
Сталь 20	ТО	175	350	24	50
	ЕІЛ (Al)	157	315	26	55
	ЕІЛ (S)	161	322	23	54
	ЦЕІЛ	171	343	25	52
	ЕІЛ (C+S)	163	325	27	54
	ЕІЛ (Al)→БУФО	193	385	21	47
	ЦЕІЛ →БУФО	200	398	20	43
	ЕІЛ (N+C) →БУФО				
Сталь 40	ТО	245	470	19	42
	ЕІЛ (C+S)	225	432	20	45
	ЕІЛ (S+Al)	215	413	21	47
	ЕІЛ (Al+C+S)	220	423	20	46
	ЕІЛ (Al+C+V)	208	398	22	48
	ЕІЛ (Mo+S)	210	404	22	48
	ЕІЛ (C+S) →БУФО	289	554	15	35
	ЕІЛ (S+Al) →БУФО	282	540	16	36
	ЕІЛ (Al+C+S) →БУФО	287	550	14	34
	ЕІЛ (Al+C+V) →БУФО	292	559	15	33
	ЕІЛ (Mo+S) →БУФО	290	555	13	32
	ЕІЛ (N) →БУФО				

Продовження таблиці 6.1

1	2	3	4	5	6
Сталь 12X18H10T	ТО	196	510	40	55
	ЕІЛ (S)	176	459	35	49
	ЕІЛ (S)→БУФО	210	545	38	51
Сталь 30X13	ТО	588	735	14	40
	ЦЕІЛ	576	720	15	42
	ЦЕІЛ →БУФО	646	809	13	38
Сталь 38X2МЮА	ТО	835	980	14	50
	ЕІЛ (Al+C+S)	726	852	16	53
	ЕІЛ (Al+C+S) →БУФО	935	1007	12	44

В результаті аналізу таблиці встановлено:

– формування покриттів методом ЕІЛ на підкладках зі сталі 20, 40, 38X2МЮА, 12X18H10T, 30X13 супроводжується зниженням меж міцності і плинності, відповідно, на ~ 5 і ~ 4%. При цьому характеристики пластичності (відносне подовження і відносне звуження) зростають;

– застосування методу ЦЕІЛ без додаткової обробки призводить до зменшення міцнісних властивостей на всіх досліджуваних сталях порівняно з не зміцненими на 1-2%;

– використання методу БУФО як заключну операцію після ЕІЛ, сприяє підвищенню характеристик міцності, відповідно, для сталі 20 на 10-15%, 40 і 38X2МЮА – 12-18%, 12X18H10T і 30X13 – 7 і 10%, відповідно.

6.2. Результати порівняльних трибологічних випробувань поверхонь ковзання, оброблених методом ЕІЛ

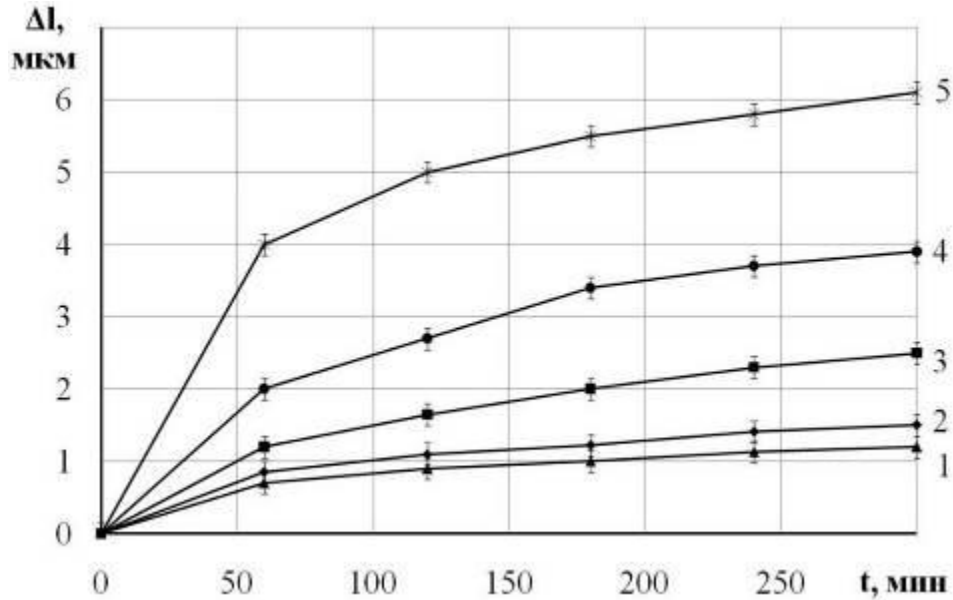
В результаті металографічних і дюрOMETричних досліджень отримані дані про якісні показники покриттів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням різних СТС (див. розділи 4 і 5). Для трибологічних досліджень виготовлялися зразки розміром 15x15x8 мм і випробовувалися згідно методики, описаної в розділі 3 (табл. 6.2).

Таблиця 6.2 – Якісні параметри різних серій зразків для трибологічних досліджень

№ серії	Матеріал	Вид термічної обробки (ТО)	Покриття	Товщина шару*, мкм	Твердість основи (НВ) або мікротвердість поверхні (Н _μ , МПа)
1.	Сталь 20	Нормалізація	-	-	163 НВ
2.			ЕІЛ (Al)	h _{зміцн} =70	H _μ =7270
3.			ЦЕІЛ	h _{зміцн} =100-230	H _μ =10796
4.			ЕІЛ (S-C)	h _{зниж.мікротв} =30	H _μ =1600
				h _{зміцн} =50	H _μ =2150
5.			ЕІЛ (S+Al)	h _{зниж.мікротв} =20	H _μ =2073
				h _{зміцн} =80	H _μ =7150
6.			ЕІЛ (Al+C+S)	h _{зміцн} =60	H _μ =9000
7.			ЕІЛ (Al+C+B)	h _{зміцн} =75	H _μ =11345
8.			ЕІЛ (Mo+S)	h _{зниж.мікротв} =40	H _μ =1666
	h _{зміцн} =50	H _μ =10596			
9.	ЕІЛ (N)	h _{зміцн} =40	H _μ =8969		
10.	ЕІЛ (N+C)	h _{зміцн} =100	H _μ =9731		
11.	Сталь 40	Гартування, 840-860°C, вода; відпуск, 500 °C, масло	-	-	209 НВ
12.			ЕІЛ (Al)	h _{зміцн} =60-130	H _μ =7400
13.			ЕІЛ (S-C)	h _{зниж.мікротв} =14	H _μ =1900
				h _{зміцн} =40	H _μ =13065
14.			ЕІЛ (S+Al)	h _{зниж.мікротв} =30	H _μ =2240
				h _{зміцн} =70	H _μ =10380
15.			ЕІЛ (Al+C+S)	h _{зміцн} =80	H _μ =9100
16.			ЕІЛ (Al+C+B)	h _{зміцн} =60	H _μ =12350
17.			ЕІЛ (Mo+S)	h _{зниж.мікротв} =30	H _μ =2040
				h _{зміцн} =70	H _μ =10731
18.	ЕІЛ (N)	h _{зміцн} = 50	H _μ =9160		
19.	ЕІЛ (N+C)	h _{зміцн} =120	H _μ =9932		
20.	Сталь 40X	//-//	ЦЕІЛ	h _{зміцн} =130-240	H _μ =11823
21.	38X2МЮА	Гартування, °C 940 ± 10, масло; відпуск, °C 600-670, масло	-	-	302-341 НВ
22.			ЕІЛ (Al+C+S)	h _{зміцн} =70	H _μ =7721
23.			ЕІЛ (N+C)	h _{зміцн} =110	H _μ =10360
24.			Іонне азотування	h _{зміцн} =200	H _μ =9870
25.			Карбонітрація в солях	h _{зміцн} =120	H _μ =10170
26.	12X18Н10Т	Гартування, °C 1000-1080, вода	-	-	140-170 НВ
27.			ЦЕІЛ	h _{зміцн} =120	H _μ =9500
28.			ЕІЛ (C+Al+T15K6)	h _{зміцн} =320	H _μ =11500
29.			Карбонітрація в солях	h _{зміцн} =110	H _μ =9550
30.			ЕІЛ (N+C)	h _{зміцн} =100	H _μ =10080

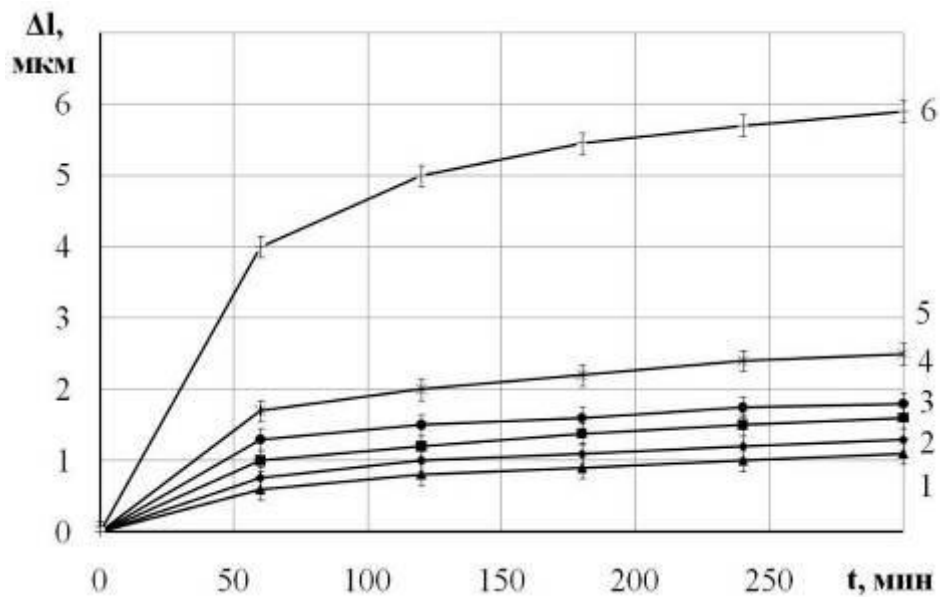
* товщина шару зниженої мікротвердості h_{зниж.мікротв}, товщина зміцненого шару h_{зміцн}

На рисунках 6.1 і 6.2, подані результати випробувань зносостійкості зразків зі сталей 20 і 40 після ЕІЛ з використанням СТС в умовах сухого тертя в парі з індентором із вуглеграфіту.



1 – N+C, 2 – C, 3 – Al+C+S, 4 – S+C і 5 – без покриття

Рисунок 6.1 – Лінійний знос зразків зі сталі 20, індентор – вуглеграфіт



1 – Al+C+B, 2 – Mo+S, 3 – N, 4 – S+Al, 5 – Al і 6 – без покриття

Рисунок 6.2 – Лінійний знос зразків зі сталі 40, індентор – вуглеграфіт

Як показали дослідження (рис. 6.1 і 6.2), високу зносостійкість мають покриття систем Al + C + B ($\Delta l = 1,1$ мкм на сталі 40), N + C ($\Delta l = 1,2$ мкм на сталі 20), Mo + S ($\Delta l = 1,3$ мкм на сталі 40). Слід зазначити, що найбільш інтенсивне зношування відбувається на початку процесу, потім знос значно сповільнюється і після ~ 2 годин випробувань стає порівняно незначним і відносно стабільним за величиною.

Сірка в покритті забезпечує підвищення зносостійкості. Так, на сталі 40 отримано, що лінійний знос зразків з алітованим покриттям складає $\Delta l = 2,5$ мкм, а із сульфоалітованим – $\Delta l = 1,8$ мкм. Матеріал і твердість основи також впливає на знос зразків. Так, лінійний знос зразків зі сталі 20 з Al + C + S-покриттям за величиною такий же, як із сталі 40 з алітованим покриттям, і становить $\Delta l = 2,5$ мкм.

Використання в якості підкладки легованої сталі забезпечує зниження лінійного зносу. Показано, що всі досліджені покриття, отримані методом ЕІЛ з використанням СТС, забезпечують підвищення зносостійкості сталям 38Х2МЮА і 12Х18Н10Т (табл. 6.3).

Порівняльні випробування покриттів, отриманих методом ХТО (карбонітрація), іонним азотуванням і ЕІЛ з використанням СТС на сталі 38Х2МЮА показали, що за зносостійкістю карбонітридні покриття, отримані методом ЕІЛ з СТС не поступаються таким, отриманим в солях дифузійним способом (табл. 6.3). Крім того, покриття Al + C + S зменшують лінійний знос сталі у 1,5 рази порівнянно зі станом без покриття.

Порівняльні випробування покриттів, отриманих різними способами, на сталі 12Х18Н10Т показали, що тверді та зносостійкі покриття С + Al + Т15К6 і N + С, отримані за пропонованими технологіями, заснованими на методі ЕІЛ, забезпечують лінійний знос 1,1 і 1,2 мкм, відповідно. Так, лінійний знос сталі 12Х18Н10Т з карбонітридним покриттям, отриманим методом ЕІЛ із

застосуванням СТС, зменшується в 3 рази порівняно зі станом без покриття (табл. 6.3).

Характер процесу зношування зразків аналогічний зносу зразків з вуглецевої сталі. Спочатку процесу відбувається найбільш інтенсивне зношування, яке поступово сповільнюється і після 2 години випробувань стає відносно стабільним. При цьому, як для вуглецевої сталі 20 і 40, так і для легованої сталі (38Х2МЮА і 12Х18Н10Т) характер зносу зразків у першому наближенні нагадує експоненціально зростаючу залежність.

У табл. 6.3 представлений знос зразків зі сталей 20, 40, 38Х2МЮА і 12Х18Н10Т, зміцнених різними способами, в парі з індентором з вуглеграфіта після 300 хв випробувань.

Таблиця 6.3 – Лінійний знос зразків після випробувань

№ серії	Матеріал	Покриття	Лінійний знос, мкм
1.	Сталь 20	-	6,1
2.		ЦЕЛІ	1,5
3.		ЕЛІ (S-C)	3,9
4.		ЕЛІ (Al+C+S)	2,5
5.		ЕЛІ (N+C)	1,2
6.	Сталь 40	-	5,9
7.		ЕЛІ (Al)	2,5
8.		ЕЛІ (S+Al)	1,8
9.		ЕЛІ (Al+C+B)	1,1
10.		ЕЛІ (Mo+S)	1,3
11.		ЕЛІ (N)	1,6
12.	38Х2МЮА	-	4,1
13.		ЕЛІ (Al+C+S)	2,8
14.		ЕЛІ (N+C)	2,3
15.		Іонне азотування	2,5
16.		Карбонітрація в солях	2,3
17.	12Х18Н10Т	-	3,7
18.		ЦЕЛІ	1,6
19.		ЕЛІ (C+Al+T15K6)	1,1
20.		Карбонітрація в солях	1,4
21.		ЕЛІ (N+C)	1,2

6.3. Управління якістю поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС

6.3.1. Загальні положення

Нами запропонована математична модель управління якістю поверхневих шарів деталей при виконанні процесу насичення сталльної поверхні методом ЕІЛ одним та кількома елементами. В розділі 2 подана методика прогнозування параметрів якості поверхневих шарів сталних деталей, сформованих методом ЕІЛ із застосуванням СТС. Вона дозволяє за енергетичними параметрами обладнання прогнозувати якісні показники формованого поверхневого шару, а також вирішувати зворотну задачу – визначати необхідні режими ЕІЛ для забезпечення необхідної якості поверхні (товщини, мікротвердості, шорсткості, суцільності покриття). Розроблена методика дозволяє встановлювати критерії оцінки альтернативних варіантів способів оброблення методом ЕІЛ із застосуванням СТС поверхневих шарів необхідної якості і вибору найбільш раціонального [259, 268, 347, 348].

Результати досліджень якості поверхневих шарів сформованих методом ЕІЛ, із застосуванням СТС для досліджуваних матеріалів катода подані у ДОДАТКУ Г та Д.

Нижче представлені зведені дані визначення констант рівнянь прогнозування параметрів якості поверхневих шарів (товщини, мікротвердості, шорсткості, суцільності покриття) та енергетичних параметрів обладнання для їх отримання (енергії розряду) для різних методів обробки методом ЕІЛ, із застосуванням СТС, що включають насичення оброблюваної поверхні одним чи кількома елементами.

6.3.2. Визначення констант рівнянь якості поверхневих шарів після однокомпонентного насичення

На підставі експериментальних досліджень (ДОДАТОК Г.1) встановлено, що при алітуванні методом ЕІЛ сталі 20 та 40 одержані залежності прогнозування якісних параметрів поверхневого шару при алітуванні методом ЕІЛ:

товщини зміцненого шару

$$\Delta h_a = \Delta h_{amax} \cdot e^{\frac{-E_a \Delta h}{W_p}},$$

його мікротвердості

$$\Delta H_{\mu a} = \Delta H_{\mu a max} \cdot e^{\frac{-E_a \Delta H_{\mu}}{W_p}},$$

шорсткості поверхні

$$\Delta Ra_a = \Delta Ra_{a max} \cdot e^{\frac{-E_a \Delta Ra}{W_p}},$$

суцільності шару

$$\Delta S_a = \Delta S_{amax} \cdot e^{\frac{-E_a \Delta S}{W_p}}.$$

На підставі цих залежностей побудовані математичні моделі прогнозування товщини, мікротвердості зміцненого шару при алітуванні методом ЕІЛ, шорсткості поверхні та суцільності шару. На основі моделей побудовані графіки $\ln \Delta h_a$; $\ln \Delta H_{\mu a}$; $\ln \Delta Ra_a$; $\ln \Delta S_a$ від (W_p^{-1}) , відповідно рисунки В.5-В.8, з метою визначення констант рівнянь прогнозування параметрів якості поверхневих шарів при алітуванні методом ЕІЛ. Як впливає з графіків, залежності $\ln \Delta h_a$; $\ln \Delta H_{\mu a}$; $\ln \Delta Ra_a$; $\ln \Delta S_a$ від (W_p^{-1}) прагнуть до прямих ліній.

На підставі проведених досліджень отримані зведені данні констант рівнянь прогнозування параметрів якості поверхневих шарів для сталей 20 та 40

(товщини, мікротвердості, шорсткості, суцільності покриття) при алітуванні методом ЕІЛ (табл. 6.4).

Таблиця 6.4 – Зведені дані констант ЕІЛ при алітуванні сталей 20 та 40

Основа	$E_{a\Delta h} = |tg\alpha|$, Дж	Δh_{amax} , мкм	$E_{a\Delta H_\mu}$, Дж	$\Delta H_{\mu a max}$, МПа	$E_{a\Delta Ra}$, Дж	ΔRa_{amax} , мкм	$E_{a\Delta S}$, Дж	ΔS_{amax} , %
Сталь 20	0,964	73,6	0,661	6921,58	1,00	8,08	0,285	100
Сталь 40	1,006	102,7	0,627	7906,97	1,06	7,92	0,373	100

На підставі експериментальних досліджень (ДОДАТОК Г.2) встановлено, що при ЦЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20 та 40 одержані залежності прогнозування якісних параметрів поверхневого шару:

товщини зміцненого шару

$$\Delta h_{цил(СТС)} = \Delta h_{цил(СТС)max} \cdot e^{\frac{-E_{цил(СТС)\Delta h}}{W_p}},$$

його мікротвердості

$$\Delta H_{\mu_{цил(СТС)}} = \Delta H_{\mu_{цил(СТС)max}} \cdot e^{\frac{-E_{цил(СТС)\Delta H_\mu}}{W_p}},$$

шорсткості поверхні

$$\Delta Ra_{цил(СТС)} = \Delta Ra_{цил(СТС)max} \cdot e^{\frac{-E_{цил(СТС)\Delta Ra}}{W_p}}.$$

У ДОДАТОКУ Г.2 подані графіки залежності $\ln \Delta h_c$, $\ln \Delta H_{\mu c}$, $\ln \Delta Ra_c$ від W_p^{-1} (рис. В.12-В.14.). Встановлено, що при цементації методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40 залежності $\ln \Delta h_c$, $\ln \Delta H_{\mu c}$, $\ln \Delta Ra_c$ від W_p^{-1} прагнуть до прямих ліній.

На підставі проведених досліджень (ДОДАТОК Г.2) отримані зведені данні констант рівнянь прогнозування параметрів якості поверхневих шарів для сталей 20 та 40 (товщини, мікротвердості покриття, шорсткості поверхні) при ЦЕІЛ (табл. 6.5).

Таблиця 6.5 – Зведені дані констант ЦЕІЛ сталей 20 та 40

Основа	$E_{c\Delta h} = |tg\alpha|$, Дж	Δh_{cmax} , мкм	$E_{c\Delta H_{\mu}} = |tg\alpha|$, Дж	$\Delta H_{\mu cmax}$, МПа	$E_{c\Delta Ra} = |tg\alpha|$, Дж	ΔRa_{cmax} , мкм
Сталь 20	1,131	211	0,093	11114	1,551	4,95
Сталь 40	1,087	235	0,045	11968	1,519	4,61

На підставі експериментальних досліджень (ДОДАТОК Г.3) встановлено, що при азотуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40 одержані залежності прогнозування якісних параметрів поверхневого шару: товщини зміцненого шару

$$\Delta h_q = \Delta h_{qmax} \cdot e^{\frac{-E_{q\Delta h}}{W_p}},$$

його мікротвердості

$$\Delta H_{\mu q} = \Delta H_{\mu qmax} \cdot e^{\frac{-E_{q\Delta H_{\mu}}}{W_p}},$$

шорсткості поверхні

$$\Delta Ra_q = \Delta Ra_{qmax} \cdot e^{\frac{-E_{q\Delta Ra}}{W_p}},$$

суцільності шару

$$\Delta S_q = \Delta S_{qmax} \cdot e^{\frac{-E_{q\Delta S}}{W_p}}$$

На основі експериментальних досліджень (ДОДАТОК Г.3) встановлено, що при азотуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20 та 40 одержані графіки залежності $\ln \Delta h_q$, $\ln \Delta H_{\mu q}$, $\ln \Delta Ra_q$, $\ln \Delta S_q$ від W_p^{-1} відповідно рисунки Г.19-Г.22. Як впливає з графіків, залежності $\ln \Delta h_q$, $\ln \Delta H_{\mu q}$, $\ln \Delta Ra_q$, $\ln \Delta S_q$ від W_p^{-1} прагнуть до прямих ліній.

На підставі проведених досліджень (ДОДАТОК Г.3) отримані зведені данні констант рівнянь прогнозування параметрів якості поверхневих шарів для сталей 20 та 40 (товщини, мікротвердості, шорсткості, суцільності покриття) при азотуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС (табл. 6.6).

Таблиця 6.6 – Зведені дані констант ЕІЛ при азотуванні сталей 20 та 40

Підклад- ка	$E_{q\Delta h} =$ $= |tg \alpha|$, Дж	Δh_{qmax} , мкм	$E_{q\Delta H_{\mu}} =$ $= |tg \alpha|$, Дж	$\Delta H_{\mu qmax}$, МПа	$E_{q\Delta Ra} =$ $= |tg \alpha|$, Дж	ΔRa_{qmax} , мкм	$E_{q\Delta S} =$ $= |tg \alpha|$, Дж	ΔS_{qmax} , %
Сталь 20	0,190	43	0,040	9050	0,260	6,28	0,045	72
Сталь 40	0,094	52	0,039	9265	0,276	6,79	0,038	82

Таким чином, розраховані константи рівнянь, згідно яких визначається режим ЕІЛ, необхідний для отримання заданої товщини шару, його мікротвердості, шорсткості поверхні та суцільності при алітуванні, цементації та азотуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС.

6.3.3. Визначення констант рівнянь якості поверхневих шарів після багатокомпонентного насичення

Розраховані константи рівнянь, згідно яких визначається режим ЕІЛ, необхідний для отримання заданих параметрів якості поверхневого шару при отриманні багатокомпонентних покриттів методом ЕІЛ із застосуванням СТС.

На підставі експериментальних досліджень (ДОДАТОК Д.1) встановлено, що при сульфоцементатії методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20 та 40 одержані залежності прогнозування якісних параметрів поверхневого шару при сульфоцементатії:

товщини шару зниженої мікротвердості

$$\Delta h_{km} = \Delta h_{km\max} \cdot e^{\frac{-E_{Ah}}{W_p}},$$

товщини зміцненого шару

$$\Delta h_{kz} = \Delta h_{kz\max} \cdot e^{\frac{-E_{kAh}}{W_p}},$$

мікротвердості шару зниженої мікротвердості

$$\Delta H_{\mu km} = \Delta H_{\mu km\max} \cdot e^{\frac{-E_{k\Delta H\mu}}{W_p}},$$

мікротвердості зміцненого шару

$$\Delta H_{\mu kz} = \Delta H_{\mu kz\max} \cdot e^{\frac{-E_{k\Delta H\mu}}{W_p}},$$

шорсткості поверхні

$$\Delta Ra_k = \Delta Ra_{k\max} \cdot e^{\frac{-E_{k\Delta Ra}}{W_p}},$$

суцільності шару

$$\Delta S_k = \Delta S_{k \max} \cdot e^{\frac{-E_k \Delta S}{W_p}}.$$

На підставі цих залежностей побудовані математичні моделі прогнозування товщини, мікротвердості шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару, шорсткості поверхні та суцільності шару при сульфоцементації методом ЕІЛ із застосуванням СТС. На основі моделей побудовані графіки $\ln \Delta h_{km}$ і $\ln \Delta h_{kz}$, $\ln \Delta H_{\mu km}$ і $\ln \Delta H_{\mu kz}$, $\ln \Delta Ra_k$, $\ln \Delta S_k$ від W_p^{-1} відповідно рисунки Д.5-Д.8. Як випливає з графіків, залежності $\ln \Delta h_{km}$ і $\ln \Delta h_{kz}$, $\ln \Delta H_{\mu km}$ і $\ln \Delta H_{\mu kz}$, $\ln \Delta Ra_k$, $\ln \Delta S_k$ від W_p^{-1} прагнуть до прямих ліній.

На підставі проведених досліджень (ДОДАТОК Д.1) отримані зведені данні констант рівнянь прогнозування параметрів якості поверхневих шарів для сталей 20 та 40 (товщини, мікротвердості, шорсткості, суцільності покриття) при сульфоцементації методом ЕІЛ (табл. 6.7).

На підставі експериментальних досліджень (ДОДАТОК Д.2) встановлено, що при сульфоалітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20 та 40 одержані залежності прогнозування якісних параметрів поверхневого шару при сульфоалітуванні:

товщини шару зниженої мікротвердості

$$\Delta h_{gm} = \Delta h_{gm \min} \cdot e^{\frac{-E_g \Delta h}{W_p}},$$

товщини зміцненого шару

$$\Delta h_{gz} = \Delta h_{gz \max} \cdot e^{\frac{-E_g \Delta h}{W_p}},$$

мікротвердості шару зниженої мікротвердості

$$\Delta H_{\mu g m} = \Delta H_{\mu g m \max} \cdot e^{\frac{-E_g \Delta H_{\mu}}{W_p}},$$

мікротвердості зміцненого шару

$$\Delta H_{\mu g z} = \Delta H_{\mu g z \max} \cdot e^{\frac{-E_g \Delta H_{\mu}}{W_p}},$$

шорсткості поверхні

$$\Delta Ra_g = \Delta Ra_{g \max} \cdot e^{\frac{-E_g \Delta Ra}{W_p}},$$

суцільності шару зниженої мікротвердості

$$\Delta S_{gm} = \Delta S_{gm \max} \cdot e^{\frac{-E_g \Delta S}{W_p}},$$

суцільності зміцненого шару

$$\Delta S_{gz} = \Delta S_{gz \max} \cdot e^{\frac{-E_g \Delta S}{W_p}}.$$

Побудовані графіки залежності $\ln \Delta h_{gm}$ і $\ln \Delta h_{gz}$, $\ln \Delta H_{\mu gm}$ і $\ln \Delta H_{\mu gz}$, $\ln \Delta Ra_g$, $\ln \Delta S_{gm}$ і $\ln \Delta S_{gz}$ від W_p^{-1} відповідно рисунки Д.13-Д.16. Як впливає з графіків, залежності $\ln \Delta h_{gm}$ і $\ln \Delta h_{gz}$, $\ln \Delta H_{\mu gm}$ і $\ln \Delta H_{\mu gz}$, $\ln \Delta Ra_g$, $\ln \Delta S_{gm}$ і $\ln \Delta S_{gz}$ від W_p^{-1} прагнуть до прямих ліній.

На підставі проведених досліджень (ДОДАТОК Д.2) отримані зведені данні констант рівнянь прогнозування параметрів якості поверхневих шарів для сталей 20 та 40 (товщини, мікротвердості, шорсткості, суцільності покриття) при сульфоалітуванні методом ЕІЛ (табл. 6.8).

Таблиця 6.7 – Зведені дані констант ЕІЛ при сульфоцементації сталей 20 та 40

Основа	Шар зниженої мікротвердості				Зміцнений шар		$E_{k\Delta H_{\mu}} =$ $= |tg\alpha|$, Дж	$E_{k\Delta h} =$ $= |tg\alpha|$, Дж	$E_{k\Delta Ra} =$ $= |tg\alpha|$, Дж	ΔRa_{kmax} , МКМ
	$\Delta H_{\mu kmax}$, МПа	Δh_{kmax} , МКМ	$E_{k\Delta S} =$ $= |tg\alpha|$, Дж	ΔS_{kmax} , %	$\Delta H_{\mu kзmax}$, МПа	$\Delta h_{kзmax}$, МКМ				
Сталь 20	1616	31	0,0299	100	2166	58	0,023	0,108	0,127	2,6
Сталь 40	1962	20	0,0522	100	13280	56	0,026	0,176	0,121	2,8

Таблиця 6.8 – Зведені дані констант ЕІЛ при сульфоалітуванні сталей 20 та 40

Основа	Шар зниженої мікротвердості			Зміцнений шар			$E_{g\Delta h} =$ $= |tg\alpha|$, Дж	$E_{g\Delta H_{\mu}} =$ $= |tg\alpha|$, Дж	$E_{g\Delta S} =$ $= |tg\alpha|$, Дж	$E_{g\Delta Ra} =$ $= |tg\alpha|$, Дж	ΔRa_{gmax} , МКМ
	Δh_{gmin} , МКМ	$\Delta H_{\mu gmax}$, МПа	ΔS_{gmax} , %	$\Delta h_{gзmax}$, МКМ	$\Delta H_{\mu gзmax}$, МПа	$\Delta S_{gзmax}$, %					
Сталь 20	16	2216	81	82	7259	100	0,141	0,066	0,067	0,27	6,49
Сталь 40	21	2332	88	76	10755	100	0,10	0,090	0,07	0,26	6,61

Таблиця 6.9 – Зведені дані констант ЕІЛ при формуванні покриттів системи Al-C-B методом ЕІЛ сталей 20 та 40

Основа	$E_{b\Delta h} = |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	Δh_{bmax} , МКМ	$E_{b\Delta H_{\mu}} = |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	$\Delta H_{\mu bmax}$, МПа	$E_{b\Delta S} = |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	ΔS_{bmax} , %	$E_{b\Delta Ra} = |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	ΔRa_{bmax} , МКМ
Сталь 20	0,176	78	0,097	11849	0,073	97	0,279	9,12
Сталь 40	0,185	62	0,086	12544	0,065	100	0,273	9,88

Таблиця 6.10 – Зведені дані констант ЕІЛ при сульфомолібденуванні сталей 20 та 40

Основа	Шар зниженої мікротвердості			Зміцнений шар			$E_{d\Delta h} = |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	$E_{\Delta H_{\mu d}} = |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	$E_{d\Delta Ra} = |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	ΔRa_{max} , МКМ	$E_{d\Delta S} = |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж
	$\Delta h_{dm max}$, МКМ	$\Delta H_{\mu dm max}$, МПа	$\Delta S_{dm max}$, %	$\Delta h_{d3 max}$, МКМ	$\Delta H_{\mu d3 max}$, МПа	$\Delta S_{d3 max}$, %					
Сталь 20	44	1718	77	53	10604	92	0,106	0,060	0,299	5,81	0,045
Сталь 40	32	2195	82	75	11083	97	0,145	0,069	0,265	5,94	0,050

Таблиця 6.11 – Зведені дані констант ЕІЛ при карбонітуванні сталей 20 та 40

Підкладка	$E_{p\Delta h} = |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	Δh_{pmax} , МКМ	$E_{p\Delta H_{\mu}} = |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	$\Delta H_{\mu pmax}$, МПа	$E_{p\Delta Ra} = |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	ΔRa_{pmax} , МКМ	$E_{p\Delta S} = |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	ΔS_{pmax} , %
Сталь 20	0,221	108	0,061	9882	0,225	4,94	0,014	100
Сталь 40	0,189	125	0,045	10060	0,227	4,37	0,030	100

На підставі експериментальних досліджень (ДОДАТОК Д.3) встановлено, що при синтезі Al+C+V покриттів методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40 одержані залежності прогнозування якісних параметрів поверхневого шару:

товщини зміцненого шару

$$\Delta h_b = \Delta h_{b \max} \cdot e^{\frac{-E_b \Delta h}{W_p}},$$

його мікротвердості

$$\Delta H_{\mu b} = \Delta H_{\mu b \max} \cdot e^{\frac{-E_b \Delta H_{\mu}}{W_p}},$$

шорсткості поверхні

$$\Delta Ra_b = \Delta Ra_{b \max} \cdot e^{\frac{-E_b \Delta Ra}{W_p}},$$

суцільності шару

$$\Delta S_b = \Delta S_{b \max} \cdot e^{\frac{-E_b \Delta S}{W_p}}.$$

В результаті експериментальних досліджень (ДОДАТОК Д.3) встановлено, що при синтезі Al+C+V покриттів методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20 та 40 одержані графіки залежності $\ln \Delta h_b$, $\ln \Delta H_{\mu b}$, $\ln \Delta Ra_b$, $\ln \Delta S_b$ від W_p^{-1} відповідно рисунки Д.21-Д.24. Як випливає з графіків, залежності $\ln \Delta h_b$, $\ln \Delta H_{\mu b}$, $\ln \Delta Ra_b$, $\ln \Delta S_b$ від W_p^{-1} прагнуть до прямих ліній.

На підставі проведених досліджень (ДОДАТОК Д.3) отримані зведені данні констант рівнянь прогнозування параметрів якості поверхневих шарів для сталей 20 та 40 (товщини, мікротвердості, шорсткості, суцільності покриття) при синтезі Al+C+V покриттів методом ЕІЛ із застосуванням СТС (табл. 6.9).

На підставі експериментальних досліджень (ДОДАТОК Д.4) встановлено, що при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40 одержані залежності прогнозування якісних параметрів поверхневого шару: товщини шару зниженої мікротвердості

$$\Delta h_{dM} = \Delta h_{dM \max} \cdot e^{\frac{-E_d \Delta h}{W_p}},$$

товщини зміцненого шару

$$\Delta h_{d3} = \Delta h_{d3 \max} \cdot e^{\frac{-E_d \Delta h}{W_p}},$$

мікротвердості шару зниженої мікротвердості

$$\Delta H_{\mu dM} = \Delta H_{\mu dM \max} \cdot e^{\frac{-E_d \Delta H_{\mu}}{W_p}},$$

мікротвердості зміцненого шару

$$\Delta H_{\mu d3} = \Delta H_{\mu d3 \max} \cdot e^{\frac{-E_d \Delta H_{\mu}}{W_p}},$$

шорсткості поверхні

$$\Delta Ra_d = \Delta Ra_{d \max} \cdot e^{\frac{-E_d \Delta Ra}{W_p}},$$

суцільності шару зниженої мікротвердості

$$\Delta S_{dM} = \Delta S_{dM \max} \cdot e^{\frac{-E_d \Delta S}{W_p}},$$

суцільності зміцненого шару

$$\Delta S_{d_3} = \Delta S_{d_3 \max} \cdot e^{\frac{-E_{d\Delta S}}{W_p}} .$$

Одержані графіки залежності $\ln \Delta h_{d_m}$ і $\ln \Delta h_{d_3}$, $\ln \Delta H_{\mu d_m}$ і $\ln \Delta H_{\mu d_3}$, $\ln \Delta S_{d_m}$ і $\ln \Delta S_{d_3}$, $\ln \Delta Ra_d$ від W_p^{-1} відповідно рисунки Д.29-Д.32. Як впливає з графіків, залежності $\ln \Delta h_{d_m}$ і $\ln \Delta h_{d_3}$, $\ln \Delta H_{\mu d_m}$ і $\ln \Delta H_{\mu d_3}$, $\ln \Delta S_{d_m}$ і $\ln \Delta S_{d_3}$, $\ln \Delta Ra_d$ від W_p^{-1} прагнуть до прямих ліній.

На підставі проведених досліджень (ДОДАТОК Д.4) отримані зведені данні констант рівнянь прогнозування параметрів якості поверхневих шарів для сталей 20 та 40 (товщини, мікротвердості, шорсткості, суцільності покриття) при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС (табл. 6.10).

На підставі експериментальних досліджень (ДОДАТОК Д.5) встановлено, що при карбонітруванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20 та 40 одержані залежності прогнозування якісних параметрів поверхневого шару товщини зміцненого шару

$$\Delta h_p = \Delta h_{p \max} \cdot e^{\frac{-E_{p\Delta h}}{W_p}} ,$$

його мікротвердості

$$\Delta H_{\mu p} = \Delta H_{\mu p \max} \cdot e^{\frac{-E_{p\Delta H\mu}}{W_p}} ,$$

шорсткості поверхні

$$\Delta Ra_p = \Delta Ra_{p \max} \cdot e^{\frac{-E_{p\Delta Ra}}{W_p}} ,$$

суцільності шару

$$\Delta S_p = \Delta S_{p \max} \cdot e^{\frac{-E_{p\Delta S}}{W_p}} .$$

Одержані графіки залежності $\ln \Delta h_p$, $\ln \Delta H_{\mu p}$, $\ln \Delta Ra_p$, $\ln \Delta S_p$ від W_p^{-1} відповідно рисунки Д.37-Д.40. Як впливає з графіків, залежності $\ln \Delta h_p$, $\ln \Delta H_{\mu p}$, $\ln \Delta Ra_p$, $\ln \Delta S_p$ від W_p^{-1} прагнуть до прямих ліній.

На підставі проведених досліджень (ДОДАТОК Д.5) отримані зведені данні констант рівнянь прогнозування параметрів якості поверхневих шарів для сталей 20 та 40 (товщини, мікротвердості, шорсткості, суцільності покриття) при карбонітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС (табл. 6.11).

Таким чином:

- виявлені залежності характеристик якості поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ, із застосуванням СТС при синтезі однокомпонентних і багатокомпонентних покриттів від технологічних параметрів процесу, що дозволяє скласти загальні підходи при виборі технології керування якістю цих покриттів та формуванням структури для подальшого технологічного впливу;
- на підставі експериментальних досліджень запропоновані математичні моделі (рівняння товщини, мікротвердості, шорсткості і суцільності поверхневого шару), що дозволяє за енергетичними параметрами визначати основні показники якості сформованого шару: приріст, мікротвердість, шорсткість і суцільність, а, отже, установлювати структуру подальшого технологічного впливу для забезпечення необхідної якості.

6.4. Статистичний та кінетичний аналіз процесу конденсації речовини при ЕІЛ із застосуванням СТС, шляхом побудови фазових портретів

6.4.1. Статистичний аналіз процесу формування алітованих покриттів

Після пробою міжелектродного простору на поверхні електродів розвиваються локальні осередки плавлення і випаровування. Вони викликають електричну ерозію електродів.

Полярний ефект переносу матеріалу анода на катод сприяє утворенню останнього поверхневого шару з певними фізико-хімічними властивостями. Крім того, товщина шару, в якому відбувається основне падіння потенціалу, залежить від довжини екранування λ і коефіцієнта дифузії D [349, 350]. Вони задаються рівностями

$$\lambda^2 = \frac{\varepsilon T_0}{4\pi e^2 N_i}, \quad D = \frac{\sigma T_0}{e^2 N_i}, \quad (6.1)$$

де ε – діелектрична проникність і σ – провідність плазми,

T_0 – її температура, виміряна в енергетичних одиницях,

e – заряд,

N_i – загальна концентрація іонів дифундувальної речовини й інертного газу в системі зберігання.

Зміна концентрації $n = n(t)$ на підкладці описується рівнянням

$$\dot{n} = -n / \tau + E. \quad (6.2)$$

Час зміни концентрації визначається виразом

$$\tau = \lambda^2 / D = \varepsilon / 4\pi\sigma. \quad (6.3)$$

Рівняння (6.2) враховує співвідношення (6.1). У сталому режимі без флуктуацій ($\mu n = 0$) встановлюється така концентрація атомів, при якій відбувається падіння внутрішнього напруження

$$n_0 = -\tau E_0. \quad (6.4)$$

Збільшення атомів на підкладці підвищує її температуру (T) і внутрішнє напруження (E_0). Наведемо самоузгоджені залежності від часу між концентрацією атомів, температурою поверхні $T(t)$ і внутрішнім напруженням

$E(t)$. Рівняння еволюції містять дисипативні вклади цих величин і члени, що представляють додатний і від'ємний зворотний зв'язок, баланс яких забезпечується процесом самоорганізації [351]. Також врахуємо наявність стохастичних джерел, дія яких завжди має місце в експериментальних умовах. Таким чином, в рівнянні (6.2) внесок дисипації – це перший член в правій частині, а другий член дає лінійну залежність між швидкістю зміни концентрації і внутрішнім напруженням. Аналогічно описується зміна температури поверхні:

$$\tau_T \dot{T} = -T + a_T n E + \mu_T \xi. \quad (6.5)$$

τ_T – час релаксації,

$a_T > 0$ – константа зв'язку,

μ_T – амплітуда коливань температури поверхні, яка пов'язана з білим шумом $\xi = \xi(t)$. Відповідає стандартним умовам [352]

$$\begin{aligned} \langle \xi(t) \rangle &= 0, \\ \langle \xi(t) \xi(t') \rangle &= \delta(t - t'). \end{aligned} \quad (6.6)$$

Останній член у (6.5) являє собою нелінійну залежність між концентрацією і напругою, що знижує швидкість зміни температури. Необхідно компенсувати від'ємний зв'язок в виразі (6.7) додатною складовою в рівнянні еволюції напруги для самоорганізації:

$$\tau_E \dot{E} = (E_0 - E) + a_E n T + \mu_E \xi. \quad (6.7)$$

τ_E – час релаксації, $a_E > 0$ – константа зв'язку, що відповідає за зростання потоку через взаємний вплив концентрації атомів і температури поверхні росту, μ_E – амплітуда флуктуацій внутрішнього напруження. Рівняння (6.2), (6.5), (6.7) можуть бути об'єднані в синергетичну систему Лоренца, де концентрація (n) –

параметр порядку, температура поверхні росту (T) – поєднане поле, а напруження (E) – керуючий параметр [353].

Дослідження системи (6.2), (6.5), (6.7) здійснюється в безрозмірному вигляді з використанням характерних масштабів з часом релаксації (6.3), довжиною ($a = (a_T a_E) \cdot 0,25$) і енергією ($\varepsilon = \tau a_E - 1$). Тоді час (t), концентрація (n), температура (T), напруження E і амплітуда їх коливань (μ_T, μ_E) вимірюються в наступних одиницях:

$$\begin{aligned} \tau, a^{-2}, \varepsilon, \tau^{-1} a^{-2}; \\ \tau^{-0,5} \varepsilon, \tau^{-0,5} a^{-2} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Тоді безрозмірна система рівнянь набуває вигляду

$$\dot{n} = -n + E \quad (6.9)$$

$$\eta \dot{T} = -T + nE + \mu_T \xi \quad (6.10)$$

$$\kappa \dot{E} = (E_0 - E) - nT + \mu_E \xi \quad (6.11)$$

де час релаксації

$$\begin{aligned} \eta &\equiv \tau_T / \tau, \\ \kappa &\equiv \tau_E / \tau. \end{aligned} \quad (6.12)$$

У стані рівноваги, коли відсутні флуктуації і часова залежність, рівняння (6.9) дає постійне напруження E_0 . Відповідно, рівність (6.10) приводить до співвідношення $T = n|E|$ і температура ростової поверхні збільшується через взаємне збільшення концентрації атомів і напруження. Нарешті, рівняння (6.11) визначає установлене напруження $E = E_0 - nT$, що зростає через спільне збільшення концентрації атомів і температури. При легуванні зазвичай виконуються умови, які призводять ($\tau_T, \tau_E \ll \tau$) до зміни температури (T) і

напруження (E) після зміни концентрації (n). Тому при вивченні системи (6.9) - (6.11) можна використовувати адіабатичне наближення

$$k, \eta \ll 1, \quad (6.13)$$

де ліві частини в двох рівняннях (6.10) і (6.11) мало відрізняються від нуля. Тоді детерміновані компоненти цих рівнянь призводять до залежностей:

$$\begin{aligned} T &= \frac{E_0 n}{1 + n^2}, \\ E &= \frac{E_0}{1 + n^2}. \end{aligned} \quad (6.14)$$

Якщо взяти до уваги не тільки детерміновану, але і стохастичну складові, то система (6.9) - (6.11) зводиться до рівняння Ланжевена

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial n} + \mu(n)\xi(t), \quad (6.15)$$

де ефективний потенціал набуває вигляду

$$F = n^2 / 2 - E_0 \arctan(n), \quad (6.16)$$

а амплітуда шуму визначається рівністю

$$\mu^2(n) = \frac{\mu^2 E + \mu^2 n^2}{(1 + n^2)^2}. \quad (6.17)$$

Це пов'язано з умовою адитивності дисперсій гауссовських стохастичних джерел [352]. Стохастичне джерело в рівнянні Ланжевена (6.15) призводить до нескінченної кількості розв'язань, розподілених за значеннями випадкової величини (n) з щільністю ймовірності $P = P(n, t)$. Цей розподіл задається рівнянням Фоккера-Планка

$$\frac{\partial P(n,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\partial F}{\partial n} \cdot P(n,t) + \frac{\partial}{\partial n} [\mu^2(n) P(n,t)] \right). \quad (6.18)$$

Його стаціонарне розв'язання має вигляд

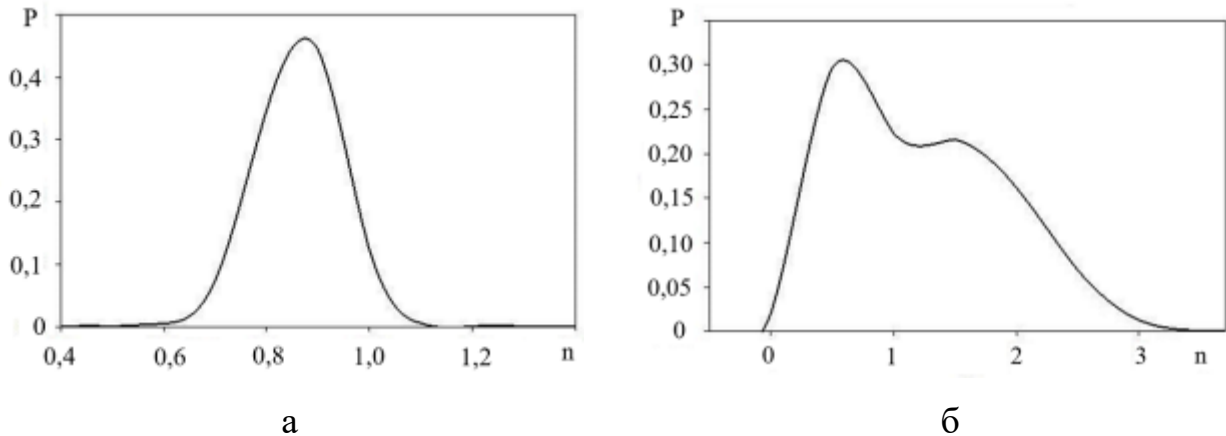
$$P(n) = \left(\frac{Z^{-1}}{\mu^2(n)} \cdot e^{-\int 1/\mu^2(n)} \cdot \frac{\partial F}{\partial n} \right) dn \quad (6.19)$$

з нормувальною постійною Z . Рівняння для знаходження екстремумів функції розподілу (6.19) має вигляд

$$n(1+n^2)^3 - E_0(1+n^2)^2 + 2n(\mu^2(1-n^2) - 2\mu^2) = 0. \quad (6.20)$$

З цього рівняння випливає, що вид розподілу $P(n)$ залежить від внутрішнього напруження E_0 і амплітуди коливань μ_T , μ_E , температури підкладки і внутрішнього напруження. У загальному випадку рівняння (6.20) має сім коренів, але тільки один з них є дійсним числом. Таким чином, флуктуації внутрішніх напружень сприяють трансформації одномодального розподілу концентрації в бімодальне.

На рис. 6.3 показані можливі форми розподілу щільності концентрації при різних умовах легування. Видно, що крім впливу флуктуацій великий вплив чинять внутрішні напруження E_0 . Як видно з рисунка 6.3, а, при невеликих коливаннях спостерігається єдиний чіткий пік розподілу $P(n)$. Це відповідає утворенню єдиного дифузійного шару. Збільшення потужності розряду збільшує не тільки концентрацію, температуру і напруження підкладки, але і їх коливання. Ці коливання призводять до появи ще одного піку в розподілі $P(n)$ (рис. 6.3, б). Цей пік відповідає утворенню не тільки дифузійного шару, а й «білого» шару на сталі.



а) $E_0 = 1,5$, $\mu_T = 0,15$, $\mu_E = 0,15$; б) $E_0 = 1,75$, $\mu_T = 0,15$, $\mu_E = 2,5$

Рисунок 6.3 – Розподіл концентрації

Досліджено процес формування електроіскрових покриттів при різних часах релаксаційної концентрації речовини, внутрішнього напруження і температури (сталева підкладка). Електроіскрове покриття складається з трьох зон. Є «білий» шар, дифузна зона і основний метал. Проведений аналіз дозволяє описати експериментальні дані, згідно з результатами яких, зі збільшенням потужності розряду збільшується товщина і мікротвердість зон покриття. Зі збільшенням енергетичних параметрів процесу ЕІЛ металева поверхня значно нагрівається, дифузійні процеси прискорюються, в покритті утворюються «білі» і дифузійні шари, а в поверхневому шарі виникають напруження. Статистичний аналіз алітування сталі методом електроіскрового легування відкриває унікальні можливості контролю архітектурою покриттів. В результаті ЕІЛ формуються якісні шари. Шари мають необхідні фізичні та механічні властивості. Результати експериментів підтверджені даними статистичного аналізу.

6.4.2. Кінетичний аналіз процесу формування алітованих покриттів

Як зазначалося раніше [354], процес ЕІЛ забезпечується самоузгодженою зміною концентрації атомів n , напруженням E і температурою підкладки T , що

вимірюються за температуру навколишнього середовища. Процес збільшення товщини покриття відбувається за рахунок того, що температура T збільшується через утворення надлишку атомів речовини, що переноситься на підкладку. Це посилює випаровування атомів осаджуємої речовини за рахунок зростання абсолютного значення внутрішнього напруження $E < 0$, що компенсує початкову концентрацію. Рівняння еволюції цих величин містять дисипативні вклади і члени, що представляють додатні і від'ємні зворотні зв'язки, також ми додали білий шум в рівняння для концентрації, що характеризує вплив зовнішніх факторів.

Таким чином, безрозмірна система рівнянь набуває вигляду

$$\begin{cases} \tau \dot{n} = -n + E + \mu_n \xi, \\ \tau_T \dot{T} = -T + nE, \\ \tau_E \dot{E} = (E_0 - E) - nT, \end{cases} \quad (6.21)$$

де вводяться співвідношення часу релаксації

$$\delta \equiv \tau_T / \tau, \quad \sigma \equiv \tau_E / \tau,$$

μ_n – амплітуда білого шуму ξ визначається умовами

$$\xi = \xi(t), \quad \langle \xi(t) \rangle = 0, \quad \langle \xi(t) \xi(t') \rangle = \delta(t - t').$$

Найбільш простим способом дослідження рівнянь досягається методом фазової площини [352, 353]. Оскільки він може використовуватися тільки для аналізу пари диференціальних рівнянь, то далі будемо послідовно припускати, що один з часів релаксації τ , τ_T , τ_E набагато менше двох інших [355, 356].

Швидка релаксація напруження ($\tau_E \ll \tau_n, \tau_T$):

$$\begin{aligned}\tau_n \dot{n} &= E_0 - n(1+T) + \mu_n \xi, \\ \tau_T \dot{T} &= nE_0 - T(1+n^2).\end{aligned}\quad (6.22)$$

Їх розв'язки описуються фазовим портретом, наведеними на рис. 6.4. З нього видно, що при малих значеннях δ , σ , реалізується процес конденсації.

Для з'ясування умов реалізації такого режиму знайдемо значення показника Ляпунова. З цією метою розглянемо окіл особливих точок $n = n_0$, $T = T_0$, для чого припустимо в (6.22)

$$\begin{aligned}n &= n_0 + ae^{\lambda t}, \\ T &= T_0 + be^{\lambda t},\end{aligned}\quad (6.23)$$

де $a, b = 1$.

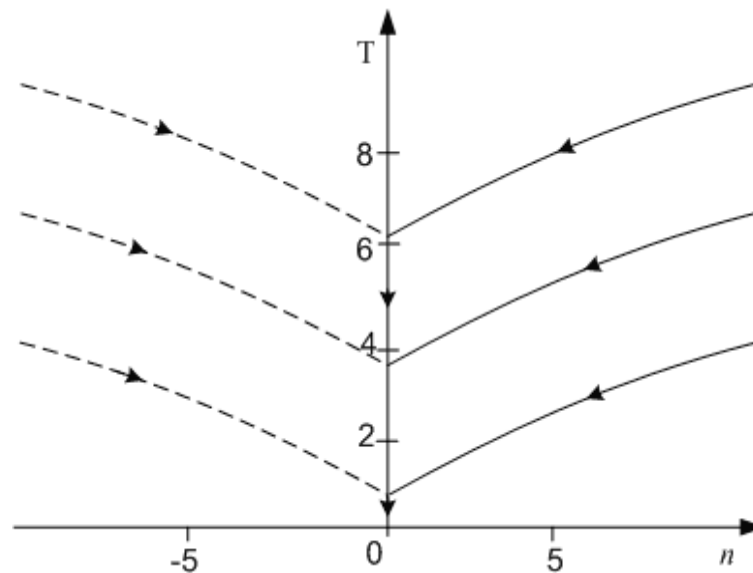


Рисунок 6.4 – Фазові портрети при $(\tau_E \ll \tau_n, \tau_T)$,

$$\tau_T = 0,02, \tau_n = 0,02, E_0 = 0,5, \mu_n = 0$$

Тоді після елементарних вирахувань отримуємо

$$\lambda = \frac{-(\tau_n - n_0^2 \tau_n + \tau_T + \tau_T T_0) \pm \sqrt{\tau_n - n_0^2 \tau_n + \tau_T + \tau_T T_0 - 4\tau_n \tau_T A}}{2\tau_n \tau_T} \quad (6.24)$$

$$\text{де } A = 1 + n_0^2 + T_0 + n_0^2 T_0 - (E_0 + 3n_0^2 E_0 - 2n_0 T_0)(E_0 - n_0)$$

З рисунку 6.4 видно, що з ростом δ область реалізації немонотонного режиму конденсації значно розширюється.

Швидка релаксація концентрації: $(\tau_n \ll \tau_E, \tau_T)$.

Розглянемо тепер випадок, коли концентрація змінюється настільки швидко, що встигає слідувати за змінами температури підкладки та напруження. Тоді можна знехтувати лівою частиною першого уравнення системи (1), і підстановка його у інші рівняння, дає нову систему

$$\begin{aligned} \tau_T \dot{T} &= -T + E^2 + E\mu_n \xi, \\ \tau_U \dot{E} &= E_0 - E(1+T) - T\mu_n \xi. \end{aligned} \quad (6.25)$$

Фазові портрети, наведені на рис. 6.5 показують, що при малих значеннях концентрації температура речовини, що переноситься, зростає від значень, які суттєво менше температури підкладки, до стаціонарних значень.

З рисунку 6.5 видно, що при співвідношенні характерних часів $(\tau_n \ll \tau_E, \tau_T)$ спостерігається немонотонний режим конденсації. Умови його реалізації даються показником Ляпунова

$$\lambda = \frac{-\left(\frac{1}{\tau_n} + \frac{1+T_0}{\tau_T}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{1}{\tau_n} + \frac{1+T_0}{\tau_T}\right)^2 - 4B}}{2} \quad (6.26)$$

$$\text{де } B = \left(\frac{1}{\tau_n} + \frac{1+T_0}{\tau_T}\right) - \frac{(-E + E_0 + \mu_n \xi)(\mu_n \xi - 2E_0)}{\tau_n \tau_T}$$

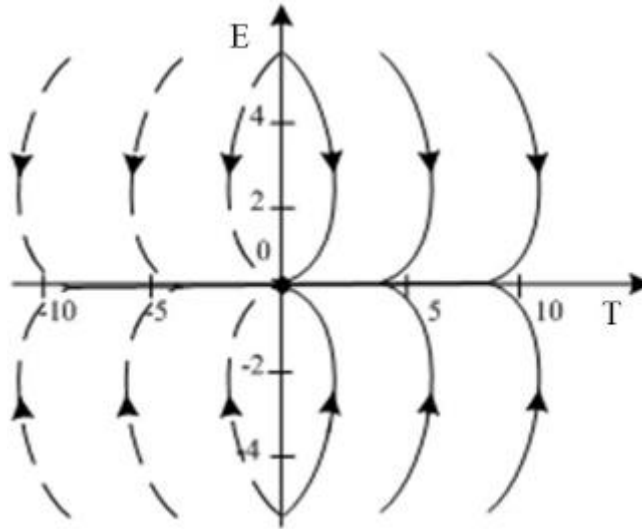


Рисунок 6.5 – Фазові портрети при $(\tau_n \ll \tau_E, \tau_T)$

$$\tau_T = 0,02, \tau_n = 0,02, E_0 = 0,5, \mu_n = 0$$

Таким чином, при різному співвідношенні часів релаксації матеріалу, що переноситься на підкладку, внутрішніх напружень і температури підкладки досліджено кінетику процесу формування шару. Спочатку розглянутий стан температури і концентрації після швидкої релаксації внутрішнього напруження [358]. Цей процес відповідає стійкому положенню на рис.6.4. На фазовому портреті рис. 6.5 є одна точка, що відповідає сталому стаціонарному стану, і характеризує процес дифузії. Таким чином, на кінетику спостережуваного процесу можуть впливати компоненти флуктуацій у рівнянні (6.25).

6.4.3. Кінетичний аналіз процесу формування Al-C-V покриттів

Як зазначалося раніше [233], процес ЕІЛ забезпечується самоузгодженою зміною концентрації атомів n , напруження E і температури підкладки T , що вимірюється за температурою навколишнього середовища. Процес збільшення товщини покриття обумовлене тим, що температура T збільшується за рахунок утворення надлишку атомів речовини, що переноситься. Це посилює

випаровуванням атомів речовини, що перенесеться на підкладку, за рахунок збільшення абсолютного значення внутрішнього напруження $E < 0$, яке компенсує початкову концентрацію. Рівняння еволюції цих величин містять дисипативний внесок і члени, що представляють додатний і від'ємний зворотний зв'язок [234]. Розглянемо систему, що описує даний процес з урахуванням стохастичних джерел, що відображають вплив зовнішніх факторів. Для опису флуктуацій при цьому виберемо білий шум, який являє собою ідеалізовану математичну модель. Тому в даному випадку система диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned}\tau n' &= -n + E + \varepsilon_n \xi, \\ \tau_T T' &= -T + nE + \varepsilon_T \eta, \\ \tau_E E' &= (E_0 - E) - nT,\end{aligned}\tag{6.27}$$

модернізується з урахуванням стохастичних джерел, де ε_n і ε_T представляють амплітуди білого шуму $\xi = \xi(t)$ и $\eta = \eta(t)$, визначеного стандартними умовами

$$\begin{aligned}\langle \eta(t) \rangle &= 0, \langle \eta(t) \eta(t') \rangle = \lambda(t - t'), \\ \langle \xi(t) \rangle &= 0, \langle \xi(t) \xi(t') \rangle = \delta(t - t').\end{aligned}$$

Слід зазначити, що в системі для температури і концентрації розглянуто випадок адитивного шуму. Це пояснюється тим, наприклад, що флуктуації температури залежать тільки від зовнішніх умов.

Ґрунтуючись на методі фазової площини, розглянемо еволюцію системи більш докладно, припускаючи, в свою чергу, що один із ступенів свободи має найвищу швидкість релаксації [233, 357]. Спочатку розглянемо поведінку системи при швидкій релаксації напружень $\tau_E \ll \tau_T = \tau$

$$\begin{aligned}\tau n' &= -n + E_0 - nT + \varepsilon_n \xi, \\ \tau_T T' &= -T + n(E_0 - nT) + \varepsilon_T \eta.\end{aligned}$$

Для визначення умов реалізації такого режиму знайдемо значення λ показника Ляпунова. З цією метою розглянемо окіл особливих точок $n = n_0$, $T = T_0$, для чого приймемо в (6.27)

$$\begin{aligned}n &= n_0 + ae^{\lambda t}, \\ T &= T_0 + be^{\lambda t},\end{aligned}\tag{6.28}$$

де $a, b = 1$. Тоді після перетворень отримуємо

$$\lambda = \frac{-\left(\frac{E_0 + T_0}{\tau} + \frac{1 + n_0^2}{\tau_T}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{E_0 + T_0}{\tau} + \frac{1 + n_0^2}{\tau_T}\right)^2 - 4C}}{2}\tag{6.29}$$

$$\text{де } C = \left(\frac{E_0 + T_0}{\tau} \frac{1 + n_0^2}{\tau_T}\right) + \frac{(E_0 n_0^2 - 2n_0^2 T_0)}{\tau \tau_T}.$$

Швидка релаксація температури: $\tau_T \ll \tau_E = \tau$,

$$\begin{aligned}\tau n' &= -n + E + \varepsilon_n \xi, \\ \tau_E E' &= (E_0 - E) - n(nE + \varepsilon_T \eta).\end{aligned}$$

Знайдемо показники Ляпунова для цього випадку:

$$\lambda = \frac{-\left(\frac{1}{\tau} + \frac{1 + n_0^2}{\tau_E}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{1}{\tau} + \frac{1 + n_0^2}{\tau_E}\right)^2 - 4D}}{2}\tag{6.30}$$

$$\text{де } D = \left(\frac{1}{\tau} \frac{1 + n_0^2}{\tau_E}\right) + \frac{(2E_0 n_0 + \varepsilon_T \eta \tau_E)}{\tau \tau_E}.$$

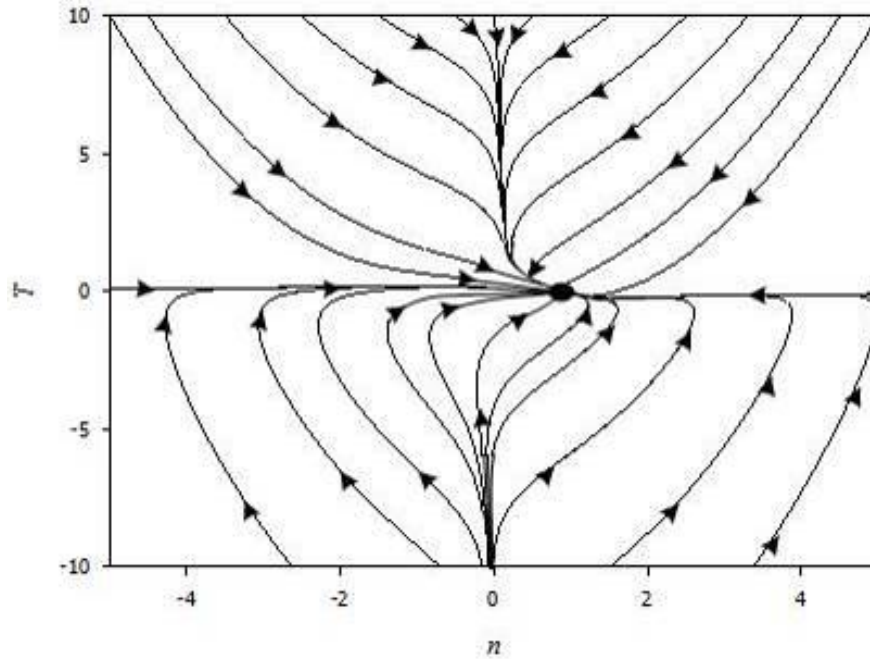


Рисунок 6.6 – Фазові портрети при $\tau_E \ll \tau_T = \tau$, $E_0 = 0.5$, $\tau_T/\tau = 1$,
 $\varepsilon_n = 0.5$, $\xi = 0.1$, $\varepsilon_T = 0.01$, $\eta = 0.05$

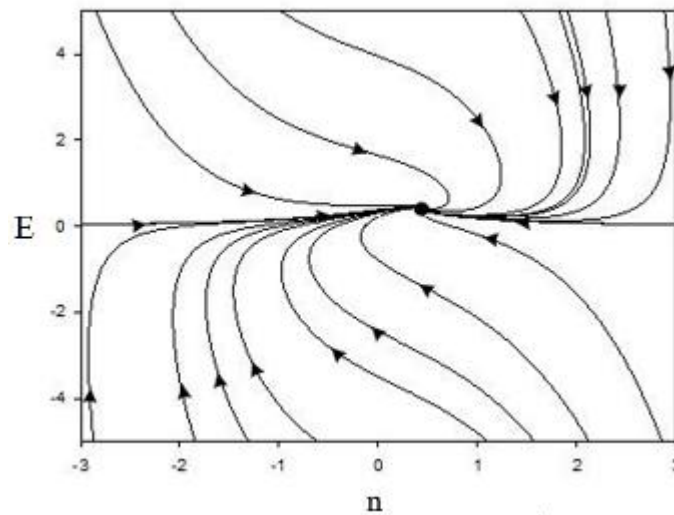


Рисунок 6.7 – Фазові портрети при $\tau_T \ll \tau_E = \tau$, $E_0 = 0.5$, $\tau_E/\tau = 1$,
 $\varepsilon_n = 0.5$, $\xi = 0.1$, $\varepsilon_T = 0.01$, $\eta = 0.05$.

Швидка релаксація концентрації: $\tau \ll \tau_E = \tau_T$

$$\tau_T T' = -T + E(E + \varepsilon_n \xi) + \varepsilon_T \eta,$$

$$\tau_u E' = (E_0 - E) - (E + \varepsilon_n \xi)T.$$

Розрахуємо показники Ляпунова для побудови фазових портретів системи:

$$\lambda = \frac{-\left(\frac{1}{\tau_T} + \frac{1+T_0}{\tau_E}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{1}{\tau_T} + \frac{1+T_0}{\tau_E}\right)^2 - 4F}}{2} \quad (6.31)$$

$$\text{де } F = \left(\frac{1}{\tau_T} \frac{1+T_0}{\tau_E}\right) + \frac{(2E_0 + \varepsilon_n \xi) + (E_0 + \varepsilon_n \xi)}{\tau_T \tau_E}$$

На фазових портретах (рис. 6.6-6.8) можна спостерігати єдину притягувальну частину (вузол), що відповідає сталому стану, і характеризує процес дифузії [351, 359].

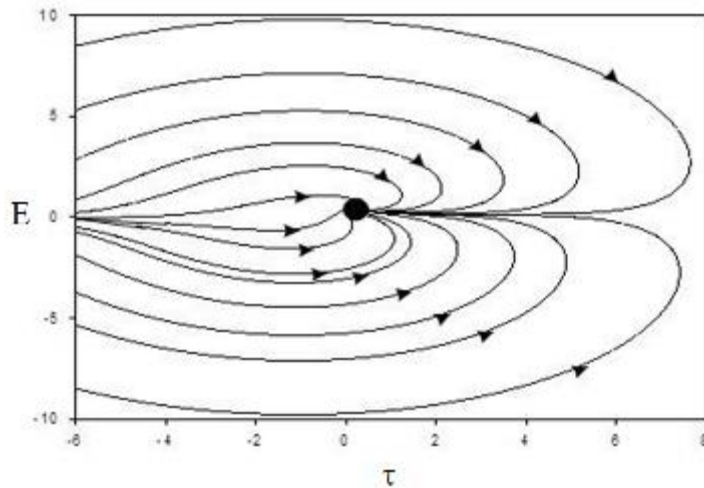


Рисунок 6.8 – Фазові портрети при $\tau \ll \tau_E = \tau_T$ $E_0=0.5$, $\tau_E/\tau_T=1$,
 $\varepsilon_n=0.5$, $\xi=0.1$, $\varepsilon_T=0.01$, $\eta=0.05$.

Таким чином, змодельовані фазові портрети у середовищі Mathcad. При різних співвідношеннях часу релаксації матеріалу, що переноситься при ЕІЛ, внутрішнього напруження та температури підкладки дослідили кінетику процесу формування шару. Розглянуті стани температури та концентрації після швидкої релаксації внутрішнього напруження, поведінка концентрації та напруження при швидкій зміні часу релаксації температури, проаналізована залежність напруги від температури при швидкій зміні часу релаксації концентрації. Показано, що поблизу стаціонарних точок на фазових портретах можна бачити або уповільнення еволюції, або спіральне закручування частки процесу дифузії. Провівши аналіз зображення, можна знаючи межі зміни значень температури чи концентрації атомів на поверхні, керувати процесом отримання покриттів системи Al-C-V методом ЕІЛ.

6.5. Підвищення якості робочих поверхонь деталей ДО

6.5.1. Зміцнення шийок валів

Деталі типу «вал» складають більшу частину номенклатури відновлюваних деталей. У більшості випадків саме ці деталі лімітують ресурс вузлів і агрегатів машин. У деталей типу «вал» найбільш часто дефекти з'являються на шийках підшипників і посадочних поверхнях (диски, напівмуфти, робочі колоса і т.д.).

Основною вимогою, що необхідно виконати при зміцненні валів, є забезпечення розмірів і шорсткості оброблюваних поверхонь, їх твердості, суцільності покриття, міцності зчеплення нанесених шарів з основним металом, а також симетричності, співвісності, радіального і торцевого биття оброблених поверхонь, паралельності бічних поверхонь зубів шліцьових і шпонкових пазів осі валу. Важливою вимогою до технології зміцнення є екологічна безпека і економічність.

Рекомендована технологія зміцнення шийок валів під підшипники ковзання на прикладі валу насоса HDO-11st. Flowserve

Розроблений новий технологічний процес зміцнення шийок валів під підшипники ковзання насоса HDO-11st. Flowserve (ДОДАТОК Е). Робоче середовище насоса: розчин вуглеамонійних солей (K_2CO_3), тиск 168 кгс/см², швидкість обертання 3000 об / хв.

Матеріали, що застосовані для здійснення нового технологічного процесу подані у табл. 6.12.

Технологічний процес зміцнення шийок валів під підшипники ковзання полягає у наступному. Вал встановлюється на токарно-гвинторізному верстаті, діаметри шийок заміряються мікрометром. Далі при необхідності оброблювані поверхні шліфуються до необхідного розміру. Процес легування – цементация (ЦЕЛ) – здійснюється в автоматизованому режимі (рис. 6.9, а). Вібратор кріпиться в різцетримачі, а підведення електрода (графіту марки ЕГ-4), здійснюється механізмами верстата. Вибір режимів зміцнення (частота обертання шпинделя, подача) проводиться, виходячи із заданої продуктивності процесу ЕЛ. ЦЕЛ проводилося з використанням установки «Елітрон-52А».

Таблиця 6.12 – Вихідні матеріали та режими зміцнення валів

Зміцнення	Вихідні матеріали	Режими ЕЛ	Обробка після ЕЛ	Якісні параметри шару після ЕЛ
ЦЕЛ*	СТС (графіт + вазелін), анод – графіт; катод – сталь 14462 ASTM A276 (сталь 03X22H5AM2)	$W_p = 4,6$ Дж, продуктивність $2 \text{ см}^2/\text{хв}$	БУФО	$H_\mu = 11823-7659$ МПа; $h = 130-240$ мкм, $Ra = 0,8$ і 1,6 мкм

* – патент 142822 UA, ДОДАТОК Б.2

Режими (енергію розряду), за яких необхідно здійснювати процес легування знаходять, використовуючи модель прогнозування якості поверхневих шарів, отриманих методом ЦЕІЛ (див. розділ 2, ДОДАТОК Г.2). Згідно вимогам креслення, необхідно сформувати зміцнений шар $h=0,02-0,04$ мм, 700 HV, шорсткість поверхонь $Ra=0,8$ мкм і 1,6 мкм, суцільність шару 100%. Розрахунки показали, що необхідним режимом обробки є енергія розряду 4,6 Дж (табл. 6.12). Однак, використання такого розряду призведе до збільшення шорсткості поверхні, тому після ЕІЛ згідно запропонованої технології цементації з використанням СТС, необхідно оброблювану поверхню піддавати БУФО.

ЦЕІЛ шийок валів під підшипники ковзання виконується поетапно:

- на першому етапі здійснюється ЦЕІЛ поверхонь компактним електродом-інструментом при енергії розряду $W_p = 4,6$ Дж і з продуктивністю $1 \text{ см}^2 / \text{хв}$;
- на другому етапі на сформовану на першому етапі поверхню деталі наноситься СТС, що складалося з порошку графіту і вазеліну, у співвідношенні відповідно 4:1;
- на третьому етапі, не чекаючи висихання СТС, проводиться ЦЕІЛ компактним електродом-інструментом, сформованої на другому етапі поверхні, на тому ж режимі і з такою ж продуктивністю, як на першому етапі.

Після проведення ЦЕІЛ здійснюється візуальний контроль якості отриманого покриття, виконується замір діаметрів шийок мікрометром. Дослідження показали, що їх розмір не змінився.

З метою досягнення необхідних параметрів точності розмірів і зменшення шорсткості оброблених поверхонь проводиться їх обробка БУФО (рис. 6.9, в). Після БУФО проводили контроль шорсткості поверхні. Дослідження показали, що $Ra = 0,8$ і 1,6 мкм і відповідає значенню шорсткості згідно кресленню

(ДОДАТОК Е). Дослідження мікротвердості на зразках свідках показали, що на поверхні $H_{\mu}=11823-7659$ МПа.



а



б



в



г

а – ЦЕІЛ; б – поверхня після ЦЕІЛ; в – БУФО після ЦЕІЛ;

г – деталь після зміцнення

Рисунок 6.9 – Фотографії деталі на етапах технологічного процесу зміцнення шийок валів під підшипники ковзання насоса HDO-11st. Flowserve

Таким чином, застосована технологія ЦЕІЛ із використанням СТС для зміцнення підшипникових шийок валу насоса. Показано, що після обробки

отриманий шар з $H_{\mu}=11823-7659$ МПа і $h=130-240$ мкм. З метою досягнення необхідних параметрів точності розмірів і зменшення шорсткості оброблених поверхонь рекомендується проводити їх обробку БУФО. Після обробки шорсткість шийок валу складає $Ra = 0,8$ і $1,6$ мкм, що відповідає вимогам.

Рекомендована технологія відновлення шийок колінчастих валів під кулькові підшипники на прикладі валу поршневого компресору ВШ-3/40

Запропонований технологічний процес відновлення шийок колінчастого валу під кулькові підшипники поршневого компресору ВШ-3/40. Матеріали, що застосовані для відновлювального процесу подані у табл. 6.13.

Таблиця 6.13 – Вихідні матеріали та режими зміцнення валів

Зміцнення	Вихідні матеріали	Обробка після ЕІЛ	Якісні параметри шару після ЕІЛ
КЕШ С-АІ-Т15К6*	катод – сталь 40Х, анод – алюмінієвий електрод марки СВА99, графітовий електрод-інструмент МПГ-7, твердий сплав Т15К6; енергія розряду 3,4 Дж, установка «Елітрон-52А»	ППД кулькою, нанесення МПМ, армованого ВК6, механічна обробка до необхідних розмірів і шорсткості	$H_{\mu}=10100$ МПа; $h=100$ мкм, $Ra = 1,2$ мкм

* – патент України на корисну №141919, додаток Б.10

Технологічний процес відновлення шийок валів під кулькові підшипники включає підготовку поверхні деталі, нанесення на неї комбінованого електроіскрового покриття, поверхнево-пластичну деформацію (ППД) отриманого покриття і нанесення на нього металополімерного матеріалу (МПМ), перед нанесенням комбінованого електроіскрового покриття поверхню деталі шліфують до $Ra=0,5$ мкм.

При формуванні КЕП спочатку проводять цементацію шліфованої поверхні деталі методом ЕІЛ, після чого виконують алітування цементованого шару алюмінієвим електродом з подальшим нанесенням на нього електроіскрового покриття електродом з твердого сплаву Т15К6, далі поверхню сформованого КЕП піддають ППД методом обкатки кулькою, а після полімеризації МПМ, армованим порошком твердосплавної суміші ВК6, частину шару металополімерного матеріалу видаляють до виступів шорсткості покриття з твердого сплаву Т15К6.

Електроіскрове легування шліфованої поверхні виконується на установці «Елітрон-52А» графітовим електродом МПГ-7 при $W_p=3,4$ Дж, алітування цементованого шару алюмінієвим електродом виконують при $W_p=3,4$ Дж, нанесення ЕІП електродом з твердого сплаву Т15К6 проводять, виконуючи два проходи при $W_p=0,9$ Дж і два проходи при $W_p=3,4$ Дж.

Поверхнево-пластичну деформацію виконують методом обкатки кулькою з питомим зусиллям вигладжування $P=2500$ МПа. Частину шару МПМ видаляють проточуванням до виступів шорсткості покриття з твердого сплаву Т15К6.

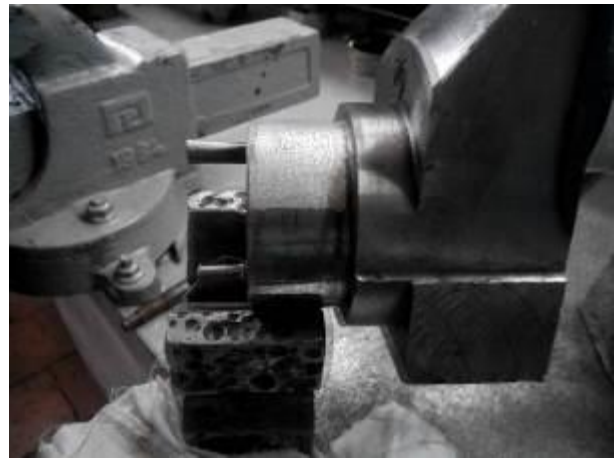
Застосування пропонованого способу відновлення зношених поверхонь шийок колінчастих валів забезпечує кінцеву товщину нанесеного шару до 1500 мкм, збереження мікротвердості 10100 МПа, зниження шорсткості до $Ra=1,2$ мкм і підвищення суцільності зміцненого шару до 100 % (табл. 6.13).

На рисунку 6.10 представлені фото деталі на етапах технологічного процесу відновлення.

Після проведення всіх відновлювальних процесів здійснюється візуальний контроль якості отриманого покриття, виконується замір діаметрів шийок мікрометром. У ДОДАТКУ Ж поданий акт впровадження у виробництво пропонованої технології зміцнення.



а



б



в

а – шийки колінчастого валу до відновлення; б – поверхня після алітування; в – поверхня шийки колінчастого валу після послідовного ЦЕІЛ, алітування ЕІЛ твердим сплавом Т15К6

Рисунок 6.10 – Фотографії деталі на етапах технологічного процесу відновлення шийок валу компресора під кулькові підшипники

Таким чином, застосована технологія відновлення шийок колінчастого валу компресора під кулькові підшипники. Показано, що після відновлення отриманий шар товщиною до 1500 мкм, мікротвердістю 10100 МПа, шорсткістю поверхні до $Ra=1,2$ мкм, що відповідає вимогам.

6.5.2. Зміцнення деталей масляних ущільнень

Рекомендована технологія зміцнення статорних втулок на прикладі насоса 301-Д

Розроблений новий технологічний процес зміцнення статорних втулок насоса 301-Д, виготовлених зі сталі 08X17H13M2T (ДОДАТОК И) включає процес створення Al + C + V покриттів методом ЕІЛ з використанням СТС (табл. 6.14).

Таблиця 6.14 – Вихідні матеріали та режими зміцнення статорних втулок насоса 301-Д

Матеріали та режими ЕІЛ	Обробка після ЕІЛ	Якісні параметри шару після обробки
СТС (вазелін, алюмінієва пудра 56% за масою, порошок аморфного бору 5% за масою), катод – 08X17H13M2T, анод – графітовий стрижень ЕГ-4. Енергія розряду 4,6 Дж	БУФО	$H_{\mu}=12350$ МПа; $h=60$ мкм, $R_a=0,8$ мкм (після БУФО)

Технологічний процес зміцнення статорних втулок полягає у наступному (рис. 6.11). Деталь встановлювалась в патроні токарно-гвинторізного верстату, внутрішній діаметр втулки контролювали нутроміром мікрометричним. Процес легування здійснювався в автоматизованому режимі (рис. 6.11, б). Вібратор кріпився в різцетримачі, а підведення електрода (графітового стрижня), здійснювалося механізмами верстата. Вибір режимів зміцнення (частота обертання шпинделя, подача) проводився, виходячи із заданої продуктивності процесу ЕІЛ. ЕІЛ проводилося з використанням установки «Елітрон-52А».

Внутрішню поверхню статорної втулки обробляли наступним чином. На оброблювану поверхню наносили СТС (вазелін, алюмінієва пудра марки ПАД-0 (ГОСТ 5494-95) 56% за масою, порошок аморфного бору близько 5% за масою).

Не чекаючи висихання СТС, здійснювали ЕІЛ поверхонь графітовим електродом марки ЕГ-4 ОСТ 229-83.



а



б



в

а – втулки; б – ЕІЛ внутрішніх поверхонь графітовим електродом;

в – поверхня після ЕІЛ

Рисунок 6.11 – Фотографії етапів технологічного процесу зміцнення статорних втулок насоса 301-Д

Режими (енергію розряду), при якій необхідно здійснювати процес легування знаходили, використовуючи модель прогнозування якості поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ (див. розділ 2, ДОДАТОК Д.3).

Згідно вимогам креслення, необхідно сформувати зміцнений шар $h=60-70$ мкм, 1200 HV, шорсткість поверхонь $Ra=0,8$ мкм, суцільність шару 100%. Розрахунки показали, що необхідним режимом обробки є енергія розряду 4,6 Дж (табл. 6.13). Однак, використання такого розряду призведе до збільшення шорсткості поверхні, тому після ЕІЛ згідно запропонованої технології з використанням СТС, необхідно оброблювану поверхню піддавати БУФО.

Після проведення кожного етапу ЕІЛ здійснювався візуальний контроль якості отриманого покриття, виконувався замір внутрішніх діаметрів деталі.

З метою досягнення необхідних параметрів точності розмірів і зменшення шорсткості оброблених поверхонь проводилась їх обробка БУФО. Після БУФО проводили контроль шорсткості поверхні. Дослідження показали, що $Ra = 0,8$ мкм і відповідає значенню шорсткості згідно кресленню. У ДОДАТКУ И поданий акт впровадження у виробництво запропонованої технології зміцнення.

Таким чином, застосована технологія синтезу $Al + C + V$ покриттів методом ЕІЛ з використанням СТС для підвищення якості поверхневих шарів статорних втулок насосу. Показано, що після обробки отриманий шар має $H\mu=12350$ МПа; $h=60$ мкм. З метою досягнення необхідних параметрів точності розмірів і зменшення шорсткості оброблених поверхонь рекомендується проводити їх обробку БУФО. Після обробки шорсткість оброблених поверхонь складає $Ra = 0,8$ мкм, що відповідає вимогам.

Зміцнення втулок масляних ущільнень відцентрового компресору

Дві третини всіх відмов компресорів відбуваються унаслідок порушення працездатності ущільнень. Тому одним з найбільш відповідальних вузлів, що забезпечують герметичність компресорного агрегату, його надійну, безпечну й безвідмовну роботу, є вузол ущільнення. Робоча поверхня деталей цього вузла має бути виконана з твердого зносостійкого матеріалу, а її основа – мати достатню пластичність для забезпечення можливості напресування на вал і відповідності вимогам втомної міцності [268].

Традиційно у плаваючих ущільненнях компресорів як матеріал основи захисних втулок застосовується монель-метал (сплав на основі нікелю, що містить 27-38 % міді). Цей сплав має високу корозійну стійкість, досить високу межу міцності та хорошу пластичність у гарячому і холодному станах.

Для збільшення ресурсу роботи втулок на їх робочу поверхню плазмовим напилюванням або вакуумним наплавленням наноситься корозійностійкий і зносостійкий нікелевий сплав «Хастелой», до складу якого входять молібден, хром і ряд інших легувальних елементів.

Нами запропонований новий технологічний процес зміцнення втулок масляних ущільнень відцентрового компресору (рис. 6.12, а), який полягає у їх виготовленні зі сталі 12Х18Н10Т з наступним карбонітруванням методом ЕІЛ із використанням СТС (табл. 6.14). У ДОДАТКУ К подані акти впровадження у виробництво запропонованої технології зміцнення.

Технологічний процес зміцнення втулок полягає у наступному (рис. 6.12). Деталь встановлюють в патроні токарно-гвинторізного верстату, зовнішній діаметр втулки контролюють мікрометром. Процес легування здійснюють в автоматизованому режимі. Вібратор закріплюють в різцетримачі, а підведення електрода (графітового стрижня), здійснюють механізмами верстата. Вибір режимів зміцнення (частота обертання шпинделя, подача) проводять, виходячи із заданої продуктивності процесу ЕІЛ. ЕІЛ проводять з використанням установки «Елітрон-52А» при енергії розряду 3,4 Дж.

Зовнішню поверхню втулки обробляли наступним чином. На оброблювану поверхню наносили СТС (45% сечовини + 45% жовтої кров'яної солі + 10% вазеліну). Не чекаючи висихання СТС, здійснювали ЕІЛ оброблених поверхонь графітовим електродом марки ЕГ-4 ОСТ 229-83.



а



б

Рисунок 6.12 – Зовнішній вигляд захисної втулки вузла ущільнення до (а) і після (б) ЕІЛ

Таблиця 6.14 – Вихідні матеріали та режими обробки втулки масляного ущільнення відцентрового компресору

Матеріали та режими ЕІЛ	Обробка після ЕІЛ	Якісні параметри шару
СТС (45% сечовини + 45% жовтої кров'яної солі + 10% вазеліну), катод – 12X18Н10Т, анод – графітовий електрод-інструмент ЕГ-4, енергія розряду 3,4 Дж	БУФО	$H_{\mu}=10080$ МПа; $h=100$ мкм, $R_a= 0,8$ мкм (після БУФО)

* – патент України на корисну №146373, додаток Б.5

Режими (енергію розряду), при якій необхідно здійснювати процес легування знаходили, використовуючи модель прогнозування якості

поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ (див. розділ 2, ДОДАТОК Д.5). Згідно вимогам креслення, необхідно сформувати зміцнений шар $h=100$ мкм, 1000 HV, шорсткість поверхонь $Ra=0,8$ мкм, суцільність шару 100% . Розрахунки показали, що необхідним режимом обробки є енергія розряду $3,4$ Дж (табл. 6.14). Однак, використання такого розряду призведе до збільшення шорсткості поверхні, тому після ЕІЛ згідно запропонованої технології з використанням СТС, необхідно оброблювану поверхню піддавати БУФО.

Після проведення кожного етапу ЕІЛ здійснювався візуальний контроль якості отриманого покриття, виконувався замір зовнішніх діаметрів деталі.

З метою досягнення необхідних параметрів точності розмірів і зменшення шорсткості оброблених поверхонь проводилась їх обробка БУФО. Після БУФО проводили контроль шорсткості поверхні. Дослідження показали, що шорсткість оброблених поверхонь після БУФО складає $Ra = 0,8$ мкм, що відповідає вимогам (ДОДАТОК К).

Таким чином, застосована технологія карбонітрування методом ЕІЛ з використанням СТС для підвищення якості поверхневих шарів втулок компресору зі сталі 12X18H10T. Показано, що після обробки отриманий шар має $H_{\mu}=10080$ МПа; $h=100$ мкм. З метою досягнення необхідних параметрів точності розмірів і зменшення шорсткості оброблених поверхонь рекомендується проводити їх обробку БУФО. Після обробки шорсткість оброблених поверхонь складає $Ra = 0,8$, що відповідає вимогам.

6.5.3. Зміцнення робочих коліс відцентрового компресору

Складність і велика вартість виготовлення робочих коліс відцентрових компресорів обумовлюють необхідність збільшення ресурсу їх роботи. У більшості випадків робочі колеса виходять з ладу через газоабразивне зношування основи лопаток. Це пов'язано з умовами роботи коліс: атмосферне повітря, що містить абразивні частинки; 100% -ва відносна вологість; тиск на

вході в перше робоче колесо – 0,7 МПа; частота обертання ротора – 10500 об / хв; окружна швидкість – 258 м / с. При зіткненні з вхідною кромкою лопаток колеса, абразивні частинки викрихчують частинки металу з поверхневого шару лопаток, утворюючи каверни, які, розвиваючись з часом, призводять до значного вимивання металу шляхом утворення струмків і прорізів. Відомі випадки, коли робочий диск повністю відрізався від іншої частини колеса, і це приводило до тяжких аварій. Навіть незначне зношування лопатки призводить до втрати продуктивності компресора, а подальше зношування веде за собою його повну зупинку.

Нами запропонований новий спосіб зміцнення лопаток робочих коліс відцентрового компресору, що виготовлені зі сталі 12Х18Н10Т, що полягає у зміцненні основ лопаток методом ЕІЛ, шляхом створення на їх поверхнях комбінованих С-АІ-Т15К6 покриттів (патент на винахід №123025 UA та корисну модель №142338 UA). У таблиці 6.15 подані електродні матеріали, режими ЕІЛ та якісні параметри отриманого шару. У ДОДАТКУ Л поданий акт впровадження у виробництво пропонованої технології зміцнення.

Таблиця 6.15 – Вихідні матеріали та режими обробки лопаток робочих коліс відцентрового компресору

Матеріали та режими ЕІЛ	Обробка після ЕІЛ	Якісні параметри шару
катод – сталь 12Х18Н10Т, анод – алюмінієвий електрод марки СвА99, графітовий електрод-інструмент ЕГ-4, твердий сплав Т15К6; енергія розряду 3,4 Дж, установка «Елітрон-52А»	ЦЕІЛ, енергія розряду 0,9 Дж	Н _μ =11000 МПа; h=340 мкм, Ra= 1,2 мкм

Технологічний процес зміцнення лопаток робочих коліс полягає у наступному (рис. 6.13). Деталь після остаточної механічної обробки піддається

зміцненню – легування основ лопаток здійснюють у такій послідовності (рис. 6.13): ЦЕІЛ при $W_p = 3,4$ Дж з наступним алітуванням алюмінієвим електродом марки СвА99 при $W_p = 3,4$ Дж і ЕІЛ твердим сплавом Т15К6 при $W_p = 3,4$ Дж.



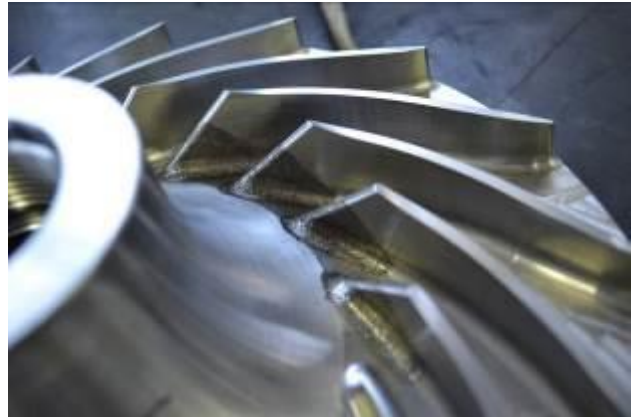
а



б



в



г

а – робоче колесо до обробки; б – ЕІЛ основи лопатки графітовим електродом;

в і г – поверхня основи лопатки робочого колеса після ЕІЛ

Рисунок 6.13 – Фотографії робочого колеса на етапах технологічного процесу зміцнення робочого колеса відцентрового компресору

Режими (енергію розряду), при якій необхідно здійснювати процес легування знаходили, використовуючи модель прогнозування якості

поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ (див. розділ 2, ДОДАТОК Д.5). Розрахунки показали, що необхідним режимом обробки є енергія розряду 3,4 Дж (табл. 6.14). Однак, використання такого розряду призведе до збільшення шорсткості поверхні, тому після ЕІЛ згідно запропонованої технології необхідно леговану поверхню обробляти графітовим електродом-інструментом з енергією розряду 0,9 Дж до досягнення величини шорсткості $R_a = 1,2$ мкм. Після проведення кожного етапу ЕІЛ здійснюється візуальний контроль якості отриманого покриття.

Таким чином, з метою збільшення ресурсу роботи робочих коліс відцентрового компресора застосовано новий спосіб формування на робочих поверхнях комбінованих С-АІ-Т15К6 покриттів, отриманих методом ЕІЛ. Показано, що після обробки основ лопаток коліс, що виготовлені зі сталі 12Х18Н10Т, отриманий шар має $H_{\mu} = 11000$ МПа; $h = 340$ мкм. З метою досягнення необхідних параметрів точності розмірів і зменшення шорсткості оброблених поверхонь рекомендується проводити їх ЦЕІЛ при $W_p = 0,9$ Дж. Після обробки шорсткість оброблених поверхонь складає $R_a = 0,8$, що відповідає вимогам.

6.5.4. Зміцнення вал-шестерні компресорної установки К-104 «ВАВЕТТА»

Деталь вал-шестерня є складною не тільки з позицій форми, геометричних розмірів, технології обробки, а також в питаннях забезпечення необхідних показників якості робочих поверхонь, що можуть відрізнятися і мати свої особливості. Велике значення має правильність геометричних форм посадочних поверхонь, так як кільця деталей, які запресовують на вал з натягом (кулькові та роликові підшипники, втулки, полу муфти і ін.) є тонкостінними деталями і при посадках з натягом деформуються, приймаючи форму посадкового місця. Слід зазначити, що в процесі роботи в місцях посадки деталей як на її внутрішніх

поверхнях, та і на поверхні валу, виникає руйнування в результаті фреттинг корозії (Ф-К).

З метою реалізації способу захисту шийок валів під підшипники ковзання від зношування (поверхня 1 на рис. 6.14) проводили зміцнення поверхні по технології представленої вище в п. 6.5.1 (ЦЕІЛ з наступною обробкою БУФО).

Для з'єднання «уцільнювальна втулка – вал» (поверхня 2 на рис. 6.14) з метою захисту від Ф-К, на контактуючі поверхні деталей сполучення поетапно наносили комплексні електроіскрові покриття (КЕІП), які шляхом запобігання схоплювання поверхонь при терті, поліпшення опору атмосферній корозії, забезпечення твердості і зносостійкості поверхонь деталей, а також збільшення сили тертя в контакті і герметичності сполучення, підвищували надійність та довговічність з'єднання (рис. 6.15).



Рисунок 6.14 – Фото валу-шестерні компресорної установки К-104 «ВАВЕТТА»

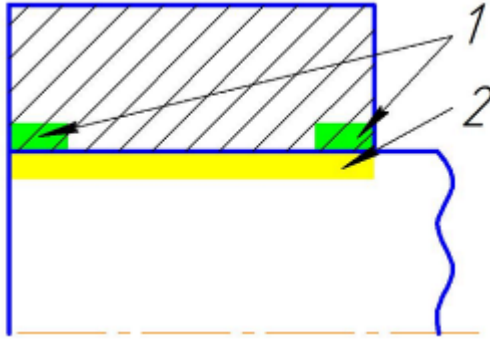


Рисунок 6.15 – Покриття на поверхнях з'єднання
«ущільнювальна втулка – вал»: 1 – КЕІП S-C; 2 – КЕІП Al-C-S

Таблиця 6.16 – Вихідні матеріали та режими обробки вал-шестерні

Поверхня	Матеріали та режими ЕІЛ	Обробка після ЕІЛ	Якісні параметри шару
1	ЦЕІЛ* (СТС (графіт + вазелін), анод – графіт; катод – сталь 36Х2Н2МФА ; $W_p=4,6$ Дж, продуктивність $2 \text{ см}^2/\text{хв.}$)	БУФО	$H_\mu=11823-7659$ МПа; $h=130-240$ мкм, $Ra= 0,8$ мкм
2	Покриття Al-C-S** (СТС (сірчана мазь + алюмінієва пудра марки ПАД-0 + вазелін), анод – графіт; катод – сталь 36Х2Н2МФА; $W_p= 3,4$ Дж, продуктивність $2 \text{ см}^2/\text{хв.}$)		$H_\mu=7580-7650$ МПа; $h=60-70$ мкм, $Ra= 0,8$ мкм

* патенти на корисну модель №141992 UA та 142822 UA, ДОДАТОК Б.2;

** патенти на винахід № 121346 UA і 2707776 RU, ДОДАТОК Б.8;

Легування здійснюють наступним чином. На поверхню 1 вал-шестерні (рис. 6.15) наносять СТС, що містить порошок графіту, не чекаючи висихання СТС, проводять процес ЕІЛ графітовим електродом. На поверхню 2 вал-шестерні (рис. 6.15) перед ЕІЛ графітовим електродом наносять СТС, що містить сірку і алюмінієву пудру, вміст якої становить не більше 56%. Після чого, не чекаючи висихання СТС, проводять процес ЕІЛ графітовим

електродом. При цьому одночасно здійснюють алітування, сульфидування і цементацію. У випадку багаторазового ЕІЛ графітовим електродом, кожен наступний раз знижують енергію розряду, яку застосовують залежно від заданої шорсткості і суцільності одержуваного поверхневого шару.

Енергію розряду при ЕІЛ розраховують, використовуючи модель прогнозування якості поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ (див. розділ 2, ДОДАТОК Г). Розрахунки показали, що необхідним режимом ЦЕІЛ є енергія розряду 4,6 Дж, а формування КЕП Al-C-S – 3,4 Дж (табл. 6.16). Однак, після ЕІЛ відбувається збільшення шорсткості поверхні, тому після ЕІЛ згідно запропонованої технології необхідно оброблювану поверхню піддавати БУФО. У ДОДАТКУ М поданий акт впровадження у виробництво запропонованої технології зміцнення.

Таким чином, з метою збільшення ресурсу роботи деталі «вал-шестірня», що виготовлена зі сталі 36Х2Н2МФА, застосовано нові способи формування на робочих поверхнях покриттів: ЦЕІЛ та КЕП Al-C-S із застосуванням СТС. З метою досягнення необхідних параметрів точності розмірів і зменшення шорсткості оброблених поверхонь рекомендується проводити БУФО. Показано, що після ЦЕІЛ отриманий шар має $H_{\mu}=11823-7659$ МПа, $h=130-240$ мкм, шорсткість поверхні $Ra=0,8$ мкм, після формування КЕП Al-C-S – $H_{\mu}=7580-7650$ МПа; $h=60-70$ мкм, $Ra=0,8$ мкм, що відповідає вимогам.

6.5.5. Зміцнення прес-форми для формування виробів з полімерних композиційних матеріалів

Представлена на рисунках 6.16 і 6.17 прес-форма призначена для отримання заготовки типу втулки з полімерного композитного матеріалу з матрицею фторопласт-4 і різних наповнювачів (вуглеволокно, кокс, графіт і т.д.) компресійним пресуванням.

В процесі роботи матриця 2, втулка 1 і знак 4 прес-форми встановлюється на нижню плиту преса (рис. 6.16). У зазор між матрицею і знаком за допомогою воронки засипається порошкова композиція (приготована суміш фторопласта-4 і вуглеволокна). Для виходу повітря з суміші роблять довільні наколи «душники». Далі встановлюють пуансон 3 і штовхач 5. Тиск пресування передають на суміш верхньою рухомою плитою преса через штовхач і пуансон. Тиск пресування для композиції 600 кг / см^2 . Після закінчення циклу пресування готова заготовка витягується з порожнини матриці за допомогою спеціального пристосування.

У процесі роботи всі деталі прес-форми зазнають статичне навантаження. Міцність прес-форми забезпечується правильним розрахунком перетинів, вибором матеріалу і термічною обробкою.

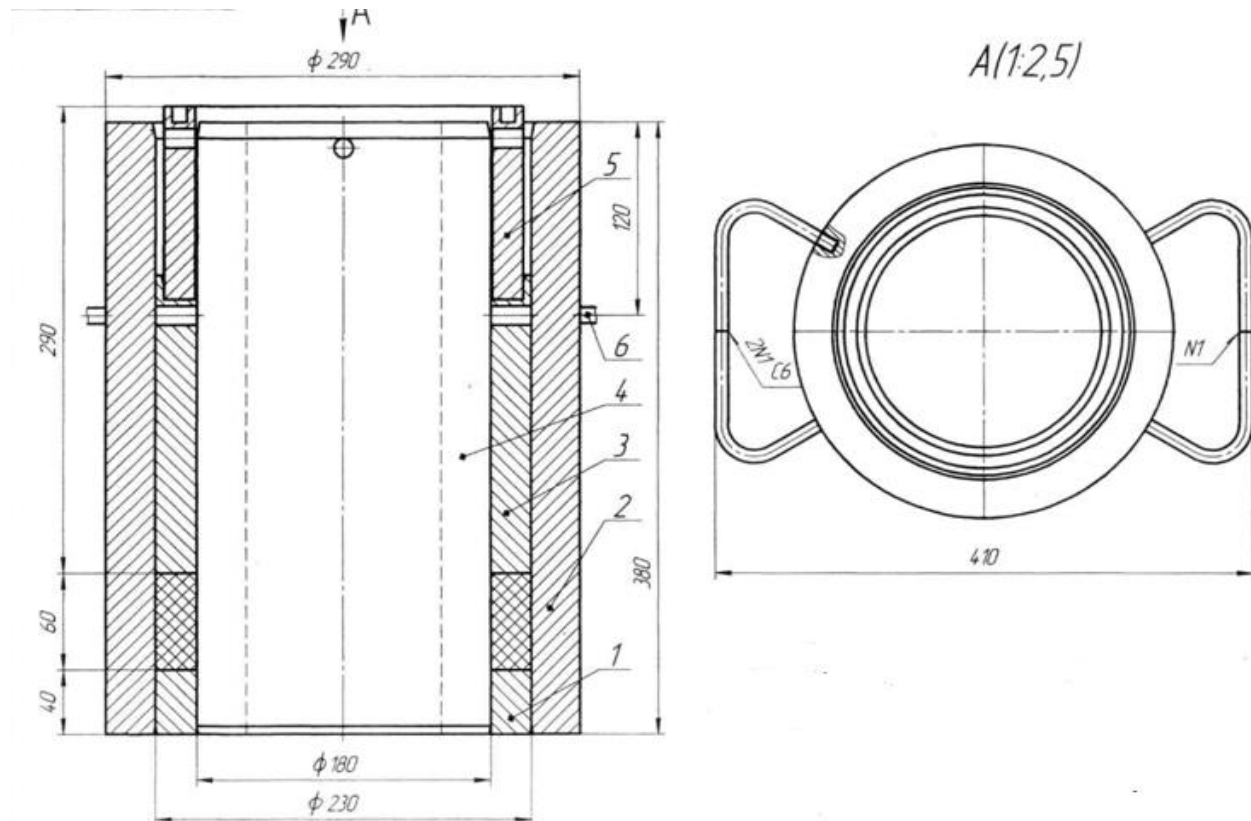


Рисунок 6.16 – Прес-форма в зборі: 1 – втулка, 2 – матриця, 3 – пуансон, 4 – знак, 5 – штовхач, 6 – ручка



а



б

Рисунок 6.17 – Фото прес-форми: а – у розібраному вигляді;
б – у процесі роботи

Найбільш ймовірні причини виходу з ладу прес-форми:

- перевищення розрахункового тиску пресування;
- заклинювання і поломка рухомих частин у наслідок перекосу;
- знос поверхонь прес-форми частинками пресованого матеріалу;
- корозійне руйнування поверхонь в наслідок впливу різних наповнювачів пресованої суміші і вологи.

Деталь пуансон рис. 6.18 вільно переміщається в зазорі між матрицею і знаком і служить для передачі тиску від верхньої плити преса на порошковий матеріал.

У процесі роботи всі поверхні деталі зазнають статичного навантаження, пов'язане з процесом пресування. Зовнішня поверхня $\varnothing 230$ мм і внутрішня

Ø180мм; h-185мм, в процесі роботи «труться» об сполучні поверхні матриці і знаку. Попадання частинок порошку в зазори між сполучними елементами прес-форми призводить до виникнення зносу поверхонь.

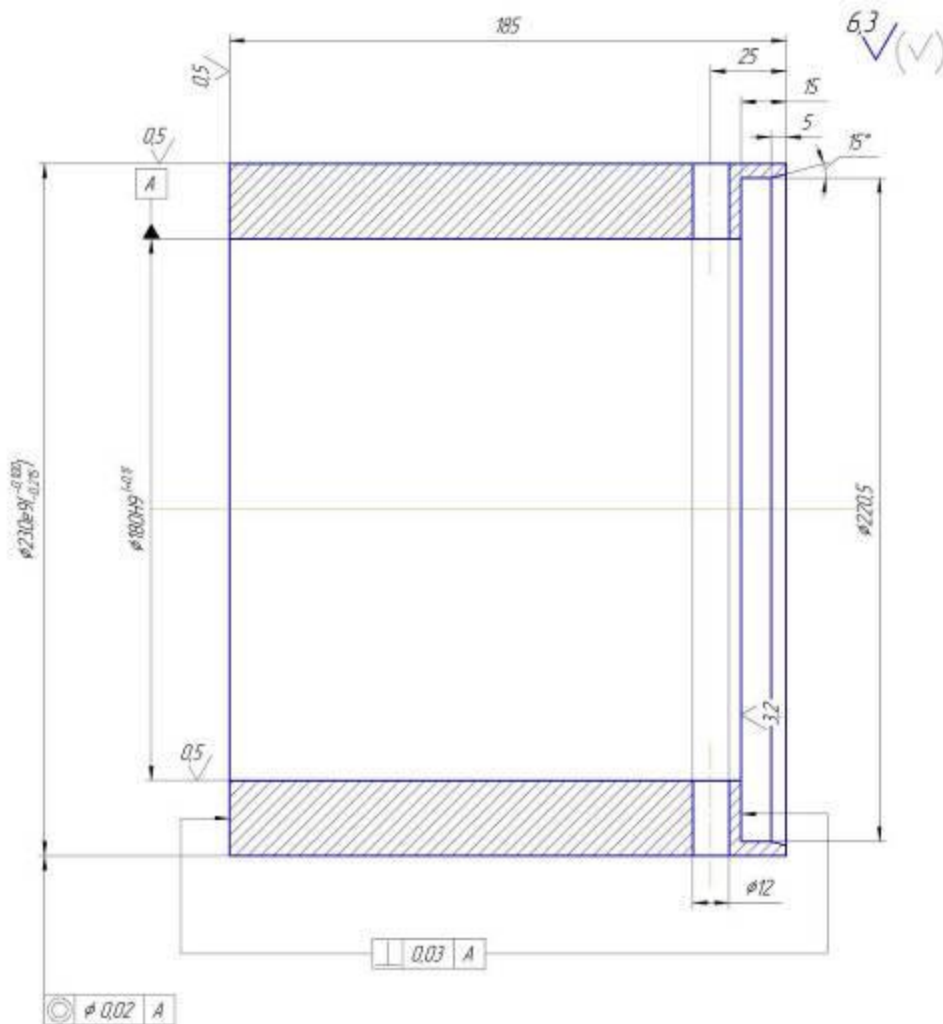


Рисунок 6.18 – Креслення пуансона прес-форми

Нижнє кільце прес-форми безпосередньо взаємодіє з пресованим матеріалом в процесі роботи. Наявність хімічно активних речовин у пресованому матеріалі і волога може викликати різні види корозії поверхонь пуансона.

Запропонований спосіб підвищення зносостійкості поверхонь пуансона прес-форми, що полягає у формуванні КЕП системи Mo-S. Легування

здійснюють наступним чином. На зовнішню поверхню пуансона наносять СТС, що містить сірку, не чекаючи висихання СТС, проводять процес ЕІЛ молібденовим електродом. Енергію розряду при ЕІЛ розраховують, використовуючи модель прогнозування якості поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ (див. ДОДАТОК Д.4). Розрахунки показали, що необхідним режимом формування КЕІП Мо-S є 3,4 Дж (табл. 6.17). Однак, після ЕІЛ відбувається збільшення шорсткості поверхні, тому після ЕІЛ згідно запропонованої технології необхідно оброблювану поверхню піддавати БУФО. У ДОДАТКУ М поданий акт впровадження у виробництво запропонованої технології зміцнення.

Таблиця 6.17 – Вихідні матеріали та режими обробки деталі «пуансон»

Матеріали та режими ЕІЛ	Обробка після ЕІЛ	Якісні параметри шару
СТС (сірчана мазь з додаванням колодної сірки + вазелін), анод – стрижень з молібдену; катод – сталь У10А ; $W_p = 3,4$ Дж, продуктивність 2 см ² /хв.), установка «Елітрон-52А»	БУФО	$H_\mu = 11220$ МПа; $h = 70$ мкм, $R_a = 0,5$ мкм

* патент на корисну модель №144932 UA, ДОДАТОК Б.9




Таким чином, з метою збільшення ресурсу роботи деталі «пуансон» прес-форми, що призначена для отримання заготовки типу втулки з полімерного композитного матеріалу з матрицею фторопласт-4 і різних наповнювачів (вуглеволокно, кокс, графіт і т.д.) компресійним пресуванням, застосовано новий спосіб формування на робочих поверхнях покриттів Мо-S із застосуванням СТС. З метою досягнення необхідних параметрів точності розмірів і зменшення шорсткості оброблених поверхонь рекомендується проводити БУФО. Показано, що після ЕІЛ отриманий шар має $H_\mu = 11220$ МПа; $h = 70$ мкм, $R_a = 0,5$ мкм, що відповідає вимогам.

В табл. 6.18 подані зведені данні впровадження нових способів підвищення працездатності деталей машин.

Таблиця 6.18 – Зведені данні впровадження нових способів зміцнення та відновлення деталей ДО

Деталь	Матеріали та режими ЕІЛ	Якісні параметри шару після ЕІЛ	Впровадження
1	2	3	4
 Вал насоса HDO-11st. Flowserve	ЦЕІЛ СТС: графіт + вазелін; анод – графіт; катод – сталь 14462 ASTM A276 (сталь 03X22H5AM2). $W_p=4,6$ Дж.	$H_\mu=11823-7659$ МПа; $h=130-240$ мкм, $Ra=0,8$ і $1,6$ мкм (після БУФО)	АТ «Сумський завод насосного та енергетичного машинобудування «НАСОСЕНЕРГОМАШ», ТОВ «ТРІЗ», м. Суми
 Колінчастий вал поршневого компресору ВШ-3/40	КЕП С-АІ-Т15К6 катод – сталь 40Х, анод – алюмінієвий електрод марки СВА99, графітовий електрод-інструмент МПГ-7, твердий сплав Т15К6. $W_p=3,4$ Дж.	$H_\mu=10100$ МПа; $h=100$ мкм, $Ra=1,2$ мкм	ТОВ «ТРІЗ»; КП «Міськводоканал», м. Суми
 Статорні втулки насоса 301-Д	КЕП АІ + С + В СТС: вазелін, алюмінієва пудра, порошок аморфного бору; катод – 08X17H13M2T; анод – графіт. $W_p=4,6$ Дж	$H_\mu=12350$ МПа; $h=60$ мкм, $Ra=0,8$ мкм (після БУФО)	ТОВ «ТРІЗ»; АТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання – ІНЖИНІРИНГ», м. Суми
 Втулки масляних ущільнень відцентрового компресору	КЕП С + N СТС: сечовина + жовта кров'яна сіль + вазелін; катод – 12X18H10T, анод – графіт. $W_p=3,4$ Дж	$H_\mu=10080$ МПа; $h=100$ мкм, $Ra=0,8$ мкм (після БУФО)	ТОВ «ТРІЗ»; АТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання – ІНЖИНІРИНГ», м. Суми

Продовження таблиці 6.18

1	2	3	4
 <p>Робоче колесо відцентрового компресору</p>	<p>КЕП С-АІ-Т15К6 катод – сталь 12Х18Н10Т, анод – АІ, графіт, Т15К6. $W_p = 3,4$ Дж.</p>	<p>$H_\mu = 11000$ МПа; $h = 340$ мкм, $Ra = 1,2$ мкм</p>	<p>ТОВ «ТРІЗ»; «ЛІАТ «СУМІХІМПРОМ», м. Суми</p>
 <p>Вал-шестерня компресорної установки К-104 «ВАВЕТТА»</p>	<p>1 - ЦЕЛІ (СТС: графіт + вазелін; анод – графіт; катод – сталь 36Х2Н2МФА; $W_p = 4,6$ Дж. 2 - КЕП АІ-С-С (СТС: сірчана мазь + алюмінієва пудра + вазелін), анод – графіт; катод – сталь 36Х2Н2МФА; $W_p = 3,4$ Дж.</p>	<p>1 - $H_\mu = 11823-7659$ МПа; $h = 130-240$ мкм, $Ra = 0,8$ мкм (після БУФО). 2 - $H_\mu = 7580-7650$ МПа; $h = 60-70$ мкм, $Ra = 0,8$ мкм (після БУФО)</p>	<p>ТОВ «ТРІЗ», м. Суми, КП «Міськводоканал», м. Суми</p>
 <p>Прес-форма для формування виробів з полімерних композиційних матеріалів</p>	<p>КЕП Мо-С СТС: сірчана мазь з додаванням колодної сірки + вазелін, анод – стрижень з моібдену; катод – сталь У10А. $W_p = 3,4$ Дж</p>	<p>$H_\mu = 11220$ МПа; $h = 70$ мкм, $Ra = 0,5$ і (після ДВ)</p>	<p>ТОВ НВП СУМІПЛАСТПОЛІМЕ Р, м. Суми</p>

6.6. Висновки до розділу

1. Результати механічних випробувань зразків з покриттями, отриманими методом ЕІЛ із застосуванням СТС показали, що формування покриттів на підкладках зі сталі 20, 40, 38Х2МЮА, 12Х18Н10Т, 30Х13 супроводжується зниженням меж міцності і текучості, відповідно, на ~ 5 і $\sim 4\%$. При цьому характеристики пластичності (відносне подовження і відносне

звуження) зростають. Застосування методу ЦЕІЛ без додаткової обробки призводить до зменшення міцнісних властивостей на всіх досліджуваних сталях порівняно з не зміцненими на 1-2%. Використання методу БУФО як заключної операції після ЕІЛ, підвищує характеристики міцності, відповідно, для сталі 20 на 10-15%, 40 і 38Х2МЮА – 12-18%, 12Х18Н10Т і 30Х13 – 7 і 10%, відповідно.

2. Порівняльні триботехнічні випробування покриттів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС, показали, що високу зносостійкість мають покриття систем Al + C + B (лінійний знос $\Delta l = 1,1$ мкм на сталі 40), N + C ($\Delta l = 1,2$ мкм на сталі 20), Mo + S ($\Delta l = 1,3$ мкм на сталі 40). Найбільш інтенсивне зношування відбувається на початку процесу, потім знос значно сповільнюється і після ~ 2 годин випробувань стає порівняно незначним і відносно стабільним за величиною.

3. Результати триботехнічних випробувань покриттів показали, що сірка в покритті забезпечує підвищення зносостійкості. Так, на сталі 40 отримано, що лінійний знос зразків з алітованим покриттям складає $\Delta l = 2,5$ мкм, а з сульфоалітованим – $\Delta l = 1,8$ мкм. Матеріал і твердість підкладки також впливає на знос зразків. Так, лінійний знос зразків зі сталі 20 з Al + C + S-покриттям за величиною такий же, як із сталі 40 з алітованим покриттям, і становить $\Delta l = 2,5$ мкм.

4. Використання в якості підкладки легованої сталі забезпечує зниження лінійного зносу. Показано, що всі досліджені покриття, отримані методом ЕІЛ з використанням СТС, забезпечують підвищення зносостійкості сталі 38Х2МЮА і 12Х18Н10Т. Порівняльні випробування покриттів, отриманих методом ХТО (карбонітрація), іонним азотуванням і ЕІЛ з використанням СТС, на сталі 38Х2МЮА показали, що за зносостійкістю карбонітридні покриття, отримані методом ЕІЛ з СТС не поступаються таким, отриманим у солях дифузійним способом. Крім того, покриття Al + C + S зменшують лінійний знос сталі в 1,5 рази порівняно зі станом без покриття. Випробування покриттів,

отриманих різними способами, на сталі 12X18H10T показали, що тверді та зносостійкі покриття $C + Al + Ti_5K_6$ і $N + C$, синтезовані за пропонованими технологіями, заснованими на методі ЕІЛ, забезпечують лінійний знос 1,1 і 1,2 мкм, відповідно .

5. Виявлені залежності характеристик якості поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ, із застосуванням СТС при синтезі однокомпонентних і багатоконпонентних покриттів від технологічних параметрів процесу, що дозволяє скласти загальні підходи при виборі технології керування якістю цих покриттів та формуванням структури для подальшого технологічного впливу.

6. На підставі експериментальних досліджень запропоновані математичні моделі (рівняння товщини, мікротвердості, шорсткості і суцільності поверхневого шару), що дозволяє за енергетичними параметрами визначати основні показники якості сформованого шару: приріст, мікротвердість, шорсткість і суцільність, а, отже, установлювати структуру подальшого технологічного впливу для забезпечення необхідної якості.

7. Проведений статистичний аналіз процесу конденсації речовини при ЕІЛ із застосуванням СТС, шляхом побудови фазових портретів. Досліджено процес формування електроіскрових покриттів при різних часах релаксаційної концентрації речовини, внутрішнього напруження і температури (сталева підкладка). Проведений аналіз дозволяє описати експериментальні дані, згідно з результатами яких, зі збільшенням потужності розряду збільшується товщина і мікротвердість зон покриття. Зі збільшенням енергетичних параметрів процесу ЕІЛ металева поверхня значно нагрівається, дифузійні процеси прискорюються, в покритті утворюються «білі» і дифузійні шари, а в поверхневому шарі виникають напруження. Статистичний аналіз процесу алітування сталі методом ЕІЛ відкриває унікальні можливості контролю архітектурою покриттів. Результати експериментів підтверджені даними статистичного аналізу.

8. Проведений кінетичний аналіз процесу конденсації речовини при ЕІЛ із застосуванням СТС, шляхом побудови фазових портретів при різному співвідношенні часів релаксації матеріалу, що переноситься на підкладку, внутрішніх напружень і температури. На фазовому портреті виділяється одна точка, що відповідає сталому стаціонарному стану, і характеризує процес дифузії при ЕІЛ.

9. Проведений кінетичний аналіз процесу формування Al-C-V покриттів методом ЕІЛ із застосуванням СТС. При різних співвідношеннях часу релаксації матеріалу, що переноситься при ЕІЛ, внутрішнього напруження та температури підкладки дослідили кінетику процесу формування шару. Розглянуті стани температури та концентрації після швидкої релаксації внутрішнього напруження, поведінка концентрації та напруги при швидкій зміні часу релаксації температури, проаналізована залежність напруження від температури при швидкій зміні часу релаксації концентрації. Показано, що поблизу стаціонарних точок на фазових портретах можна бачити або уповільнення еволюції, або спіральне закручування частки процесу дифузії. Провівши аналіз зображення, можна знаючи межі зміни значень температури чи концентрації атомів на поверхні, керувати процесом отримання покриттів системи Al-C-V методом ЕІЛ.

10. Розроблений новий технологічний процес зміцнення валу насоса HDO-11st. Flowserve зі сталі 14462 ASTM A276, який полягає у цементації методом ЕІЛ з використанням СТС, з наступним БУФО. Показано, що після обробки отриманий шар з $H_{\mu}=11823-7659$ МПа і $h=130-240$ мкм. БУФО після ЕІЛ забезпечує зниження шорсткості до $Ra = 0,8$ і $1,6$ мкм, що відповідає вимогам.

11. Запропонований спосіб відновлення відновлення шийок колінчастого валу зі сталі 40X компресора під кулькові підшипники, що полягає у формуванні на робочій поверхні комбінованого електроіскрового покриття,

поверхневої пластичної деформації (ППД) отриманого покриття і нанесення на нього металополімерного матеріалу (МПМ). Показано, що після відновлення отриманий шар товщиною до 1500 мкм, мікротвердістю 10100 МПа, шорсткістю поверхні до $Ra=1,2$ мкм, що відповідає вимогам.

12. Розроблений новий технологічний процес зміцнення статорних втулок насоса 301-Д, виготовлених зі сталі 08X17H13M2T, який полягає у створення на робочих поверхнях Al+C+V покриттів методом ЕІЛ з використанням СТС, з наступним БУФО. Показано, що після обробки поверхневий шар має $H_{\mu}=12350$ МПа, $h=60$ мкм. БУФО після ЕІЛ забезпечує зниження шорсткості до $Ra = 0,8$ мкм.

13. Розроблений новий технологічний процес зміцнення масляних ущільнень відцентрового компресору зі сталі 12X18H10T з наступним карбонітруванням методом ЕІЛ із використанням СТС, з наступним БУФО. Показано, що після ЕІЛ шар має $H_{\mu}=10080$ МПа і $h=100$ мкм. БУФО після ЕІЛ забезпечує зниження шорсткості до $Ra = 0,8$, що відповідає вимогам.

14. З метою збільшення ресурсу роботи робочих коліс відцентрового компресора застосовано новий спосіб формування на робочих поверхнях комбінованих С-Al-T15K6 покриттів, отриманих методом ЕІЛ. Показано, що після обробки основ лопаток коліс, що виготовлені зі сталі 12X18H10T, отриманий шар має $H_{\mu}=11000$ МПа; $h=340$ мкм. З метою досягнення необхідних параметрів точності розмірів і зменшення шорсткості оброблених поверхонь рекомендується проводити їх ЦЕІЛ при $W_p = 0,9$ Дж. Після обробки шорсткість оброблених поверхонь складає $Ra = 0,8$, що відповідає вимогам.

15. Запропоновано новий спосіб збільшення ресурсу роботи деталі «вал-шестірня», що виготовлена зі сталі 36X2H2MФА, шляхом формування на робочих поверхнях покриттів: ЦЕІЛ та КЕІП Al-C-S із застосуванням СТС. З метою досягнення необхідних параметрів точності розмірів і зменшення шорсткості оброблених поверхонь рекомендується проводити БУФО. Показано,

що після ЦЕІЛ отриманий шар має $H_{\mu}=11823-7659$ МПа, $h=130-240$ мкм, шорсткість поверхні $Ra=0,8$ мкм, після формування КЕІП Al-C-S – $H_{\mu}=7580-7650$ МПа; $h=60-70$ мкм, $Ra=0,8$ мкм, що відповідає вимогам.

16. Застосовано нові способи формування покриттів на робочих поверхнях деталі «вал-шестірня», що виготовлена зі сталі 36Х2Н2МФА: ЦЕІЛ та КЕІП Al-C-S із застосуванням СТС. З метою досягнення необхідних параметрів точності розмірів і зменшення шорсткості оброблених поверхонь рекомендується проводити БУФО. Показано, що після ЦЕІЛ отриманий шар має $H_{\mu}=11823-7659$ МПа, $h=130-240$ мкм, шорсткість поверхні $Ra=0,8$ мкм, після формування КЕІП Al-C-S – $H_{\mu}=7580-7650$ МПа; $h=60-70$ мкм, $Ra=0,8$ мкм, що відповідає вимогам.

17. Розроблений новий технологічний процес зміцнення деталі «пуансон» прес-форми, що призначена для отримання заготовки типу втулки з полімерного композитного матеріалу з матрицею фторопласт-4 і різних наповнювачів (вуглеволокно, кокс, графіт і т.д.) компресійним пресуванням, застосовано новий спосіб формування на робочих поверхнях покриттів Mo-S із застосуванням СТС. З метою досягнення необхідних параметрів точності розмірів і зменшення шорсткості оброблених поверхонь рекомендується проводити БУФО. Показано, що після ЕІЛ отриманий шар має $H_{\mu}=11220$ МПа; $h=70$ мкм, $Ra=0,5$ мкм, що відповідає вимогам.

18. За матеріалами розділу опубліковані наступні роботи [24, 140, 149, 254, 255, 259, 264, 268, 287, 290, 291, 292, 293, 294, 296, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 305, 314, 321, 347, 348, 357, 358, 360, 361].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведені нові науково обґрунтовані теоретичні й експериментальні результати, що узагальнюють і забезпечують вирішення актуальної науково-технічної проблеми – підвищення довговічності деталей динамічного обладнання способом керування структурою та властивостями сталених поверхонь завдяки комплексному впливу на основі електроіскрового легування. У результаті виконаної роботи одержані такі основні результати.

1. Аналіз літературних публікацій, патентів, присвячених виявленню тенденцій підвищення якості робочих поверхонь деталей динамічного обладнання засвідчив, що найбільш перспективним напрямком є створення на робочих поверхнях деталей захисних покриттів. Під час вибору методу модифікації поверхні або комбінації з декількох методів необхідно віддавати перевагу економічно вигідним й екологічно безпечним. ЕІЛ широко використовують для цементації, металізації, нанесення твердих зносостійких і м'яких антифрикційних сплавів на поверхню. Доведено, що насичення поверхні одним або одночасно кількома елементами методами ЕІЛ з використанням спеціального технологічного середовища, наношеного на оброблювану поверхню, з подальшим ЕІЛ дозволяє забезпечити комплекс властивостей з отриманням покриттів високої якості.

2. На підставі виконаних досліджень розроблена методологія керування структурним станом сталеної поверхні після оброблення методом ЕІЛ, що дає можливість оцінити вплив структурно-фазового складу матеріалу покриття на його властивості. Узагальнені закономірності впливу чинників (складу електродних матеріалів та СТС, енергетичних і технологічних параметрів оброблення методом ЕІЛ) на структурний стан обробленої поверхні. Їх урахування дозволяє обґрунтовано пропонувати матеріали й склад СТС для забезпечення необхідних властивостей поверхні найбільш економічним способом.

3. Проведений аналіз особливостей структуро- та фазоутворення однокомпонентних шарів, отриманих методом ЕІЛ з використанням СТС: алітуванням, цементациєю, сульфідкуванням, азотуванням. Доведено, що завдяки використанню СТС можна збільшити глибину дифузійного шару, знизити мікротвердість поверхні (сульфідкуванням), зміцнити поверхневий шар (цементациєю, азотуванням, алітуванням), підвищити жаростійкість (алітуванням). Згідно з результатами, енергетичні параметри процесу ЕІЛ впливають на параметри якості отриманих покриттів: змінюють їх шорсткість, мікротвердість, товщину й суцільність. Під час алітування сталей марок 20 і 40 виявлено, що за низьких енергій розряду ($W_p = 0,52$ Дж) формується шар, що складається переважно з α -Fe та оксидів алюмінію. У результаті збільшення W_p шар складається з інтерметалідів заліза й алюмінію, а також вільного алюмінію, що підтверджено даними рентгеноструктурного та локального мікрорентгеноспектрального аналізів. За пропонуваним способом ЦЕІЛ з використанням СТС вдалося збільшити зміцнений шар до 230 мкм і досягти твердості до 10 796 МПа за 100 % суцільності легованого шару. Отримані сульфідні покриття товщиною до 75 мкм. Після сульфідкування з енергією розряду $W_p > 0,55$ Дж для зменшення шорсткості поверхні рекомендовано застосовувати метод БУФО. Досліджений новий спосіб азотування методом ЕІЛ з використанням СТС. Доведено, що отримані шари мають високу мікротвердість (до 9 160 МПа) і товщину шару (до 50 мкм).

4. Проведений аналіз особливостей структуро- й фазоутворення багатокомпонентних шарів, отриманих методами ЕІЛ з використанням СТС: сульфоцементациєю, сульфоалітуванням, покриттям систем Al-C-S та Al-C-B, сульфомолібденуванням і створенням квазібагатошарових покриттів. Виявлено, що комплексні покриття із сіркою складаються з «м'якого» припрацювального й зміцненого шарів. Із підвищенням енергії розряду збільшуються товщина, мікротвердість і суцільність покриттів. Згідно з результатами локального

мікрорентгеноспектрального аналізу наявність у СТС сірки сприяє процесу сульфидування, бору – борування, алюмінію – алітування. Рентгенографічні дослідження показали, що в сульфоалітованих покриттях за всіх досліджуваних енергій розряду в поверхневому шарі утворюється інтерметалід FeAl , зі збільшенням енергії розряду – інтерметалід FeAl_2 . Завдяки введенню аморфного бору в СТС вдалося збільшити твердість покриття до 12 350 МПа на сталі 40 за $W_p = 4,9$ Дж. Результати рентгеноструктурного аналізу Al-C-B-покриттів свідчать про те, що за енергій розряду 0,13 і 0,55 Дж фазовий склад покриттів представлений твердими розчинами ОЦК і ГЦК, а покриття, отримані за $W_p = 4,9$ Дж, характеризуються наявністю, крім твердих розчинів ОЦК та ГЦК зі збільшеними параметрами кристалічної ґратки, інтерметалідів $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ і легованого цементиту $\text{Fe}_3(\text{CB})$. Утворення цих фаз сприяє значному зміцненню й підвищенню мікротвердості поверхнього шару. Металографічні та дюрOMETричні дослідження показали, що сульфомолібденові покриття складаються з чотирьох зон: верхнього пухкого шару з мікротвердістю $H\mu = 1\ 112\text{--}2\ 040$ МПа, «білого» зміцненого шару з $H\mu = 5\ 147\text{--}5\ 474$ МПа для $W_p = 0,13$ Дж і $H\mu = 10\ 596\text{--}10\ 731$ МПа для $W_p = 3,4$ Дж, дифузійної зони й основного металу. Згідно з результатами енергодисперсійного аналізу сірка та молібден концентруються на глибині до 15 і 70 мкм за $W_p = 3,4$ Дж відповідно. Рентгеноструктурний аналіз отриманих покриттів свідчить про те, що в покритті сталі 20 дисульфід молібдену утворюється вже за енергії розряду $W_p = 0,55$ Дж (3,77 %), а за $W_p = 3,4$ Дж його близько 8 % на поверхні й близько 5 % на глибині до 15 мкм.

Поданий аналіз закономірностей формування багат шарових покриттів під час ЕІЛ сталі 12Х18Н10Т. Покриття, сформовані в послідовності ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Т15К6, мають найбільшу зону підвищеної твердості (320–360 мкм) і найменшу шорсткість поверхні (7,5 мкм). Завдяки утворенню 62 % (мас.) TiC та інтерметалідів забезпечується максимальна мікротвердість

поверхневого шару (більша ніж 11 500 МПа). ЕІЛ за описаною технологією дозволяє збільшити дифузійну зону вуглецю й алюмінію, підвищити твердість і товщину зміцненого шару.

5. На підставі експериментальних досліджень запропоновані математичні моделі (рівняння товщини, мікротвердості, шорсткості й суцільності поверхневого шару), що дають можливість прогнозувати за енергетичними параметрами основні показники якості сформованого шару: приріст, мікротвердість, шорсткість і суцільність, а отже, установлювати структуру подальшого технологічного впливу для забезпечення необхідної якості.

6. Проведений статистичний та кінетичний аналізи процесу конденсації речовини під час ЕІЛ з використанням СТС способом побудови фазових портретів. Досліджено процес формування електроіскрових покриттів за різного часу релаксаційної концентрації речовини, внутрішнього напруження й температури (сталеві підкладки). Проведений аналіз дозволяє описати експериментальні дані, згідно з результатами яких із підвищенням потужності розряду збільшуються товщина та мікротвердість зон покриття.

7. Проведені порівняльні триботехнічні випробування покриттів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС. Доведено, що сірка в покритті забезпечує підвищення зносостійкості. Усі досліджені покриття, отримані методом ЕІЛ з використанням СТС, підвищують зносостійкість сталей 38Х2МЮА й 12Х18Н10Т. Згідно з результатами порівняльних випробувань покриттів, отриманих методом ХТО (карбонітрацією), іонним азотуванням та ЕІЛ з використанням СТС, на сталі 38Х2МЮА за зносостійкістю карбонітридні покриття, отримані методом ЕІЛ із СТС, не поступаються отриманим у солях дифузійним способом.

8. Розроблені наукові принципи практичної реалізації енергоефективних та екологічно безпечних технологій одержання функціональних покриттів, що

ґрунтуються на методі ЕІЛ з використанням СТС, в поєднанні з іншими методами підвищення якості поверхневих шарів деталей (ППД, БУФО та ін.), і на їх підставі впроваджені у виробництво нові, захищені 34 патентами технології із загальним економічним ефектом 1 млн 171 тис. грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Диагностика горных машин и оборудования : учебное пособие / Б. Л. Герике, Г. И. Козовой, В. С. Квагинидзе и др. Москва, 2012. 400 с.
2. Тарельник В. Б., Марцинковський В. С. Модернізація та ремонт роторних машин : монографія. Суми : Вид-во «Козацький вал», 2005. 364 с.
3. Сидоров К. С. Обзор материалов, используемых для защиты рабочих поверхностей горных машин от износа. *ГИАБ*. 2015. № 8. С. 389-395.
4. Фёдоров С. К., Иванова Ю. С., Лашуков М. А., Мехия Рамос Б. Х. Электромеханическое восстановление посадочных поверхностей валов под подшипники качения. *Вестник ФГОУ ВО МГАУ*. 2019. № 4 (92). С. 29-34.
5. Ерохин М. Н., Манаенков А. П. Восстановление фреттинг-изношенных поверхностей подшипниковых узлов композиционными покрытиями. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 1995. № 10. С. 28.
6. Гаджиев А. А. Технологическое обеспечение долговечности подшипниковых узлов машин применением полимерных материалов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.03. Москва : МГАУ имени В. П. Горячкина, 2006. 36 с.
7. Кононенко А. С., Кузнецов И. А. Восстановление посадочных мест под подшипники качения в корпусных деталях машин полимерными нанокompозитами. *Труды ГОСНИТИ*. 2016. Т. 124, № 2. С. 81–85.
8. Ракин Я. Ф. Эксплуатация подшипниковых узлов машин. Москва : Росагропромиздат, 1990. 191 с.
9. Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. I. Features of Formation of the Combined Electroerosive Coatings on Special Steels and Alloys / V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko et al. *Metallofiz. Noveishie*

Tekhnol. 2019. Vol. 41, No. 1. P. 47–69. URL: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.01.0047>.

10. Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. II. The Analysis of a Stressedly-Deformed State of Surface Layer after a Surface Plastic Deformation of Electroerosive Coatings / V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 2. P. 173–192. URL: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.02.0173>.

11. Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. III. The Influence of the Main Technological Parameters on Microgeometry, Structure and Properties of Electrolytic Erosion Coatings / V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 3. P. 313–335. URL: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.03.0313>.

12. Тарельник В. Б. Управление качеством поверхностных слоев деталей комбинированным электроэрозионным легированием. Сумы : Изд-во «МакДен», 2002. 323 с.

13. Верхотуров А. Д., Подчерняева И. А., Иванов В. И., Коневцов Л. А. К вопросу создания нового научного направления в области электроэрозионной обработки – электродного материаловедения. *Электронная обработка материалов.* 2010. № 5. С. 145–155.

14. Тарельник В. Б., Гапонова О. П. Підвищення експлуатаційних характеристик і екологічної безпеки деталей машин та інструменту електроіскровим легуванням. *Компрессорное и энергетическое машиностроение.* 2019. № 1 (55). С. 2–7.

15. Абдурашитов С. А., Тупиченков А. А., Вершинин И. М., Тененгольц С. М. Насосы и компрессоры. Москва : Недра, 1974. 296 с.

16. Скоробогатов В. К., Веселов С. А. Повышение долговечности и надежности деталей промышленных центробежных насосов с помощью напыления. *Новые материалы и технологии в машиностроении – 2005* : IV Международная научно-техническая конференция, 10 октября – 10 ноября 2005 г.

17. Effect of Laser Processing on the Qualitative Parameters of Protective Abrasion-Resistant Coatings / V. B. Tarel'nyk, Ye. V. Konoplianchenko, O. P. Gaponova et al. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00127-8>.

18. Спосіб відновлення зношених поверхонь деталей машин з нержавіючої сталі : пат. 131805 України на корисну модель, МПК (2018.01) В23Н 5/02 (2006.01), В23Р 6/00, С23С 28/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Конопляченко Є. В., Тарельник Н. В., Павлов О. Г., Саржанов Б. О., Антошевський Б. ; заявл. 12.09.2018 ; опубл. 25.01.2019, Бюл. № 2. 21 с.

19. Тарельник В. Б., Марцинковский В. С., Антошевский Б. Повышение качества подшипников скольжения : монография. Сумы : Издательство «МакДен», 2006. 160 с.

20. Тарельник В. Б., Марцинковский В. С., Братуцак М. П., Антошевский Б. Разработка технологии защиты поверхностей деталей прессовых посадок от фреттинг-коррозии. *ГЕРВИКОН-2011* : XIII Международная научно-техническая конференция. *НАСОСЫ-2011* : Международный форум. *ЭККОН-11* : семинар, г. Сумы, Украина, 6–9 сентября 2011, СумГУ. Сумы, 2011. С. 1–20. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/324276915.pdf>.

21. Definition of criteria for estimating alternative technologies of increasing quality of rotor shaft neck by electroerosive alloying and surface plastic deformation methods / V. Martsynkovskyy, G. Kirik, V. Tarel'nyk et al. *IOP Conference Series* :

materials Science and Engineering «HERVICON+PUMPS 2017» (Sumy, Sumy State University, Ukraine, 5–8 September 2017). 2017. Vol. 233, Issue 1. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/233/1/012051>.

22. Муфты упругие. URL: <http://triz-ltd.com/produksiya/mufty-uprugie/>.

23. Путро Е. В., Юрко В. И. Муфты упругие с пакетами кольцевых металлических мембран типа МСК. *Герметичність, вібронадійність і екологічна безпека насосного і компресорного обладнання. «ГЕРВІКОН+НАСОСИ-2017»* : збірник доповідей учасників XV Міжнародної науково-технічної конференції. Суми : Триторія, 2017. С. 34–41.

24. Improvement in Babbit Sliding Bearing Quality with Electrospark Alloying / V. B. Tarelnik, V. S. Martsinkovskii, E. V. Konoplyanchenko, A. V. Belous, O. P. Gaponova. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2018. Vol. 54, Issue 7–8. P. 598–604. URL: <https://doi.org/10.1007/s10556-018-0521-0>.

25. Development of High Speed High Performance Compressor / K. Katayama, N. Nojima, T. Mitsubishi et al. *Mitsubishi Technical Review*. 1987. Vol. 24, No. 2. P. 75–86.

26. Максимов В. А., Поспелов Г. А., Шнепп В. Б., Хадиев М. Б. Плавающие уплотнения валов высокоскоростных центробежных компрессорных машин. *Обзорная информация. Серия ХМ5*. Москва : Цинтихимнефтемаш, 1977. 52 с.

27. Воронков Б. Д., Виноградов Ю. М., Лазарев Г. Е., Михалин В. М. Износостойкие материалы в химическом машиностроении : справочник / под ред. Ю. М. Виноградова. Ленинград : Машиностроение, 1977. 256 с.

28. Современные технологии модификации поверхности материалов и нанесения защитных покрытий : в 3 т. / АО «Машиностроит. конструкт. бюро «Искра» им. И. И. Картукова» (г. Москва) [и др.]. Санкт-Петербург : Реноме, 2017.

29. Ющенко К. А., Борисов Ю. С., Кузнецов В. Д., Корж В. М. Инженерія поверхні : підруч. / НАН України. Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона. Київ : Наук. думка, 2007. 559 с.
30. Тамаркин М. А., Тищенко Э. Э., Лебеденко В. Г. Исследование параметров качества поверхностного слоя при обработке дробью. *Вестник машиностроения*. 2010. № 2. С. 51–54.
31. Матлин М. М., Лебский С. Л., Бабаков А. В. Определение глубины пластически деформированного слоя при упрочняющей обкатке деталей цилиндрическими роликами. *Вестник машиностроения*. 2002. № 10. С. 53–55.
32. Лихобабина Н. В., Королев А. А. Упрочнение поверхностей алмазным выглаживанием. *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2008. Т. 1, № 1 (30). С. 17–24.
33. Ворошнин Л. Г., Менделеева О. Л., Сметкин В. А. Теория и технология химико-термической обработки : учебное пособие. Минск : Новое знание, 2010. 304 с.
34. Зинченко В. М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки / Московский гос. технический ун-т им. Н. Э. Баумана. Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 302 с.
35. Довгань Л. В. Анализ технологий вакуумной и атмосферной химико-термической обработки металлов. *Металлургия машиностроения*. 2008. № 1. С. 29–33.
36. Корягин Ю. Д., Филатов В. И. Индукционная закалка сталей : учебное пособие. Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2006. 52 с.
37. Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н. Методы поверхностной лазерной обработки. Книга 3. Методы поверхностной лазерной обработки : учебное пособие. Москва : Высшая школа, 1987. 191 с.

38. Способ поверхностной электроконтактной закалки деталей : пат. на изобретение RU 2153007 C21D1/06, C21D1/40 / Поляченко А. В., Евсеенко В. В. ; заявл. 18.02.1999 ; опуб. 20.07.2000. 4 с.

39. Structure of high-carbon steel after welding with rapid cooling / Yu. Kalinin, M. Brykov, I. Petryshynets et. al. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2019. Vol. 25. No. 2. P. 114–122.

40. Структура, свойства и получение твердых нанокристаллических покрытий, осаждаемых несколькими способами / В. М. Береснев, А. Д. Погребняк, Н. А. Азаренков и др. *Успехи физ. мет.* 2007. Т. 8. С. 171–246.

41. Pogrebnjak O. D., Dyadyura K. O., Gaponova O. P. Features of thermodynamic processes on contact surfaces of multicomponent nanocomposite coatings with hierarchical and adaptive behaviour. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2015. Vol. 37, No. 7. P. 899–919. DOI: 10.15407/mfint.37.07.0899.

42. The cathodic electrolytic plasma hardening of the 20Cr2Ni4A chromium-nickel steel / B. K. Rakhadilov, V. V. Buranich, Z. A. Satbayeva et al. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9, Issue 4. P. 6969–6976.

43. Возненко В. В. Поліпшення експлуатаційних характеристик деталей приводів шляхом формування функціональних поверхонь з дискретно орієнтованою топографією : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.03.07 «Процеси фізико-технічної обробки». Київ : НУТУ КПІ, 2006. 20 с.

44. Ляшенко Б. А., Розенберг О. А., Ермолаев В. В., Мирненко В. И. Восстановление деталей машин дифференциальными покрытиями дискретной структуры. *Тяжелое машиностроение*. 2001. № 2. С. 21–23.

45. Триботехническое материаловедение и триботехнология : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Н. Е. Денисова, В. А. Шорин, И. Н. Гонтарь и др. ; под общ. ред. Н. Е. Денисовой. 1-е изд. Пенза : Изд-во Пензинского государственного университета, 2006. 349 с.

46. Скобло Т. С., Ридный Р. В. Влияние алмазного выглаживания на шероховатость поверхности деталей, восстановленных наплавкой и подвергнутых упрочняющему точению. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2013. Вип. 133. С. 180–185.

47. Погребняк А. Д., Базыль Е. А., Свириденко Н. В. Влияние облучения электронными и ионными пучками на физико-механические свойства титановых сплавов. *Успехи физ. мет.* 2004. Т. 5. С. 257–281.

48. Обработка ППД поверхности покрытий, нанесенных методом ЭИО / Т. С. Скобло, А. И. Сидашенко, А. А. Науменко и др. *Труды 8-й Международной научно-технической конференции*, г. Харьков, 9–10 декабря 2003 г. Харьков, 2003. С. 169–172.

49. Повышение качества покрытий нанесенных электроискровым методом / Т. С. Скобло, А. Д. Мартыненко, А. В. Харьяков и др. *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства*. Харків, 2004. Вип. 23: Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні. С. 191–196.

50. Термоциклическое и химико-термоциклическое упрочнение сталей / А. М. Гурьев, Л. Г. Ворошнин, Ю. П. Хараев и др. *Ползуновский вестник*. 2005. № 2-2. С. 36–43.

51. Способ термоциклической цементации стальных изделий : пат. на изобретение RU 1663043 / Харитонов А. Н., Симочкин В. В., Татаринцев В. А., Бондарев А. И. № 4676972/02 от 11.04.1989.

52. Чейлях А. П., Караваева Н. Е. Влияние высокотемпературной термоциклической обработки на структуру и свойства цементованной стали 20ГЛ. *Наукові нотатки*. 2015. № 50. С. 238–243.

53. Способ ионного азотирования в скрещенных электрических и магнитных полях : пат. на изобретение RU 2711067 C1, 15.01.2020 / Вафин Р. К., Асылбаев А. В., Николаев А. А. № 2019103185 от 05.02.2019.

54. Будилов В. В., Рамазанов К. Н., Вафин Р. К., Хусаинов Ю. Г. Азотирование инструментальной стали Р6М5 в тлеющем разряде в скрещенных электрических и магнитных полях. *Физика и химия обработки материалов*. 2013. № 6. С. 54–59.

55. Приходько В. М., Симонов Д. С., Дмитриев Т. Д., Кеблани Л. Я. Комбинирование методов химико-термической обработки с ультразвуком. *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2019. № 1 (56). С. 49–54.

56. Нечаев Л. М., Фомичева Н. Б., Канунникова И. Ю., Маркова Е. В. Влияние ультразвуковой обработки на физико-механические свойства борированного слоя. *Современные наукоемкие технологии*. 2008. № 9. С. 3.

57. Козечко В. А. Интенсификация химико-термической обработки конструкционных сталей с помощью ударных волн. *Молодий вчений*. 2015. № 1-1 (16). С. 16–19.

58. Козечко В. А. Интенсификация химико-термической обработки конструкционных сталей с помощью ударных волн. *Вестник БГУ. Серия 1 «Физика. Математика. Информатика»*. 2015. № 3. С. 62–66.

59. Панов Б. Ю., Гапонова О. П. Влияние предварительной холодной пластической деформации на диффузию углерода стали 20. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма IV Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції (м. Суми, 19–22 квітня 2016 р.) : у 2 ч. / редкол.: О. Г. Гусак, В. Г. Євтухов. Суми : СумДУ, 2016. Ч. 1. С. 85.

60. Гурьев А. М., Лыгденов Б. Д., Власова О. А. Интенсификация процессов химико-термической обработки металлов и сплавов. *Фундаментальные исследования*. 2008. № 8. С. 48–50.

61. Дашкевич В. Г. Методы активации поверхностных слоев для термодиффузионного азотирования. *Металлургия* : республиканский

межведомственный сборник научных трудов. Минск : БНТУ, 2017. Вып. 38. С. 146–152.

62. Харламов Ю. О., Ульяницький В. Н., Петров П. О., Шпаков В. А. Нанесення відновлюючих та зміцнюючих покриттів на робочі поверхні деталей: навчальний посібник. Алчевськ : Донбаський державний технічний університет, 2011. 413 с.

63. Microstructure and properties of heat affected zone in high-carbon steel after welding with fast cooling in water / M. Brykov, I. Petryshynets, M. Džupon et al. *Materials*. 2020. Vol. 13. No. 22. P. 1–13.

64. Рябцев И. А., Кондратьев И. А. Механизированная электродуговая наплавка деталей металлургического оборудования. Киев : Экотехнология, 1999. 64 с.

65. Уманский А. П., Стороженко М. С., Акопян В. В., Марценюк И. С. Электроискровое упрочнение стали композиционными материалами системы TiB_2 -(Fe-Mo). *Авиационно-космическая техника и технология*. 2012. № 9 (96). С. 214–218.

66. Стороженко М. С., Уманский О. П., Тамаргазин О. А. Підвищення зносостійкості сталі 30ХГСА електроіскровим легуванням композитами на основі TiB_2 -SiC. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2010. № 4 (71). С. 21–25.

67. Особливості отримання композиційних порошкових матеріалів та покриттів з них / О. П. Уманський, В. Л. Сироватка, М. С. Стороженко та ін. *Порошкова металургія*. 2019. № 05/06. С. 137–143.

68. Electric-spark coatings on a steel base and contact surface for optimizing the working characteristics of babbitt friction bearings / V. B. Tarelnik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko et al. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2017. Vol. 53, Issue 3. P. 285–294.

69. Electrode Materials for Composite and Multilayer Electrospark-Deposited Coatings from Ni-Cr and WC-Co Alloys and Metals / V. B. Tarelnyk, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko et al. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2017. 1 January. Vol. 55, Issue 9–10. P. 585–595.

70. Tarelnik V. B., Martsinkovskii V. S., Zhukov A. N. Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse Seals. Part 2. *Chemical Petroleum Engineering*. 2017, July. Vol. 53, Issue 3–4. P. 266–272. URL: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0333-7>.

71. Tarelnik V. B., Martsinkovskii V. S., Zhukov A. N. Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse End Seals. Part 1. *Chemical Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53, Issue 1–2. P. 114–120. URL: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0305-y>.

72. Tarelnik V. B., Martsinkovskii V. S., Zhukov A. N. Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse Seals. Part 3. *Chemical Petroleum Engineering*. 2017, September. Vol. 53, Issue 5–6. P. 385–389. URL: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0351-5>.

73. Ivanov V. I., Konevtsov L. A., Verkhoturov A. D. Effect of the physicochemical properties of refractory compounds and hard alloys on their erosion in electric spark alloying. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2019. T. 55, № 3. С. 241–250.

74. Иванов В. И., Верхотуров А. Д., Коневцов Л. А. Методологические аспекты применения электроискрового легирования. Часть 1: Методология исследования упрочнения и восстановления деталей, получения электроискровых покрытий. *Технический сервис машин*. 2019. № 2 (135). С. 158–169.

75. Иванов В. И., Верхотуров А. Д., Коневцов Л. А. О методологии упрочнения и восстановления исполнительных поверхностей деталей машин, повышении эффективности и критериях оценки при ЭИЛ. Часть 1: Методология

исследований и получение ЭИЛ-покрытий. *Электронная обработка материалов*. 2018. № 54. С. 7.

76. Ivanov V. I., Verkhoturov A. D., Konevtsov L. A. The development of criteria for evaluating the effectiveness of the surface layer formation and its properties in the process of electrospark alloying. Part 1: The state of the issue. Kinetic and functional criteria of the efficiency of a doped layer's formation. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2017. Т. 53, № 3. С. 218–223.

77. Ivanov V. I., Verkhoturov A. D., Konevtsov L. A. The development of criteria for evaluating the effectiveness of the surface layer formation and its properties in the process of electrospark alloying (ESA). Part 2: The criteria of the effectiveness of the ESA process and electrospark coatings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2017. Т. 53, № 3. С. 224–228.

78. Дурягіна З. А., Лазько Г. В. Структура та властивості сталі 12Х18Н10Т після комплексного лазерного легування. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2009. Т. 10, № 3. С. 665–669.

79. Дурягіна З. А., Лазько Г. В. Вплив комплексного лазерного легування ніобієм та азотом на характер структуроутворення в приповерхневих шарах нержавіючих сталей. *Машинознавство*. 2005. № 4 (94). С. 52–55.

80. Дурягіна З. А., Беспалов С. А., Щербовських Н. В. Вплив лазерного легування з порошкових сумішей на структуру та мікромеханічні властивості сталі 12Х18Н10Т. *Металлофізика и новейшие технологии*. 2011. Т. 33, № 7. С. 969–975.

81. Laser ZrB₂-based coating on graphite / I. A. Podchernyaeva, A. D. Panasyuk, O. N. Grigoriev et al. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2015. Т. 53, № 11. С. 688–692.

82. Подчерняева И. А., Верхотуров А. Д., Востриков Я. А., Коневцов Л. А. Формирование и свойства композиционных ЭИЛ-покрытий на

сталях ШХ15 и Р6М5 с использованием новых керамических материалов. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2015. № 2 (122). С. 34–39.

83. Podchernyaeva I. A., Panasyuk A. D., Yurechko D. V., Paramonov A. M. High-energy electrospark surface strengthening of steels with composite ceramics. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2014. Т. 52, № 11–12. С. 656–662.

84. Изучение напряженного слоя после ЭИО / Т. С. Скобло, А. И. Сидашенко, А. А. Науменко и др. *Повышение надежности восстанавливаемых деталей машин* : сборник научных трудов. Харьков : ХГТУСХ, 1999. С. 63–66.

85. Скобло Т. С., Сидашенко А. И., Науменко А. А., Мартыненко А. Д. Нанесение покрытий методом ЭИО электродами с различным составом. *Труды 9-й Международной научно-технической конференции*, г. Харьков, 3–4 июня 2004 г. Харьков : ХГТУСХ, 2004. С. 170–176.

86. Мартыненко А. Д., Скобло Т. С., Сидашенко А. И. Исследование влияния химического состава анода на величину и качество слоя, восстановленного электроискровым методом. *Повышение надежности восстанавливаемых деталей машин* : сб. науч. тр. Харьков : ХГТУСХ, 1997. С. 75–81.

87. Использование лазерных технологий для упрочнения и восстановления изделий из сталей и сплавов / Т. С. Скобло, А. Д. Мартыненко, В. А. Бантковский и др. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2019. № 15. С. 142–162.

88. Нанесение покрытий методом ЭИО электродами с различным содержанием хрома / Т. С. Скобло, А. И. Сидашенко, А. Д. Мартыненко и др. *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства*. Харків, 2003. Вип. 15: Підвищення надійності відновлюємих деталей машин. С. 331–336.

89. А. с. 1764968 СССР, МКИ А 1 В24, В 39/00. Способ восстановления цилиндрических длиномерных изделий / Т. С. Скобло, В. К. Триполко, А. И. Сидашенко, А. Г. Тридуб, И. Н. Невкапса, В. И. Савустянов, Н. Д. Бойко, Ю. С. Скобло, П. С. Сыромятников. № 1532264 ; заявл. 15.11.89; опубл. 30.09.92, Бюл. № 36.

90. Antoszewski B., Tarelnik V. Laser texturing of sliding surfaces of bearings and pump seals. *14th International Scientific and Engineering Conference on Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery*. «HERVICON+PUMPS 2014» (Sumy, Ukraine, 9–12 September 2014). 2014. Series «Applied Mechanics and Materials». Vol. 630. P. 301–307.

91. Antoszewski B., Krzywicka M., Tofil Sz. Laser surface texturing of titanium alloys for biomedical applications. *Technical. Transactions. Mechanics*. 2016. 3 М. P. 3–8.

92. Antoszewski B., Sęk P. Influence of laser beam intensity on geometry parameters of a single surface texture element. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015. № 60 (3B). P. 221–2219.

93. Физико-химические процессы обработки материалов концентрированными потоками энергии / под ред. А. А. Углова. Москва : Наука, 1989. 268 с.

94. Костюк Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий ионной имплантацией, ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий : в 2 кн. Харьков : АИНУ, 2002. Книга 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. 482 с.

95. Андреев А. А., Шулаев В. М., Григорьев С. Н. Осаждение PVD-методами наноструктурных покрытий с высокими механическими параметрами. *Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов* : сб.

докл. 6-й Междунар. конф. Харьков : ННЦХФТИ : ИПЦ Контраст, 2005. С. 144–153.

96. Kara F., Öztürk B. Comparison and optimization of PVD and CVD method on surface roughness and flank wear in hard-machining of DIN 1.2738 mold steel. *Sensor Review*. 2018. Vol. 39, No. 1. P. 24–33. URL: <https://doi.org/10.1108/SR-12-201>.

97. Азаренков А. Н., Соболев О. В., Погребняк А. Д., Береснев В. М. Инженерия вакуумно-плазменных покрытий : монография. Харьков : Харьковский нац. ун-т им. В. Н. Каразина, 2011. 344 с.

98. Бойко В. И., Валяев А. Н., Погребняк А. Д. Модификация металлических материалов импульсными мощными пучками частиц. *Успехи физических наук*. 1999. Т. 169, № 11. С. 1243–1271.

99. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов : монография / К. К. Кадыржанов, Ф. Ф. Комаров, А. Д. Погребняк и др. Москва : МГУ, 2005. 640 с.

100. Юрьева А. В., Блейхер Г. А., Кривобоков В. П. Магнетронное осаждение покрытий с испарением мишени. *Журнал технической физики*. 2015. Т. 85, вып. 12. С. 56–61.

101. Справочник по технологии лазерной обработки / под ред. В. С. Коваленко. Киев : Техника, 1985. 167 с.

102. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов. Москва : Машиностроение, 1989. 304 с.

103. Леонтьев П. А., Чеканова Н. Т., Хан М. Г. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов. Москва : Металлургия, 1986. 142 с.

104. Коваленко В. С., Головкин Л. Ф., Черненко В. С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. Киев : Техника, 1990. 192 с.

105. Перевертов В. П., Андрончев И. К., Абулкасимов М. М. Технологии обработки материалов концентрированным потоком энергии. *Надежность и качество сложных систем*. 2015. № 3 (11). С. 69–79.
106. Бернадский А. В. Лазерное поверхностное легирование стальных изделий (обзор). *Автоматическая сварка*. 2013. № 12. С. 3–10.
107. Хаскин В. Ю. Процессы упрочнения и нанесения покрытий с использованием лазерного излучения (обзор). *Автоматическая сварка*. 2008. № 12. С. 24–32.
108. Дурягіна З. А., Кузін О. А., Кузін М. О., Цигилик Н. В. Вплив лазерного легування на параметри зносостійкості поверхневих шарів сталі 12Х18Н10Т. *Металознавство та обробка металів*. 2013. № 2. С. 41–46.
109. Афанасьєва О. В., Лалазарова Н. О., Федоренко Є. П. Лазерна поверхнева обробка матеріалів : монографія. Харків : ФОП Панов А. М., 2020. 100 с.
110. Тарельник В. Б., Марцинковский В. С., Антошевский Б. Современные методы формообразования поверхностей трения деталей машин : монография. Сумы : Издательство «МакДен», 2012. 280 с.
111. Erdemir A. Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication. *Tribology International*. 2005. Vol. 38. P. 249–256. URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.08.008>.
112. Іващенко Є. В., Лобачова Г. Г., Шаповалова Н. А., Ігнасюк К. Є. Створення функціональних покриттів на поверхні маловуглецевої сталі багатостадійним електроіскровим легуванням хромом та графітом у насичувальних середовищах. *Проблеми тертя та зношування*. 2016. № 2 (71). С. 62-66.
113. Верхотуров А. Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. Владивосток : Дальнаука, 1995. 323 с.

114. Родионов И. В., Сперанский С. К., Протасова Н. В. Особенности электроискрового формирования антиротационных элементов на стоматологических имплантатах цилиндрической формы. *Вестник СГТУ (Новые материалы и технологии)*. 2005. № 1 (6). С. 91–103.

115. Salmaliyan M., Malek Ghaeni F., Ebrahimnia M. Effect of electro spark deposition process parameters on WC-Co coating on H13 steel. *Surface and Coatings Technology*. 2017. 15 July. Vol. 321. P. 81–89. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.04.040>.

116. Aghajani H., Hadavand E., Peighambaroust N.-S., Khameneh-asl S. Electro spark deposition of WC-TiC-Co-Ni cermet coatings on St52 steel. *Surfaces and Interfaces*. 2020, March. Vol. 18. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2019.100392>.

117. Мулин Ю. И., Климова Л. А., Ярков Д. В. Феноменологическое описание закономерностей формирования поверхностного слоя при электроискровом легировании. *Физика и химия обработки материалов*. 2000. № 3. С. 50–56.

118. Мулин Ю. И. Особенности формирования структуры и свойства покрытий, нанесенных методом электроискрового легирования на сталь. *Физика и химия обработки материалов*. 2006. № 4. С. 60–66.

119. Химухин С. Н., Ри Х., Ри Э. Х. Структура и свойства металлов и сплавов при электроискровом воздействии : монография. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. 127 с.

120. Структура и свойства композита из сталей 12Х18Н10Т и 20, полученного сваркой взрывом / С. В. Гладковский, Т. А. Трунина, Е. А. Коковихин и др. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2009. № 9. С. 34–39.

121. Lešnjak A., Tušek J. Some characteristics of electrospark deposition. *Materials Research and Advanced Techniques*. 2003. 94(11). P.1260-1266. DOI: 10.3139/146.031260
122. Vizureanu P., Perju M.-C., Achiței D.C., Nejneru C. Advanced Electro-Spark Deposition Process on Metallic Alloys, in: *Advanced Surface Engineering Research*, Ed. M.A. Chowdhury, Intech. 2018. P. 45-68.
123. Ершов В. М. К вопросу о механизме образования фаз в металле при электроискровом легировании. *Сб. науч. тр. сотрудников ДонГТУ*. Алчевск : Изд-во ДонГТУ, 2012. Вып. 37. С. 170–178.
124. Химухин С. Н., Теслина М. А., Ри Х., Ри Э. Х. Формирование, микроструктура и свойства «белого слоя» сталей при низковольтном электроискровом легировании. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2011. № 4 (76). С. 7–11.
125. Верхотуров А. Д., Коневцов Л. А., Подчерняева И. А., Востриков Я. А. Особенности формирования измененного поверхностного слоя в условиях высокоэнергетического ЭИЛ сталей композиционными материалами. *Вестник института тяги и подвижного состава*. 2014. № 10. С. 10–14.
126. Верхотуров А. Д., Подчерняева И. А., Куриленко Л. Н. Формирование вторичной структуры на аноде в процессе электроискрового легирования. *Электронная обработка материалов*. 1987. № 1 (133). С. 26–32.
127. Формування електроіскрових покриттів з композиційних матеріалів на основі карбїду і дїбориду титану хрому / В. П. Коновал, О. П. Уманський, А. Д. Панасюк та ін. *Сверхтвердые материалы*. 2009. № 4. С. 84–91.
128. Электроискровое легирование титана и его сплавов, физико-технологические аспекты и возможность практического использования. Краткий обзор. Часть I: Особенности массопереноса, структурные и фазовые превращения в поверхностных слоях, их износо- и жаростойкость /

В. В. Михайлов, А. Е. Гитлевич, А. Д. Верхотуров и др. *Электронная обработка материалов*. 2013. № 49 (5). С. 21–44.

129. Поверхностное модифицирование сплава АЛ9 при электроискровом легировании материалами системы AlN-Ti(Zr)B₂-Ti(Zr)Si₂ / И. А. Подчерняева, А. Д. Панасюк, В. В. Щепетов и др. *Порошковая металлургия*. 2004. № 3–4. С. 54–62.

130. Структурообразование и массоперенос износостойких покрытий при электроискровом легировании Al-Si-сплавов композиционной керамикой системы LaB₆-ZrB₂ / И. А. Подчерняева, А. Д. Панасюк, С. С. Затуловский и др. *Сверхтвердые материалы*. 2003. № 6. С. 50–59.

131. Подчерняева И. А., Панасюк А. Д., Юречко Д. В., Талаш В. Н. Электроискровое легирование магниевых сплавов. *Порошковая металлургия*. 2010. № 1/2. С. 72–78.

132. Современные методы, упрочнения поверхности деталей прокатного оборудования / Т. С. Скобло, С. И. Рудюк, А. В. Шапаренко и др. *Черная металлургия*. 1988. № 16. С. 2–15.

133. Анализ структурного состояния поверхностного слоя после электроэрозионного легирования. I. Особенности формирования электроэрозионных покрытий на стали 45 / В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко и др. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2018. Т. 40, № 2. С. 235–254. DOI: 10.15407/mfint.40.02.0235.

134. Feng H., Wang Y., Tian L., Tang B. Study on Tribological Behaviors of Molybdenum Coating on H13 Steel Surface by Electrospark Deposition. *Hot Working Technology*. 2010. № 4. P. 178-183.

135. Коваленко В. С., Верхотуров А. Д., Головкин А. Д., Подчерняева И. А. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов. Москва : Машиностроение, 1986. 130 с.

136. Бабей Ю. Н., Рябов В. Ф., Голубец В. М. О природе белых слоев, возникающих в процессе некоторых видов обработки. *Физико-химическая механика материалов*. 1973. № 4. С. 33–38.

137. Востриков Я. А., Коневцов Л. А., Макиенко В. М., Верхотуров А. Д. Классификация электродных материалов для электроискрового легирования. *Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке*. 2013. Т. 1. С. 93–97.

138. Верхотуров А. Д., Николенко С. В. Классификация. Разработка и создание электродных материалов для электроискрового легирования. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2010. № 2. С. 13–17.

139. Николенко С. В., Ри Х. Электродные материалы для электроискрового легирования с минеральными и самофлюсующимися добавками : монография. Хабаровск : Тихоокеан. гос. ун-т, 2015. 305 с.

140. Екологічна безпека експлуатації компресорного і насосного обладнання : монографія / В. А. Марцинковський, В. Б. Тарельник, Б. Антошевський та ін. ; за ред. О. В. Радіонова. Суми : Сумський державний університет, 2018. 282 с.

141. Электроискровое легирование графитом стальных поверхностей: технология, свойства, применение / В. Б. Тарельник, А. В. Паустовский, Ю. Г. Ткаченко и др. *Электронная обработка материалов*. 2017. Т. 53, № 4. С. 1–10.

142. Цементация электроэрозионным легированием : монография / В. Б. Тарельник, Б. Антошевский, В. С. Марцинковский и др. ; под ред. проф. В. Б. Тарельника. Сумы : Университетская книга, 2015. 233 с.

143. Спосіб цементції сталевих деталей електроерозійним легуванням : пат. України на винахід № 82948, 23С 8/00 / Марцинковский В. С., Тарельник В. Б., Белоус А. В. ; опубл. 26.05.2008, Бюл. № 10. 3 с.

144. Свойства и особенности формирования электроискровых покрытий на стали 45 тугоплавкими d-металлами / А. Д. Верхотуров, В. П. Лунева, Т. В. Глабец и др. *Электронная обработка материалов*. 2005. № 1. С. 23–32.

145. Верхотуров А. Д., Иванов В. И., Коневцов Л. А. О влиянии физико-химических свойств тугоплавких соединений и твердых сплавов на их эрозию при электроискровом легировании. *Электронная обработка материалов*. 2017. Т. 53, № 6. С. 8–17.

146. Лазаренко Н. И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Москва : Машиностроение, 1976. 46 с.

147. Состав пасты для цементации стальных деталей : пат. 1548261 SU, МПК С23 С 8/02 / Тарасов А. Н., Тарасов В. Н., Бутько В. В., Райков М. В. ; заявл. 29.07.88 ; опубл. 07.03.90, Бюл. № 9. 3 с.

148. Способ цементации деталей из конструкционных и инструментальных сталей в цементуемой пасте : пат. 2704044 RU, МПК С23С 8/66 / Костин Н. А., Дедов А. Е., Костин Н. Н. ; заявл. 02.02.2019 ; опубл. 23.10.2019, Бюл. № 30. 5 с.

149. Electrospark Graphite Alloying of Steel Surfaces: Technology, Properties, and Application / V. B. Tarelnik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, O. P. Gaponova. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2018. Vol. 54, No. 2. P. 147–156. URL: <https://doi.org/10.3103/S106837551802014X>.

150. Тарельник В. Б., Белоус А. В. Технология упрочнения поверхностей деталей машин методом электроэрозионной цементации. *Вестник национального технического университета «ХПИ»*. 2008. № 4. С. 27–31.

151. Способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием : пат. Российской Федерации на изобретение № 2337796, МПК В 23Н 9/00 / Марцинковский В. С., Тарельник В. Б., Белоус А. В. ; опубл. 10.04.2008, Бюл. № 31. 3 с.

152. Ресурсосберегающие технологии нанесения упрочняющих и защитных покрытий поверхностей трения стальных деталей машин / В. Б. Тарельник, Е. В. Коноплянченко, В. С. Марцинковский, П. В. Косенко, Б. Антошевский. *Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. 2016. Вип. 168. С. 109-118.

153. Ершов В. М. Сборник научных трудов сотрудников Донбасского государственного технического университета. Алчевск : Изд-во ДонГТУ, 2011. Вып. 31. С. 219–225.

154. Михайлюк О. І. Уменьшение шероховатости электроискровых покрытий при последующей обработке графитовым электродом. *ЭОМ*. 2003. № 39 (3). С. 21–23.

155. Спосіб підвищення зносостійкості робочих поверхонь сталевих кілець імпульсних торцевих ущільнень : пат. 114671 Україна, МПК F16J 15/16, F16J 15/34, B23H 9/00, C23C 28/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Жуков А. Н. № а201512459 ; заявл. 16.12.15 ; опубл. 10.07.17, Бюл. № 13. 11 с.

156. Способ повышения износостойкости рабочих поверхностей стальных колец импульсных торцевых уплотнений : пат. 2631439 Российская Федерация, МПК B23H 9/00 / Тарельник В. Б., Марцинковский В. С., Белоус А. В., Жуков А. Н. № 2015155260 ; заявл. 22.12.15 ; опубл. 22.09.17, Бюл. № 27. 14 с.

157. Способ повышения износостойкости торцовых поверхностей колец из жаропрочных сплавов импульсного торцевого уплотнения (ИТУ), работающего в криогенных средах (варианты) : пат. 2648425 Российская Федерация, МПК B23H 9/00 / Тарельник В. Б., Марцинковский В. С., Белоус А. В., Жуков А. Н. № 2016106530 ; заявл. 24.02.16 ; опубл. 26.03.18, Бюл. № 9. 6 с.

158. Спосіб обробки торцевої поверхні кільця з жароміцного сплаву імпульсного торцевого ущільнення, що працює в криогенних середовищах : пат. на корисну модель 121847 Україна, МПК F16J 15/16, F16J 15/34, B23H 9/00, C23C 8/00, C23C 28/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Жуков О. М. № u201601708 ; заявл. 23.02.16 ; опубл. 26.12.17, Бюл. № 24. 5 с.

159. Спосіб обробки торцевої поверхні кільця з берилієвої бронзи БрБ2 імпульсного торцевого ущільнення, що працює в криогенних середовищах : пат. на корисну модель 123189 Україна, МПК F16J 15/16, F16J 15/34, B23H 9/00, C23C 8/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Жуков О. М. № u201710091 ; заявл. 23.02.16 ; опубл. 12.02.18, Бюл. № 3. 4 с.

160. Денисова Н. Е. Триботехническое материаловедение и триботехнология. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. 248 с.

161. Зозуля В. Д., Шведков Е. Л., Ровинский Д. Я., Браун Э. Д. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / отв. ред. И. М. Федорченко ; АН УССР. Ин-т проблем материаловедения. 2-е изд., перераб. и доп. Киев : Наук, думка, 1990. 203 с.

162. Вишнеvский А. Э., Горохов В. А. Повышение стойкости стальных дорнов термохимической обработкой и покрытием. *Новые материалы и технологии их обработки* : XIII Респ. студ. науч.-техн. конф., 23–27 апреля 2012 г. / ред. Н. И. Иваницкий. Минск : БНТУ, 2012. С. 207–208.

163. Попов А. А. Теоретические основы химико-термической обработки стали. Москва : Металлургия, 1962. 120 с.

164. Косторнов Л. Г. Триботехническое материаловедение : моногор. Луганск : Ноулидж (донецкое отделение), 2012. С. 696 с.

165. Гитлевич А. Е., Михайлов В. В., Парканский Н. Я., Ревутский В. М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев : Штинца, 1985. С. 145.

166. Рябов В. Р. Алитирование стали. Москва : Металлургия, 1973. 240 с.

167. Brochu M., Portillo J. G., Milligan J., Heard D. W. Heard development of metastable solidification structures using the electrospark deposition process. *The Open Surface Science Journal*. 2011. № 3. P. 105–114.

168. Структура и фазовый состав защитных покрытий на стали, полученных методами жидкофазного алитирования / И. Г. Бродова, И. Г. Ширинкина, Ю. П. Зайков и др. *Физика металлов и металловедение*. 2015. Т. 116, № 9. С. 928–936.

169. Даненко В. Ф., Гуревич Л. М., Понкратова Г. В. О влиянии алитирования на структуру и свойства стали Ст3. *Известия ВолгГТУ. Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»* : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. Волгоград, 2014. № 9 (136), вып. 10. С. 30–34.

170. Муравьев В. И., Бахматов П. В., Лончаков Н. Г., Чинилов С. З. Влияние алитирования конструкционных сталей в расплавленном алюминии на структуру и свойства изделий из них. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2013. № 11. С. 25–32.

171. Елизаветин М. А., Сатель Э. А. Технологические способы повышения долговечности машин. Москва : Машиностроение, 1969. 400 с.

172. Защита атмосферной коррозии методом электроискрового легирования / С. Ф. Вдовин, Е. С. Махнев, Н. Л. Минеева и др. *Электронная обработка материалов*. 1986. № 6. С. 15–17.

173. Решетников С. М., Вдовин С. Ф. Применение метода электроискровой металлизации для повышения коррозионной стойкости нелегированной стали. *Электронная обработка материалов*. 1977. № 3. С. 33–37.

174. Решетников С. М., Кокаровцева И. Г., Иванников В. П., Вдовин С. Ф. Применение физических методов к изучению окисления малоуглеродистых сталей с защитными покрытиями. *Физика и электроника твердого тела* : межвуз. сб. Ижевск, 1981. Вып. IV. С. 126–132.

175. Пячин С. А., Бурков А. А., Комарова В. С. Формирование и исследование электроискровых покрытий на основе алюминидов титана. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2013. № 6. С. 16–24.

176. Ворошнин Л. Г. Многокомпонентные диффузионные покрытия. Минск : Наука и техника, 1981. 296 с.

177. Гурьев А. М., Козлов Э. В., Игнатенко Л. Н., Попова Н. А. Физические основы термоциклического борирования. Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2000. 216 с.

178. Гапонова О. П., Охріменко В. О. Структура і властивості боридних покриттів, легованих міддю та хромом на інструментальних сталях. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. 2016. Вип. 10/3 (31). С. 78–82.

179. Ворошнин Л. Г. Борирование промышленных сталей и чугунов. Минск : Беларусь, 1981. 205 с.

180. Чернов Я. Б., Анфиногенов А. И., Веселов И. Н. Особенности технологии борирования сталей в расплаве хлорида кальция. *МиТОМ*. 1999. № 12. С. 37–39.

181. Чернега С. М., Поляков І. А., Красовський М. О. Комплексне насичення вуглецевої сталі бором і міддю. *Наукові нотатки ЛНТУ*. 2015. № 49. С. 165–171.

182. Спосіб борування сталевих виробів : пат. 102394 України, МПК С23С 8/70 / Спиридонова І. М., Мостовий В. І., Федоренкова Л. І., Колюча В. Д. № а201015588 ; заявл. 23.12.2010 ; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.

183. Чернов Я. Б., Анфиногенов А. И., Шуров Н. И. Борирование сталей в ионных расплавах. Екатеринбург : УрО РАН, 2001. 223 с.

184. Иванайский В. В. Физико-химические и технологические основы управления структурой и свойствами защитного покрытия на рабочих органах сельхозмашин : монография. Барнаул : Изд-во АГАУ, 2010. 187 с.

185. Лазерное борирование высокопрочного чугуна / И. А. Тананко, А. А. Левченко, Р. Т. Гуйва и др. *ФиХОМ*. 1991. № 5. С. 89–95.

186. Гордиенко А. И., Ивашко В. В. Получение боридных покрытий слоев на Ti-сплавах с помощью излучения непрерывного CO₂-лазера. *Защитные покрытия на металлах*. 1990. № 24. С. 66–68.

187. Сафонов А. И. Особенности борирования железа и сталей с помощью непрерывного CO₂-лазера. *МиТОМ*. 1998. № 1. С. 5–9.

188. Сизов И. Г., Смирнягина Н. Н., Семенов А. П. Особенности электронно-лучевого борирования сталей. *МиТОМ*. 1999. № 12. С. 8-11.

189. Сизов И. Г., Смирнягина Н. Н., Семенов А. П. Электронно-лучевое борирование железоуглеродистых сплавов. *Сборник научных трудов ВСГТУ. Серия «Технические науки»*. Улан-Удэ, 1999. Вып. 7. С. 95–106.

190. Способ электроэрозионного борирования поверхности детали из стали и чугуна : пат. 2421307 С2 RU, МПК В23Н 1/00, В23Н 9/00 / Астафьев Г. И., Файншмидт Е. М., Пегашкин В. Ф., Пилипенко В. В., Андриянов А. В., Пилипенко В. Ф., Хоменко А. Ю. ; заявл. 02.02.2007 ; опубл. 10.08.2008, Бюл. № 22. 7 с.

191. Электроискровые покрытия на стальной основе и контактной поверхности для оптимизации рабочих характеристик баббитовых подшипников скольжения / В. Б. Тарельник, А. В. Паустовский, Ю. Г. Ткаченко и др. *Электронная обработка материалов*. 2017. № 53 (1). С. 37–46.

192. Корешков А. В., Денисов Л. В., Бойцов А. Г. Нанесение антифрикционных и износостойких многокомпонентных покрытий на титановые сплавы электроискровым легированием. *Современные материалы, техника и технологи*. 2018. № 6 (21). С. 99–106.

193. Андреев М. А., Маркова Л. В., Мойсейчик А. Н., Коледа В. В. Ионно-лучевые покрытия на основе хрома с добавкой MoS₂. *ПОЛИКОМТРИБ-2011* : тезисы докладов Международной научно-технической конференции. Гомель : ИММС НАНБ, 2011. С. 32–33.
194. Бонер К. Дж. Производство и применение консистентных смазок. Москва : Гостоптехиздат, 1958. 704 с.
195. Ищук Ю. Л. Состав, структура и свойства пластичных смазок. Киев : Наукова думка, 1996. 513 с.
196. Композиции на основе полидиэтилсилоксана и модифицированных кремнеземов: улучшение смазочных характеристик / Л. И. Борисенко, С. А. Радзиевская, Д. А. Щербаков и др. *Поверхность*. 2015. Вып. 7 (22). С. 137–146.
197. Akbarzadeh M., Zandrahimi M., Moradpour E. Synthesis and characterization of molybdenum disulfide composite coating on steel using chemical vapor deposition. *Archives of metallurgy and materials*. 2018. Vol. 63, № 2. P. 555–562.
198. Wang K., Paulusa B. Tuning the binding energy of excitons in the MoS₂ monolayer by molecular functionalization and defective engineering. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2020. № 22. P. 11936–11942. URL: <https://doi.org/10.1039/D0CP01239D>.
199. Эволюция твердосмазочных покрытий, содержащих дисульфид молибдена, в процессе изнашивания / О. В. Сутягин, А. Н. Болотов, В. В. Мешков и др. *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2013. № 12. С. 37–48.
200. Massalski T. V., Okamoto H. Binary alloy phase diagrams. Ohio : ASM International, 1990. 370 p.

201. Гнездилова Ю. П., Серебровский В. В. Упрочнение сульфацированием электроосажденных железо-молибденовых покрытий для восстановления деталей машин. Курск : Изд-во КГСХА, 2008. 143 с.
202. Synthesis of large-area MoS₂ atomic layers with chemical vapor deposition / Y. H. Lee, X. Q. Zhang, W. J. Zhang et al. *Advanced Materials*. 2012. Vol. 24. P. 2320–2325.
203. Bonneau P. R., Jarvis R. F., Kaner R. B. Rapid solid-state synthesis of materials from molybdenum disulphide to refractories. *Nature*. 1991. Vol. 349. P. 510–512.
204. Van der Waals epitaxy of MoS₂ layers using graphene as growth templates / Y. M. Shi, W. Zhou, A. Y. Lu et al. *Nano Letters*. 2012. Vol. 12. P. 2784–2791.
205. Аблаев А. А., Ратников А. С. Технология электроискровой наплавки поверхностей цилиндро-поршневой группы двигателей транспортно-технологических машин. *Проблемы эксплуатации и обслуживания транспортно-технологических машин* : материалы Международной научно-технической конференции / отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2009. С. 12–15.
206. Михайлов В. В., Бачу К. А., Пасинковский Е. А., Перетятку П. В. К вопросу электроискрового легирования титана и его сплавов. *Электронная обработка материалов*. 2006. № 42 (3). С. 106–111.
207. Енергоефективні, альтернативні і енергозберігаючі технології : монографія / В. А. Марцинковський, В. Б. Тарельник, Б. Антошевський та ін. ; за ред. проф. В. А. Марцинковського і проф. В. Б. Тарельника. Суми : Видавництво «МакДен», 2016. 320 с.
208. Верхотуров А. Д., Подчерняева И. А., Кириленко С. В. Хрупкое разрушение поверхностного слоя, формируемого в процессе электроискрового легирования. *Электронная обработка материалов*. 1986. № 1. С. 28–31.

209. Ковалев И. М., Лубенская Л. М., Лысенко Л. А., Молчанов Д. В. Анализ методов финишной обработки сложных поверхностей. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2007. № 7 (113) С. 204–210.
210. Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування : монографія. Харків : ХНЕУ, 2014. 412 с.
211. Юнусов Ф. С. Формообразование сложнопрофильных поверхностей шлифованием. Москва : Машиностроение, 1987. 248 с. : ил.
212. Якимов А. В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. Москва : Машиностроение, 1984. 312 с. : ил.
213. Ежелев А. В., Бобровский И. Н., Лукьянов А. А. Анализ способов обработки поверхностно-пластическим деформированием. *Фундаментальные исследования*. 2012. № 6, ч. 3. С. 642–646.
214. Проволоцкий А. С. Струйно-абразивная обработка деталей машин. Киев : Техника, 1989. 177 с.
215. Бабичев А. П., Бабичев И. А. Основы вибрационной технологии. Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 1998. 624 с.
216. Копылов Ю. Р. Виброударное упрочнение : монография. Воронеж : Воронежский институт МВД России, 1999. 386 с.
217. Холопов Ю. В. О возможностях безабразивной ультразвуковой финишной обработки металлов. *Мир техники и технологий*. 2005. № 7. С. 36–39.
218. Давыдов В. М., Кириллова М. И., Никитенко А. В., Якуба Д. Д. Анализ тенденций применения безабразивной ультразвуковой финишной обработки сложных поверхностей, работающих в агрессивных средах. *Вестник ТОГУ*. 2015. № 2 (37). С. 45–52.
219. Таратынов О. В., Порошин В. В., Харченко В. В. Повышение качества поверхностного слоя изделий из титанового сплава методом

ультразвуковой обработки. *Научноёмкие технологии в машиностроении*. 2012. № 10. С. 13–19.

220. Ищенко А. А. Технологические основы восстановления промышленного оборудования современными полимерными материалами. Мариуполь : ПГТУ, 2007. 250 с.

221. Спосіб відновлення зношених поверхонь металевих деталей (варіанти) : пат. 104664. Україна, МПК В23Н 5/00 / Марцинковський В. С., Тарельник В. Б., Павлов О. Г., Іщенко А. О. ; опубл. 25.02.2014, Бюл. № 4. 3 с.

222. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. Электроискровая обработка токопроводящих материалов. Москва : Изд-во АН СССР, 1958. 184 с.

223. Верхотуров А. Д., Парамонов А. М., Бондарь В. Т. Влияние частоты импульсного тока на формирование упроченного слоя при ЭИЛ. *Порошковая металлургия*. 1980. № 7. С. 90–94.

224. Верхотуров А. Д., Муха И. М. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей. Киев : Техника, 1982. 182 с.

225. Физическая природа эрозии и формирования поверхностного слоя при электроискровом легировании молибдена пористыми электродами железа / А. Д. Верхотуров, А. С. Драчинский, В. И. Трефилов и др. *Порошковая металлургия*. 1983. № 12. С. 51–54.

226. Верхотуров А. Д. Обобщенная модель процесса электроискрового легирования. *Электрофизические и электрохимические методы обработки*. 1983. № 1. С. 3–6.

227. Мулин Ю. И., Климова Л. А., Ярков Д. В. Модель формирования поверхностного слоя методом электроискрового легирования: разработка и исследование. *Вестник Амурского государственного университета*. Благовещенск : Изд-во АмГУ, 1999. Вып. 6. С. 27–31.

228. Коротаяев Д. Н. Технологические возможности формирования износостойких наноструктур электроискровым легированием : монография. Омск : СибАДИ, 2009. 255 с.
229. Хейфец М. Л. Пути повышения эффективности процессов формирования поверхностей с позицией синергетики. *Вестник машиностроения*. 1994. № 2. С. 22–25.
230. Кабалдин Ю. Г. Синергетика. Информационные модели самосборки наносистем и наноструктурирования материалов при внешнем механическом воздействии. Комсомольск-на-Амуре : КнАГТУ 2007. 187 с.
231. Бровер А. В., Дьяченко Л. Д. Самоорганизация поверхностных слоев металлических материалов при обработке концентрированными потоками энергии. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2007. № 3. С. 8–14.
232. Ким В. А. Самоорганизация в процессах упрочнения, трения и изнашивания режущего инструмента. Владивосток : Дальнаука, 2001. 203 с.
233. Олемской О. І., Ющенко О. В. Самоорганізація складних систем. Суми : СумДУ, 2010. 179 с.
234. Lorenz E. N. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1963. Vol. 20. P. 130–141.
235. Жиленко Т. І. Дослідження квазірівноважних умов поверхневої конденсації фрактальних структур : автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук : 01.04.02. Суми, 2011. 20 с.
236. Myslyvchenko O. M., Gaponova O. P., Tarel'nyk V. B., Krapivka M. O. The Structure Formation and Hardness of High-Entropy Alloy Coatings Obtained by Electrospark Deposition. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2020. Vol. 59 (3–4). P. 201–208.
237. Могилевский И. З. Структурные изменения металла после электроискровой обработки их графитом. *Проблемы электрической обработки материалов*. Москва : Изд-во АН СССР, 1960. Вып. 1. С. 86–97.

238. Палатник Л. С. Фазовые превращения при электроискровой обработке металлов и опыт установления критерия наблюдаемых взаимодействий. *ДАН СССР*. 1953. № 89. С. 455–458.

239. Бокштейн Б. С., Ярославцев А. Б. Диффузия атомов и ионов в твердых телах. Москва : МИСИС, 2005. 362 с.

240. Способ повышения интенсификации физико-химических процессов в текучих средах : пат. 2341734 Российская Федерация, МПК F24J 3/00 (2006.01) / Бритвин Л. Н., Аванесян В. П. ; патентообладатель ООО «Научно-производственная фирма ТГМ». № 2006141661/06 ; заявл. 27.11.06 ; опубл. 20.12.08, Бюл. № 35. 5 с.

241. Лыгденов Б. Д. Интенсификация процессов формирования структуры диффузионного слоя при химико-термической обработке сталей : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.01 Барнаул, 2009. 31 с.

242. Петрова Л. Г., Александров В. А., Демин П. Е., Сергеева А. С. Интенсификация процессов химико-термической обработки сталей : монография / под ред. Л. Г. Петровой. Москва : МАДИ, 2019. 160 с.

243. Терентьев С. Д. Интенсификация химико-термической обработки металлов. *Электронная обработка материалов*. 1982. № 2. С. 83–84.

244. Белашова И. С., Шашков А. О. Кинетика роста диффузионного слоя при термогазоциклическом способе азотирования. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2012. № 6. С. 46–50.

245. Тимофеева Л. А., Альохін М. С. Удосконалення термічної та хіміко-термічної обробки залізовуглецевих сплавів. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2013. Вип. 136. С. 252–256.

246. Соловйов С. М., Боду С. Ж., Трофимова О. В. Порівняльний аналіз техніко-економічних і екологічних показників хіміко-термічної обробки. *Наукові праці* : науково-методичний журнал. Миколаїв : Вид-во МДГУ ім. Петра Могили, 2007. Т. 61, вип. 48 «Техногенна безпека». С. 74–76.

247. Александров В. А., Петрова Л. Г., Сергеева А. С., Бритвин Л. Н. Применение электрического разряда для интенсификации процесса азотирования. *Вестник МАДИ*. 2017. Вып. 1 (48). С. 49–55.

248. Рябічева Л. О., Гапонова О. П. Оцінка параметрів дифузії при деформуванні порошкових пористих тіл. *Наукові нотатки : міжвузівський збірник наукових праць*. Луцьк, 2009. № 25, ч. 1. С. 311–315.

249. Рябичева Л. А., Гапонова О. П. Влияние температуры и скорости деформации на процессы диффузии в порошковой системе медь – титан. *Вісн. Східноукр. нац. ун-ту*. 2009. № 11 (141), ч. 2. С. 14–18.

250. Zoltan B., Schmitz G. Chapter 5 «Diffusion in Metals and Alloys». *Physical Metallurgy*. Fifth Edition. 2014. P. 387–559. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53770-6.00005-8>.

251. Gaponova O. P., Kolosyuk A. G. Researches of diffusion processes in powder materials and their role in structure formation. *Ukrainian Journal of Physics*. 2014. Vol. 59, No. 10. P. 1013–1019.

252. Домбровский Ю. М., Степанов М. С. Особенности молибденирования стали в режиме микродугового нагрева. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2015. № 5 (160). С. 135–138.

253. Improvement in Babbit Sliding Bearing Quality with Electrospark Alloying / V. B. Tarelnik, V. S. Martsinkovskii, E. V. Konoplyanchenko et al. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2018. Vol. 54, Issue 7–8. P. 598–604. URL: <https://doi.org/10.1007/s10556-018-0521-0>.

254. Ecologically Safe Process for Sulfo-Aluminizing Steel Parts / L. D. Plyatsuk, V. B. Tarelnyk, Cz. Kundera, O. V. Radionov, O. P. Gaponova. *Journal of Engineering Sciences*. 2018. Vol. 5, Issue 1. P. C 16–C 20. URL: [https://doi.org/10.21272/jes.2018.5\(1\).c4](https://doi.org/10.21272/jes.2018.5(1).c4).

255. Tarelynyk V. B., Gaponova O. P., Konoplyanchenko Ye. V., Dovzhyk M. Y. Investigation of regularities of the processes of formation of surface layers with electroerosive alloying. Part 1. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2016. Vol. 38, No. 12. P. 1611–1633. URL: <https://doi.org/10.15407/mfint.38.12.1611>.

256. Tarelynyk V. B., Gaponova O. P., Konoplianchenko Ye. V., Dovzhyk M. Ya. Investigation of regularities of the processes of formation of surface layers with electroerosive alloying. Part II. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2017. Vol. 39, No. 3. P. 363–385. URL: <https://doi.org/10.15407/mfint.39.03.0363>.

257. Спосіб цементації сталевих деталей електроіскровим легуванням : пат. 142822 України на корисну модель, МПК (2020.01), С23С 8/00, С23С 28/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Мисливченко О. М., Пирогов В. О., Гапон О. О., Лазаренко А. Д. ; заявл. 11.02.2020 ; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12. 10 с.

258. Спосіб алітування сталевих деталей : пат. 130157 України на корисну модель, МПК (2018.01), В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 10/48 (2006.01), С23С 8/60 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевський Б., Кундера Ч. ; заявл. 29.05.2018 ; опубл. 26.11.2018, Бюл. № 22. 6 с.

259. Спосіб прогнозування якісних параметрів поверхневого шару при зміцненні сталевих деталей методом електроерозійного легування : пат. 130574 України на корисну модель, МПК (2018.01), В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 10/48 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Лазаренко А. Д. ; заявл. 03.07.2018 ; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23. 19 с.

260. Спосіб сульфоцементації поверхні сталеві деталі : пат. 117867 України на винахід, МПК В23Н 1/00 В23Н 9/02, С23С 8/66 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Жуков О. М.,

Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В. ; заявл. 22.12.2016 ; опубл. 10.10.2018, Бюл. № 19. 9 с.

261. Способ сульфоцементации стальных деталей : пат. 2663799 РФ на изобретение, МПК В23Н 1/00 (2006.01), В2Н 9/00 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковский В. С., Белоус А. В., Жуков А. Н., Гапонова О. П., Коноплянченко Е. В. ; заявл. 30.12.2016 ; опубл. 09.08.2018, Бюл. № 22. 15 с.

262. Спосіб сульфоцементації сталевих деталей : пат. 119318 України на корисну модель, МПК (2017.01), В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 8/60 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Антошевський Б., Кундера Ч., Жуков О. М. ; заявл. 27.02.2017 ; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18. 9 с.

263. Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей : пат. 121343 України на винахід, МПК (2020.01), В23Н 1/06 (2006.01) В23Н 9/00 С23С 12/02 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В.; Тарельник Н. В., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевський Б., Кундера Ч. ; заявл. 29.05.2018 ; опубл. 12.05.2020, Бюл. № 9. 5 с.

264. Quality Analysis of Aluminized Surface Layers Produced by Electrospark Deposition / G. V. Kirik, O. P. Gaponova, V. B. Tarelynyk et al. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2018. Vol. 56, Issue 11–12. P. 688–696. URL: <https://doi.org/10.1007/s11106-018-9944-6>.

265. Способ алитирования стальных деталей : пат. RU 2696616 С1 на изобретение, МПК В23Н9/00 (2006-01-01) / Марцинковський В. С., Тарельник В. Б., Тарельник Н. В., Коноплянченко Е. В., Гапонова О. П., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевський Б., Кундера Ч. ; заявл. 04.06.2018 ; опубл. 06.08.2019, Бюл. № 22. 8 с.

266. Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей : пат. 121346 України на винахід, МПК (2020.01) В23Н 1/06 (2006.01), В23Н 9/00, С23С 12/02 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П.,

Коноплянченко С. В., Тарельник Н. В., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевский Б., Кундера Ч. ; заявл. 06.07.2018 ; опубл. 12.05.2020, Бюл. № 9. 8 с.

267. Способ сульфоцементации стальных деталей : пат. RU 2707776 РФ на изобретение, С1 (51) МПК, В23Н 1/00 (2006.01), В23Н 9/00 (2006.01) / Марцинковський В. С., Тарельник В. Б., Тарельник Н. В., Коноплянченко Е. В., Гапонова О. П., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевский Б., Кундера Ч. ; заявл. 25.07.2018 ; опубл. 29.11.2019, Бюл. № 34. 11 с.

268. Спосіб сульфоцементації сталевих деталей : пат. 130866 України на корисну модель, МПК (2018.01), В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 10/48 (2006.01), С23С 8/60 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко С. В., Тарельник Н. В., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевський Б., Кундера Ч. ; заявл. 06.07.2018 ; опубл. 26.12.2018, Бюл. № 24. 8 с.

269. Абраимов Н. В., Елисеев Ю. С. Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов. Москва : Интермет Инжиниринг, 2001. С. 76–130.

270. Гусовский В. Л., Лифшиц А. Е. Методики расчета нагревательных и термических печей : учебно-справочное пособие. Москва : Теплотехник, 2004. 400 с.

271. Ким В. А., Якубов Ф. Я., Схиртладзе А. Г. Мезомеханика процессов контактного взаимодействия при трении и резании металлов. Старый Оскол : ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2017. 244 с.

272. Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогоев А. А. Синергетика и фракталы в материаловедении. Москва : Наука, 1994. 383 с.

273. Федоров С. В. Основы трибоэргодинамики и физико-химические предпосылки теории совместимости. Калининград : Калининградский государственный технический университет, 2003. 415 с.

274. Федоров С. В., Ассенова Э. Синергетический принцип самоорганизации при трении. *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2017. Т. 3, № 3. С. 21–41.
275. Вишневецкий В. В., Чехівська Ю. І., Грищук Г. П. Прояви синергетичних властивостей розвитку відкритих систем (модель «порядок – хаос»). *Вісник Національного транспортного університету*. 2010. № 21 (2). С. 235–239.
276. Bray A. J. Theory of phase-ordering kinetics. *Advances in Physics*. 1994. № 43 (3). P. 357–459. DOI: 10.1080/00018739400101505.
277. Хакен Г. Синергетика. Москва : Мир, 1980. 406 с.
278. Олемской А. И., Хоменко А. В. Трехпараметрическая кинетика фазового перехода. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1996. Т. 110. С. 2144–2167.
279. Бабаков И. М. Теория колебаний. Классики отечественной науки. Москва : Дрофа, 2004. 592 с.
280. Матросов В. М., Румянцев В. В., Карапетян А. В. Нелинейная механика. Москва : Физматлит, 2001. 432 с.
281. Димитриенко Ю. И. Нелинейная механика сплошной среды. Москва : Физматлит, 2009. 624 с.
282. Шамолин М. В. Методы анализа динамических систем с переменной диссипацией в динамике твердого тела. Москва : Экзамен, 2007. 326 с.
283. Кафтанова Ю. В. Специальные функции математической физики. Харьков : Новое слово, 2009. Т. 3. 1180 с.
284. Яворский Б., Детлаф А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. Москва : Наука, 2006. 1056 с.
285. Трофимова Т. И. Справочник по физике для студентов и абитуриентов. Москва : ООО «Изд-во «Астрель», 2001. 399 с.

286. Проблеми безпечної експлуатації компресорного та насосного обладнання в сучасній промисловості : колективна монографія / В. С. Марцинковський та ін. ; за ред. В. Б. Тарельника, Є. В. Коноплянченка. Суми : ФОП Литовченко Є. Б., 2020. 410 с.

287. Современные энергоэффективные технологии реализации инженерных задач динамического оборудования : монография / под ред. В. А. Марцинковского, В. С. Марцинковского, В. Б. Тарельника и др. Сумы : Тритория, 2017. 292 с.

288. Повышение экологической безопасности формирования износостойких покрытий на поверхностях деталей типа тел вращения из стали 12Х18Н10Т с применением комбинированной технологии на основе электроискрового легирования / В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, В. Б. Лобода и др. *Электронная обработка материалов*. 2020. Т. 56, № 5. С. 115–127. DOI: 10.5281/zenodo.4045794.

289. Tarelynyk V. B., Gaponova O. P., Myslyvchenko O. M., Sarzhanov B. O. Electrospark Deposition of Multilayer Coatings. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2020. Vol. 59 (1–2). P. 76–88. URL: <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00140-x>.

290. Cementation of steel details by electrospark alloying / V. B. Tarelynyk, O. P. Gaponova, G. V. Kirik et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2020. Vol. 42 (5). P. 655–667. URL: <https://doi.org/10.15407/mfint.42.05.0655>.

291. Technology support for protecting contacting surfaces of half-coupling – Shaft press joints against fretting wear / V. Martsynkovskyy, V. Tarelynyk, Ye. Konoplianchenko, O. Gaponova, M. Dumanchuk. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, 2020. P. 216–225. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_22.

292. Розробка технології нанесення Al-C-S покриттів сталей методом електроіскрового легування / О. П. Гапонова та ін. *Вісник СНАУ*. 2020. № !!!, С. !!!–!!!.

293. Гапонова О. П. Дослідження якості сульфоалітованих покриттів на сталей поверхнях, отриманих методом електроіскрового легування. *Вісник ХНУСГ ім. П. Василенка*. 2020. № !!!, С. !!!–!!!.

294. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Myslyvchenko O. M. Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospark Alloying. Part I. Structural-Phase State of the Steel Surface after Aluminizing. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 10. P. 1377–1394. URL: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1377>.

295. Estimating qualitative parameters of aluminized coating obtained by electric spark alloying method / O. Gaponova, C. Kundera, G. Kirik et al. *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings. NAP 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2019. P. 249–266. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-13-6133-3_25.

296. Тарельник В. Б., Коноплянченко Е. В., Думанчук М. Ю., Гапонова О. П. Технологическое обеспечение защиты контактирующих поверхностей прессового соединения «полумуфта – вал» от фреттингового износа. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2019. № 1 (55). С. 24–36.

297. Гапонова О. П. Структурно-фазовий стан жаростійких покриттів, отриманих методом електроіскрового легування. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2019. № 1 (55). С. 2–7.

298. Гапонова О. П. Аналіз якості комплексних сульфоцементованих покриттів, отриманих методом електроіскрового легування. *Наукові нотатки*. 2019. Вип. 67. С. 24–28.

299. Підвищення якості робочих поверхонь деталей з аустенітних хромонікелевих сталей методом електроіскрового легування / В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, О. М. Мисливченко та ін. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2019. Вип. 205: Проблеми надійності машин. С. 320–329.

300. Гапонова О. П. Аналіз якості сульфоцементованих покриттів, отриманих методом електроіскрового легування. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2019. Вип. 205: Проблеми надійності машин. С. 339–349.

301. Тарельник В. Б., Гапонова О. П., Саржанов Б. А. Спосіб екологічно безпечного зміцнення деталей з листової сталі методом електроерозійного легування графітовим електродом. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2019. № 2 (20). С. 118–126. URL: [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-2\(20\)-118-126](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-2(20)-118-126).

302. The Analysis of a Structural State of Surface Layer after Electroerosive Alloying. II. Features of Formation of Electroerosive Coatings on Special Steels and Alloys by Hard Wear-Resistant and Soft Antifriction Materials / V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2018. Vol 40, No. 6. P. 795–815. URL: <https://doi.org/10.15407/mfint.40.06.0795>.

303. The Analysis of a Structural State of Surface Layer after Electroerosive Alloying. I. Features of formation of electroerosive coatings on steel 45 / V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2018. Vol. 40, No. 2. P. 235–254. URL: <https://doi.org/10.15407/mfint.40.02.0235>.

304. Тарельник В. Б., Гапонова О. П., Радионов А. В. Повышение уровня экологической безопасности при использовании интегрированных способов повышения качества стальных деталей. *Наукові нотатки*. 2018. Вип. 63. С. 214–220.

305. Use of sulphiding by electroerosion alloying method for scuff resistance increase of steel and cast iron parts friction surfaces / V. B. Tarel'nyk, V. S. Martsynkovskyy, Ye. V. Konoplianchenko, O. P. Gaponova, V. P. Yaremenko. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2018. № 11. С. 20–26.

306. Исследование свойств жаростойких функциональных покрытий, сформированных методом электроискрового легирования / В. Г. Кирик, В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова и др. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2018. № 4 (54). С. 17–22.

307. Спосіб сульфидування поверхні сталевих і чавунних деталей методом електроерозійного легування : пат. 117528 України на винахід, МПК В23Н 1/04 (2006.01), С23С 8/60 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Жуков О. М., Косенко П. В., Гапонова О. П. ; заявл. 24.11.2016 ; опубл. 10.08.2018, Бюл. № 15. 8 с.

308. Investigation of Qualitative Parameters of Surface Layers Formed by Stepwise Carburizing and Sulfo-Carburizing of Steel Parts With the Use of Electroerosion Alloying Method / V. Tarel'nyk, E. Konoplianchenko, V. Martsynkovskyy, M. Dovzhyk, M. Dumanchuk, M. Goncharenko, B. Antoszewski, O. Gaponova. *8th IEEE International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties, NAP-2018*. 2018. P. 03TFNMC26. URL: <https://doi.org/10.1109/NAP.2018.8915035>.

309. Способ восстановления изношенных поверхностей деталей машин из нержавеющей стали : пат. 2698001 РФ на изобретение, МПК В23Р 6/00 (2006.01), В23Н 5/02 (2006.01) / Марцинковский В. С., Тарельник В. Б., Гапонова О. П., Тарельник Н. В., Коноплянченко Е. В., Павлов О. Г., Саржанов Б. А., Антошевский Б. ; заявл. 26.09.2018 ; опубл. 21.08.2019, Бюл. № 24. 2 с.

310. Спосіб підвищення износостойкости сталъных деталей : пат. 2711074 РФ на изобретение, МПК В23Н 9/00 (2006.01), С23С 28/00 (2006.01) / Марцинковский В. С., Тарельник В. Б., Гапонова О. П., Тарельник Н. В., Коноплянченко Е. В., Саржанов А. А., Саржанов Б. А., Антошевский Б. ; заявл. 11.04.2019 ; опубл. 15.01.2020, Бюл. № 2. 18 с.

311. Спосіб відновлення зношених поверхонь деталей машин з нержавіючої сталі : пат. 121614 України на винахід, МПК (2020.01), В23Н 5/02 (2006.01), С23С 28/00 В23Р 6/00 / Тарельник В. Б., Марцинковский В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Павлов О. Г., Саржанов Б. О., Антошевський Б. ; заявл. 12.09.2018 ; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12. 22 с.

312. Спосіб сульфидування поверхні сталевих і чавунних деталей методом електроерозійного легування : пат. 115059 України на корисну модель, МПК (2017.01), В23Н 1/00, С23С 8/60 (2006.01), С22С 37/00, С22С 37/06, С22С 37/08 / Тарельник В. Б., Марцинковский В. С., Білоус А. В., Жуков О. М., Косенко П. В., Гапонова О. П. ; заявл. 24.11.2016 ; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6. 8 с.

313. Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей : пат. 119316 України на корисну модель, МПК (2017.01), С23С 10/48 (2006.01), В23Н9/00 / Тарельник В. Б., Марцинковский В. С., Білоус А. В., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Антошевський Б., Кундера Ч., Жуков О. М. ; заявл. 27.02.2017 ; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18. 16 с.

314. Спосіб підвищення зносостійкості робочих поверхонь сталевих кілець імпульсних торцевих ущільнень : пат. 119319 України на корисну модель, МПК (2017.01), В23Н 9/00, С23С 8/00, F16J 15/16 (2006.01), F16J 15/16 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковский В. С., Білоус А. В., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Антошевський Б., Кундера Ч., Жуков О. М. ; заявл. 27.02.2017 ; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18. 9 с.

315. Спосіб насичення поверхні сталевих і чавунних деталей сіркою методом електроерозійного легування : пат. 119317 України на корисну модель, МПК (2017.01), В23Н 1/00, С23С 8/60 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Антошевський Б., Кундера Ч., Жуков О. М. ; заявл. 27.02.2017 ; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18. 8 с.

316. Спосіб алітування сталевих деталей : пат. 119707 України на корисну модель, МПК (2017.01), С23С 10/48 (2006.01), В23Н 9/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Антошевський Б., Кундера Ч., Жуков О. М. ; заявл. 27.02.2017 ; опубл. 10.10.2017, Бюл. № 19. 22 с.

317. Спосіб формування покриття на зношувальних поверхнях деталей : пат. 141919 України на корисну модель, МПК (2020.01) В23Н 5/00, В23Н 9/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Саржанов Б. О., Пирогов В. О., Лазаренко А. Д., Гапон О. О. ; заявл. 27.12.2019 ; опубл. 27.04.2020, Бюл. № 8. 8 с.

318. Спосіб формування покриття на зношувальних поверхнях деталей : пат. 141920 України на корисну модель, МПК (2020.01) В23Н 5/00, В23Н 9/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Саржанов Б. О., Пирогов В. О., Лазаренко А. Д., Гапон О. О. ; заявл. 27.12.2019 ; опубл. 27.04.2020, Бюл. № 8. 9 с.

319. Спосіб екологічно безпечного зміцнення деталей з листової сталі методом електроерозійного легування сталевих поверхонь графітовим електродом : пат. 141992 України на корисну модель, МПК (2020.01), В23Р 6/00, В23К 9/04 (2006.01), В23Н 5/00, В23Н 5/02 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Саржанов О. А., Гапон О. О., Саржанов Б. О., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В. ; заявл. 10.09.2019 ; опубл. 12.05.2020, Бюл. № 9. 9 с.

320. Спосіб виготовлення деталей з нержавіючої сталі з комбінованим електроіскровим покриттям на зношувальних плоских і криволінійних поверхнях : пат. 142338 України на корисну модель, МПК (2020.01), В23Н 5/00, В23Н 9/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Саржанов Б. О., Пирогов В. О., Лазаренко А. Д., Гапон О. О. ; заявл. 11.01.2020 ; опубл. 25.05.2020, Бюл. № 10. 10 с.

321. Спосіб захисту деталей пари тертя пружної муфти від фретинг-корозії : пат. 142811 України на корисну модель, МПК (2020.01), С23F 15/00, F01D 5/28 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Думанчук М. Ю., Коноплянченко Є. В., Гапонова О. П., Тарельник Н. В., Пирогов В. О., Гапон О. О. ; заявл. 05.02.2020 ; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12. 10 с.

322. Спосіб формування пакетів гнучких елементів пружних муфт : пат. 137273 України на корисну модель, МПК (2019.01), F16D 3/70 (2006/01), С10М 103/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Думанчук М. Ю., Тарельник Н. В. ; заявл. 15.04.2019 ; опубл. 10.10.2019, Бюл. № 19. 8 с.

323. Спосіб підвищення зносостійкості сталевих деталей : пат. 136895 України на корисну модель, МПК (2019.01), В23Н 9/00, С23С 8/60 (2006/01), С23С 10/48 (2006/01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Саржанов О. А., Саржанов Б. О., Антошевський Б. ; заявл. 02.04.2019 ; опубл. 10.09.2019, Бюл. № 17. 14 с.

324. Бялік О. М., Кіндрачук М. В., Кондратюк С. Є., Черненко В. С. Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія. Київ : Політехніка, 2006. 328 с.

325. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости методом вдавливания алмазных наконечников. Москва : Изд-во стандартов, 1978. 56 с.

326. ДСТУ ISO 6507-1:2007. Матеріали металеві. Визначення твердості за Вікерсом. Частина 1. Метод випробування (ISO 6507-1:2005, IDT). Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 20 с.

327. ГОСТ 1778-70. Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений. Москва : Стандартинформ, 2011. 32 с.

328. ГОСТ 6130-71. Металлы. Методы определения жаростойкости. Москва : ГКС СМ СССР, 1972. 16 с.

329. Черепова Т. С., Дмитрієва Г. П., Носенко В. К. Жаростійкість порошкових кобальтових сплавів, зміцнених карбідами ніобію або титану. *Наука та інновації*. 2016. № 12 (1). С. 5–11.

330. ГОСТ 7855-84. Машины разрывные и универсальные для статических испытаний металлов и конструкционных пластмасс. Типы. Основные параметры. Общие технические требования. Москва : Издательство стандартов, 1991. 12 с.

331. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа : справ. изд. / О. А. Банных, П. Б. Будберг, С. П. Алисова и др. Москва : Металлургия, 1986. 440 с.

332. Мулин Ю. И., Верхотуров А. Д. Электроискровое легирование рабочих поверхностей инструментов и деталей машин электродными материалами, полученными из минерального сырья. Владивосток : Дальнаука, 1999. 110 с.

333. Взаимодействие никеля и молибдена с газами воздуха под действием искровых разрядов / Д. С. Герцрикен, В. Ф. Мазанко, Ч. Шенжу и др. *Актуальные проблемы прочности* : сборник материалов 50-го Международного научного симпозиума, 27 сентября – 1 октября 2010 г. Витебск, Беларусь. Витебск : УО «ВГТУ», 2010. Ч. 1. С. 164–167.

334. Взаимодействие алюминия с железом и газами воздуха при электроискровом легировании / В. Ф. Мазанко, Д. С. Герцрикен, В. М. Миронов

и др. *Взаимодействие излучений с твердым телом* : сборник материалов 11-й Международной конференции, г. Минск, Беларусь, 23–25 сентября 2015 г. Минск, 2015. С. 240–242.

335. Способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием : пат. Российской Федерации на изобретение № 2468899, МПК В 23Н 9/00 / Марцинковский В. С., Тарельник В. Б., Братушак М. П. ; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34. 11 с.

336. Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням : пат. України на винахід № 101715, 23Н 9/00 / Марцинковский В. С., Тарельник В. Б., Братушак М. П. ; опубл. 25.01.2013, Бюл. № 8. 6 с.

337. Минкевич А. Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов : монография. Москва : Машиностроение, 1965. 493 с.

338. Спосіб зміцнення поверхонь сталевих деталей, підданих термічній обробці : пат. України на винахід № 103701, 23Н 5/00 / Марцинковский В. С., Тарельник В. Б. ; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21. 4 с.

339. New method for strengthening surfaces of heat treated steel parts / V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova et al. *15th International Scientific and Engineering Conference Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery, HERVICON+PUMPS*. 2017. Vol. 233, Issue 1. P. 012048. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012048>.

340. Малиночка Я. Н., Ковальчук Г. З. Сульфиды в сталях и чугунах. Москва : Металлургия, 1988. 248 с.

341. Шумилов М. А., Козак А. П., Соколов К. Н. Влияние серы на растворимость и диффузию углерода в железе. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1973. № 10. С. 123–126.

342. Шумилов М. А., Самохвалов Г. В. Влияние легирующих элементов на поведение серы в твердом растворе в железе. *Вестник Приазов. гос. техн. ун-та* : сб. науч. тр. 1995. Вып. 1. С. 99–102.

343. Земский С. В., Москалева Л. Н., Сосновикова В. К. Влияние кобальта на коэффициент термодинамической активности серы в железе. *Диффузия, фазовые превращения и механические свойства металлов и сплавов* : научные труды. Москва : ВЗМИ, 1973. Т. 1. С. 33–36.

344. Ставицкая Н. Б., Ставицкий Б. И. Исследование форм и размеров лунок, образованных на различных материалах искровыми разрядами. *Электронная обработка материалов*. 1980. № 1. С. 9–13.

345. Johnson R., Sheldon G. Advances in the electrospark deposition coating process. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 1986. Vol. 4 (6). P. 2740-2746.

346. Иерусалимская А. Н., Самойлов В. И., Уляков П. И. Структурные изменения вещества при воздействии световых импульсов ОКГ. *Физика и химия обработки материалов*. 1968. № 4. С. 26–34.

347. Tarellyk V. B., Gaponova O. P. Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospark Alloying. Part II. Mathematical Model of the Aluminizing Process. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 1. P. 1483–1498. URL: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.11.1483>.

348. Спосіб прогнозування якісних параметрів поверхневого шару при зміцненні сталевих деталей методом електроерозійного легування : пат. 121427 України на винахід, МПК (2020.01), В23Н 1/00, В23Н 1/04 (2006.01), В23Н 9/00, С23С 10/48 (2006.01), В23Р 6/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Лазоренко А. Д. ; заявл. 03.07.2018 ; опубл. 25.05.2020, Бюл. № 10. 19 с.

349. Yushchenko O. V., Zhylenko T. I., Rudenko M. A. Analysis of the nanoparticles ensemble motion including non-extensive properties. *Nanomaterials: Application & Properties (NAP)* : IEEE 7th International Conference (2017). 2016, September. P. 01NNPT10-1-01NNPT10(4).

350. Yushchenko O. V., Rudenko M. A., Zhilenko T. I. Collective effects in the rotational motion of nanoparticles ensemble. *Nanomaterials: Application &*

Properties (NAP) : IEEE 6th International Conference (2016). 2016, September. P. 01NNPT05(3).

351. Zhilenko T. I., Yushchenko O. V. Static description of a stochastic condensation system. *Technical Physics*. 2013, November. Vol. 58, № 11. P. 1558–1562.

352. Risken H. The Fokker-Planck Equation. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg, 1996.

353. Kukushkin S. A., Osipov A. V. Nucleation kinetics of nano-films. *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology* / Ed. H. S. Nalwa. Am. Sci. Publ., 2004. Vol. 8. P. 113-136.

354. Matysik P., Józwiak S., Czujko T. Characterization of Low-Symmetry Structures from Phase Equilibrium of Fe-Al System. *Microstructures and Mechanical Properties*. 2015. Vol. 8. P. 914–931.

355. Yushchenko O. V., Zhylenko T. I. Investigation of nanoporous material under quasi-equilibrium conditions. *Condensed Matter Physics*. 2013. Vol. 16. P. 13605–13612.

356. Zhilenko T. I., Yushchenko O. V. Static description of a stochastic condensation system. *Technical Physics*. 2013. Vol. 58. P. 1558–1562.

357. Zhylenko T., Gaponova O. Statistical analysis of aluminized coatings obtained by electrospark deposition. *International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*. 2018.

358. Zhylenko T., Tarelnyk V., Gaponova O., Hrytsyna A. Mathematical methods for the analysis of electrospark alloying of metal surfaces. *International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo 2019)*, Odessa, Ukraine, 2019. P. 1–4.

359. Olemskoi A. I., Yushchenko O. V., Zhylenko T. I. Discontinuous Kinetics of Quasi-Equilibrium Condensation. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2010. Vol. 2 (3). P. 87-95.


ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Методи підвищення якості поверхонь відповідальних деталей машин динамічного обладнання

Елементи деталі	Методи підвищення якості поверхонь		
	При виготовленні	Під час ремонту	Перспективні
1	2	3	4
Ротор			
			
Вал насоса			
			
Шийка підшипника	Цементация + шліфування; азотування + шліфування; СВЧ, ОК, ОР	шліфування + гальванічне хромування + шліфування; шліфування + ЕІЛ + ППД	шліфування + ЦЕІЛ + ОК; шліфування + ЦЕІЛ + ОР; шліфування + ЦЕІЛ + БУФО
Посадочна шийка	Цементация + шліфування; азотування + шліфування; СВЧ, ОК, ОР	Зварювання, наплавлення, напилення, установка додаткової деталі, застосування полімерних матеріалів	шліфування + ЦЕІЛ + ОК; шліфування + ЦЕІЛ + ОР; шліфування + ЦЕІЛ + БУФО
Робоче колесо			
			

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4
Лопатки	Шлікерні покриття, газотермічне напилення і т.п.	Компресорні: зварні та паяні, як правило, не ремонтують. Клепані – замінюють лопатки та переклепують. Насосні підварюють	ЕІЛ твердими зносостійкими металами.
Диски	Шлікерні покриття, газотермічне напилення і т.п.	Насосні: зварювання, наплавлення, газотер- мічне напилення і т.п.	ЕІЛ твердими зносостійкими металами.
Поверхні щілинних ущільнень	Шлікерні покриття, газотермічне напилення і т.п., напилення порошкового полімеру.	Наплавлення, газотермічне напилення і т.п.	шліфування + ЦЕІЛ + ОШ; шліфування + ЦЕІЛ + ОР; шліфування + ЦЕІЛ + БУФО.
Напівмуфта			
			
Поверхні прилеглі до торця	конструктивно запресовують втулки	-	-
Плаваюче масляне ущільнення ТОВ «ТРИЗ»			
			

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4
Захисна втулка			
  			
Зовнішня поверхня	Зносостійкий матеріал на основі нікелю – хастеллой	Не ремонтпридатні	ЦЕЛІ + ОК; ЦЕЛІ + ОР; ЦЕЛІ + БУФО.
Основа	Монель метал марки НМЖМц 28-2,5-1,5		Сталь 12Х18Н10Т
Кільце ущільнювача масла-газ, корпус внутрішній і корпус підшипника	Термічне оброблення	Не ремонтпридатні	ЕІЛ вуглецем + сріблом + притирання
Торцеві імпульсні ущільнення (ТІУ)			
 			
Кільця ТІУ			
   			

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4
Торцева поверхня	Все кільце виготовляється з карбіду кремнію або карбіду вольфраму або силіційованого графіту.	Замінюють на нові	Сталь 38Х2МЮА: ЦЕЛІ + ЕЛІ ВК8 + Cu + ВК8; ІА. Сталь Р6М5 + КІБ. Сталь 12Х18Н10Т + КІБ. Сплав ХН58МБЮД + ЦЕЛІ + ЕЛІ ВК8+ ВК8+Cu
Контактуюча поверхня «вуса» (вторинного ущільнення)	Гальванічне золочення; лазерне оброблення (відпускання) з метою зниження твердості і збільшення пластичності.		Сплав ХН58МБЮД + ЕЛІ міддю; Сплав БрБ2 + ЦЕЛІ; ЕЛІ міддю

ДОДАТОК Б

Патенти

ДОДАТОК Б.1



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **121427** (13) **C2**

(51) МПК (2020.01)

B23H 1/00**B23H 1/04** (2006.01)**B23H 9/00****C23C 10/48** (2006.01)**B23P 6/00**

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ
ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ ТА
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

- (21) Номер заявки: **а 2018 07460**
 (22) Дата подання заявки: **03.07.2018**
 (24) Дата, з якої є чинними права на винахід: **25.05.2020**
 (41) Публікація відомостей про заявку: **10.01.2020, Бюл.№ 1**
 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: **25.05.2020, Бюл.№ 10**

- (72) Винахідник(и):
**Тарельник В'ячеслав Борисович (UA),
Марцинковський Василь Сігізмундович (UA),
Гапонова Оксана Петрівна (UA),
Лазаренко Андрій Дмитрович (UA)**
- (73) Власник(и):
**Марцинковський Василь Сігізмундович,
вул. Березова, 2, сел. Сад, Сумський р-н,
Сумська обл., 42343 (UA)**
- (74) Представник:
Лісна Тетяна Леонідівна, ресстр. №286
- (56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:
RU 2524471 C2, 20.05.2014
RU 2337796 C2, 10.11.2008
UA 10715 C2, 25.04.2013
RU 2468899 C1, 10.12.2012
Тарельник В.Б., Гапанова О.П.,
Конопляченко Е.В., Довжик М.Я.
Исследование закономерностей процессов формирования поверхностных слоев при электроэрозионном легировании. Часть 1: ин-т. Металлофизики им. Г.В. Курдюмова., 2016
Тарельник В.Б. Управление качеством поверхностных слоев деталей комбинированным электроэрозионным легированием. Теоретико-экспериментальное исследование технологических процессов электроэрозионного легирования.
US 2016017450 A1, 21.01.2016
US 2006065546 A1, 30.03.2006
US 6417477 B1, 09.07.2002

UA 121427 C2

(54) СПОСІБ ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ПРИ ЗМІЦНЕННІ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО ЛЕГУВАННЯ**(57) Реферат:**

Даний винахід належить до області електрофізичної та електрохімічної обробки, зокрема до електроерозійного легування (ЕЕЛ) поверхонь сталевих деталей алюмінієм (алітування). Заявлений спосіб прогнозування якісних параметрів поверхневого шару при зміцненні сталевих деталей методом електроерозійного легування (ЕЕЛ) залежно від робочих режимів



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **119316** (13) **U**
(51) МПК (2017.01)
C23C 10/48 (2006.01)
B23H 9/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

- (21) Номер заявки: **u 2017 01845**
(22) Дата подання заявки: **27.02.2017**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **25.09.2017**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **25.09.2017, Бюл.№ 18**

- (72) Винахідник(и):
**Гарельник В'ячеслав Борисович (UA),
Марцинковський Василь Сігізмундович (UA),
Білоус Андрій Валерійович (UA),
Гапонова Оксана Петрівна (UA),
Конопляченко Євген Владиславович (UA),
Антошевський Богдан (PL),
Кундера Чеслав (PL),
Жуков Олексій Миколайович (UA)**
(73) Власник(и):
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ,
вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми,
40021 (UA)**
(74) Представник:
Лісна Тетяна Леонідівна, реєстр. №286

(54) СПОСІБ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ

(57) Реферат:

Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей електроерозійним легуванням (ЕЕЛ) алюмінієвим електродом, при якому обробку проводять спочатку ЕЕЛ алюмінієвим електродом при енергії розряду $W_p = 0,52-6,8$ Дж і продуктивності $1,0-3,0$ см²/хв., а потім здійснюють наступне ЕЕЛ алітованого шару тим же алюмінієвим електродом, але при енергії розряду, $W_p = 0,52-4,6$ Дж і продуктивності $1,1-2,7$ см²/хв.

UA 119316 U



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **119707** (13) **U**
(51) МПК (2017.01)
C23C 10/48 (2006.01)
B23H 9/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

- (21) Номер заявки: **u 2017 01844**
(22) Дата подання заявки: **27.02.2017**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **10.10.2017**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **10.10.2017, Бюл.№ 19**

- (72) Винахідник(и):
**Гарельник В'ячеслав Борисович (UA),
Марцинковський Василь Сігізмундович (UA),
Білоус Андрій Валерійович (UA),
Гапонова Оксана Петрівна (UA),
Конопляченко Євген Владиславович (UA),
Антошевський Богдан (PL),
Кундера Чеслав (PL),
Жуков Олексій Миколайович (UA)**
(73) Власник(и):
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ,
вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми,
40021 (UA)**
(74) Представник:
Лісна Тетяна Леонідівна, реєстр. №286

(54) СПОСІБ АЛІТУВАННЯ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ

(57) Реферат:

Спосіб алітування сталевих деталей електроерозійним легуванням (ЕЕЛ) алюмінієвим електродом, при якому обробку проводять спочатку ЕЕЛ алюмінієвим електродом при енергії розряду $W_p=0,52-6,8$ Дж і продуктивності $1,0-3,0$ см²/хв., а потім здійснюють наступне ЕЕЛ алітованого шару тим же алюмінієвим електродом, але при енергії розряду, $W_p=0,52-4,6$ Дж і продуктивності $1,1-2,7$ см²/хв.

UA 119707 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **130574** (13) **U**
 (51) МПК (2018.01)
B23H 1/00
B23H 9/00
C23C 10/48 (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО
 ЕКОНОМІЧНОГО
 РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
 УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2018 07462</p> <p>(22) Дата подання заявки: 03.07.2018</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.12.2018</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.12.2018, Бюл.№ 23</p>	<p>(72) Винахідник(и): Тарельник В'ячеслав Борисович (UA), Марцинковський Василь Сігізмундович (UA), Гапонова Оксана Павлівна (UA), Лазаренко Андрій Дмитрович (UA)</p> <p>(73) Власник(и): Марцинковський Василь Сігізмундович, вул. Березова, 2, сел. Сад, Сумський р-н, Сумська обл., 42343 (UA)</p> <p>(74) Представник: Лісна Тетяна Леонідівна, реєстр. №286</p>
--	---

(54) СПОСІБ ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ПРИ ЗМІЦНЕННІ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО ЛЕГУВАННЯ**(57) Реферат:**

Спосіб прогнозування якісних параметрів поверхневого шару при зміцненні сталевих деталей методом електроерозійного легування (ЕЕЛ) в залежності від робочих режимів експлуатації деталі, у якому для забезпечування якісних параметрів товщини, мікротвердості, шорсткості і суцільності поверхневого шару сталевих деталей за заданими якісними параметрами деталі будь-яким відомим способом визначають значення енергетичних режимів обладнання для алітування методом ЕЕЛ, із застосуванням яких отримують задані якісні параметри поверхневого шару або за заданим значенням енергетичних параметрів обладнання ЕЕЛ визначають значення якісних параметрів поверхневого шару, які будуть отримані, причому константи рівнянь прогнозування для кожного матеріалу підкладки визначають експериментальним шляхом.

UA 130574 U

ДОДАТОК Б.2



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **142822** (13) **U**
 (51) МПК (2020.01)
C23C 8/00
C23C 28/00

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ
 ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ ТА
 СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
 УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

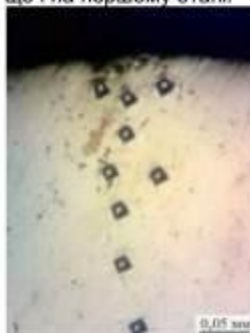
(21) Номер заявки: **u 2020 00863**
 (22) Дата подання заявки: **11.02.2020**
 (24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **25.06.2020**
 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: **25.06.2020, Бюл.№ 12**

(72) Винахідник(и):
**Тарельник В'ячеслав Борисович (UA),
 Марцинковський Василь Сігізмундович (UA),
 Гапонова Оксана Петрівна (UA),
 Мисливченко Олександр Миколайович (UA),
 Пирогов Віктор Олександрович (UA),
 Гапон Олександр Олександрович (UA),
 Лазаренко Андрій Дмитрович (UA)**
 (73) Власник(и):
**Марцинковський Василь Сігізмундович,
 вул. Березова, буд. 2, сел. Сад, Сумський р-н,
 Сумська обл., 42343 (UA)**
 (74) Представник:
Лісна Тетяна Леонідівна, реєстр. №286

(54) СПОСІБ ЦЕМЕНТАЦІЇ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ ЕЛЕКТРОІСКРОВИМ ЛЕГУВАННЯМ

(57) Реферат:

Спосіб цементациї сталевих деталей електроіскровим легуванням включає поетапне електроіскрове легування їх поверхонь графітовим електродом (ЦЕІЛ). Зміцнення проводять у три етапи: на першому етапі виконують ЦЕІЛ поверхні сталеві деталі з енергією розряду і продуктивністю в залежності від заданих показників товщини зміцненого шару, його суцільності та шорсткості його поверхні, на другому етапі на сформовану на першому етапі поверхню деталі, ретельно втираючи, наносять порошок графіту, а на третьому етапі проводять ЦЕІЛ сформованої на другому етапі поверхні, причому ЦЕІЛ на третьому етапі проводять з тією енергією розряду і продуктивністю, що і на першому етапі.



Фіг. 1

UA 142822 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **141992** (13) **U**

(51) МПК (2020.01)

B23P 6/00**B23K 9/04** (2006.01)**B23H 5/00****B23H 5/02** (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ
ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ ТА
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2019 09725**
 (22) Дата подання заявки: **10.09.2019**
 (24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **12.05.2020**
 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: **12.05.2020, Бюл.№ 9**

(72) Винахідник(и):
**Тарельник В'ячеслав Борисович (UA),
 Марцинковський Василь Сігізмундович (UA),
 Саржанов Олександр Анатолійович (UA),
 Гапон Олександр Олександрович (UA),
 Саржанов Богдан Олександрович (UA),
 Гапонова Оксана Петрівна (UA),
 Коноплянченко Євген Владиславович (UA)**

(73) Власник(и):
**Марцинковський Василь Сігізмундович,
 вул. Березова, буд. 2, сел. Сад, Сумський р-н,
 Сумська обл., 42343 (UA)**

(74) Представник:
Лісна Тетяна Леонідівна, реєстр. №286

(54) СПОСІБ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ЛИСТОВОЇ СТАЛІ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО ЛЕГУВАННЯ СТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ ГРАФІТОВИМ ЕЛЕКТРОДОМ**(57) Реферат:**

Корисна модель належить до галузі машинобудування і ремонту машин, зокрема до екологічно безпечного відновлення і одночасного зміцнення методом електроерозійного легування графітовим електродом (ЦЕЕЛ) деталей, виготовлених з листової сталі.

У способі екологічно безпечного зміцнення деталей з листової сталі методом електроерозійного легування сталевих поверхонь графітовим електродом принаймні у два етапи, що включають гартування і відпуск, на першому етапі здійснюють нагрівання сталевих деталей до температури гартування сталі, з якої вона виготовлена, з подальшим охолодженням на повітрі або у маслі, а на другому етапі виконують нагрівання обробленої на першому етапі деталі до температури відпуску з подальшим охолодженням на повітрі, при цьому для досягнення температури гартування і відпуску при ЦЕЕЛ поверхонь деталей з листової сталі товщиною від 1,0 до 10 мм застосовують енергію розряду 4,6-6,8 Дж і продуктивність 0,2-3,0 см²/хв.

Значне (на порядок) зниження витрат електроенергії та часу на термообробку, відсутність повідець і викривлення, а отже і необхідності додаткової механічної обробки для усунення відхилень форми заготовки після термообробки, застосування простого і екологічно чистого обладнання.

UA 141992 U

ДОДАТОК Б.3



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **117528** (13) **C2**
(51) МПК
B23H 1/04 (2006.01)
C23C 8/60 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(21) Номер заявки: **а 2016 11900**
(22) Дата подання заявки: **24.11.2016**
(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: **10.08.2018**
(41) Публікація відомостей про заявку: **25.05.2018, Бюл.№ 10**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **10.08.2018, Бюл.№ 15**

(72) Винахідник(и):
**Тарельник В'ячеслав Борисович (UA),
Марцинковський Василь Сігізмундович (UA),
Білоус Андрій Валерійович (UA),
Жуков Олексій Миколайович (UA),
Косенко Павло Вікторович (UA),
Гапонова Оксана Павлівна (UA)**
(73) Власник(и):
**Марцинковський Василь Сігізмундович,
вул. Березова, 2, сел. Сад, Сумський р-н,
Сумська обл., 42343 (UA)**
(74) Представник:
Лісна Тетяна Леонідівна, реєстр. №286
(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:
SU 139336 A1, 30.11.1960
RU 2598738 C2, 27.09.2016
SU 123823 A1, 30.11.1959
UA 5681 U, 15.03.2005
US 2013292612 A1, 07.11.2013
JP S61182723 A, 15.08.1986

(54) СПОСІБ СУЛЬФІДУВАННЯ ПОВЕРХНІ СТАЛЕВИХ І ЧАВУННИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО ЛЕГУВАННЯ**(57) Реферат:**

Винахід належить до галузі електрофізичної та електрохімічної обробки, зокрема, до електроерозійного легування (ЕЕЛ) і може бути застосований для обробки поверхонь термооброблених деталей. Спосіб сульфидування поверхонь сталевих і чавунних деталей методом електроерозійного легування (ЕЕЛ) електродом, що містить сірку, характеризується тим, що при виготовленні електрода на поверхні його заготовки з металу або сплаву формують заглиблення, які заповнюють консистентною речовиною, що містить сірку, а потім, не чекаючи висихання консистентної речовини, виконують ЕЕЛ поверхні при енергії розряду від $W_p=0,02$ Дж до $W_p=1,70$ Дж. Винахід забезпечує підвищення якості покриття, здешевлення та екологічність способу.

UA 117528 C2



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **115059** (13) **U**

(51) МПК (2017.01)

B23H 1/00**C23C 8/60** (2006.01)**C22C 37/00****C22C 37/06** (2006.01)**C22C 37/08** (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2016 11901**
 (22) Дата подання заявки: **24.11.2016**
 (24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **27.03.2017**
 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: **27.03.2017, Бюл.№ 6**

(72) Винахідник(и):
Тарельник В'ячеслав Борисович (UA),
Марцинковський Василь Сігізмундович (UA),
Білоус Андрій Валерійович (UA),
Жуков Олексій Миколайович (UA),
Косенко Павло Вікторович (UA),
Гапонова Оксана Павлівна (UA)

(73) Власник(и):
Марцинковський Василь Сігізмундович,
 вул. Березова, 2, сел. Сад, Сумський р-н,
 Сумська обл., 42343 (UA)

(74) Представник:
Лісна Тетяна Леонідівна, реєстр. №286

(54) СПОСІБ СУЛЬФІДУВАННЯ ПОВЕРХНІ СТАЛЕВИХ І ЧАВУННИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО ЛЕГУВАННЯ

(57) Реферат:

Спосіб сульфидування поверхні сталевих і чавунних деталей методом електроерозійного легування (ЕЕЛ) електродом містить сірку. При виготовленні електрода на поверхні його заготовки з металу або сплаву формують заглиблення, які заповнюють консистентною речовиною, що містить сірку, а потім проводять ЕЕЛ поверхні, не чекаючи висихання консистентної речовини.

UA 115059 U



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **119317** (13) **U**
(51) МПК (2017.01)
B23H 1/00
C23C 8/60 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2017 01846**
(22) Дата подання заявки: **27.02.2017**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **25.09.2017**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **25.09.2017, Бюл.№ 18**

(72) Винахідник(и):
**Тарельник В'ячеслав Борисович (UA),
Марцинковський Василь Сігізмундович (UA),
Білоус Андрій Валерійович (UA),
Гапонова Оксана Петрівна (UA),
Коноплянченко Євген Владиславович (UA),
Антошевський Богдан (PL),
Кундера Чеслав (PL),
Жуков Олексій Миколайович (UA)**
(73) Власник(и):
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ,
вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми,
40021 (UA)**
(74) Представник:
Лісна Тетяна Леонідівна, реєстр. №286

(54) СПОСІБ НАСИЩЕННЯ ПОВЕРХНІ СТАЛЕВИХ І ЧАВУННИХ ДЕТАЛЕЙ СІРКОЮ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО ЛЕГУВАННЯ

(57) Реферат:

Спосіб насичення поверхні сталевих і чавунних деталей сіркою методом електроерозійного легування (ЕЕЛ) електродом містить сірку. При виготовленні електрода на поверхні його заготовки з металу або сплаву формують заглиблення, які заповнюють консистентною речовиною, що містить сірку, а потім проводять ЕЕЛ поверхні, не чекаючи висихання консистентної речовини.

UA 119317 U

ДОДАТОК Б.4



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **145506** (13) **U**
 (51) МПК (2020.01)
C23C 8/00
C23C 8/26 (2006.01)
C23C 14/06 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
 "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2020 06065</p> <p>(22) Дата подання заявки: 04.08.2020</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 11.12.2020</p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 10.12.2020, Бюл.№ 23</p>	<p>(72) Винахідник(и): Тарельник В'ячеслав Борисович (UA), Марцинковський Василь Сігізмундович (UA), Гапонова Оксана Петрівна (UA), Саржанов Олександр Анатолійович (UA), Коноплянченко Євген Владиславович (UA), Гапон Олександр Олександрович (UA), Лазаренко Андрій Дмитрович (UA), Мікуліна Марина Олександрівна (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): Марцинковський Василь Сігізмундович, вул. Березова, буд. 2, сел. Сад, Сумський р-н, Сумська обл., 42343 (UA)</p> <p>(74) Представник: Лісна Тетяна Леонідівна, реєстр. №288</p>
---	---

(54) СПОСІБ АЗОТУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ**(57) Реферат:**

Спосіб азотування поверхонь сталевих деталей, при якому використовують електроіскрове легування з нанесенням на поверхню сталеві деталі насичувального середовища. Перед електроіскровим легуванням на поверхню сталеві деталі як насичувальне середовище наносять пастоподібний азотистий компонент і проводять електроіскрове легування електродом з матеріалу, ідентичного матеріалу оброблюваної сталеві деталі.

UA 145506 U

ДОДАТОК Б.5



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **146373** (13) **U**
 (51) МПК (2021.01)
C23C 8/00
C23C 8/22 (2006.01)
C23C 8/26 (2006.01)
C23C 14/06 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
 "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2020 05096**
 (22) Дата подання заявки: **06.08.2020**
 (24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **18.02.2021**
 (46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: **17.02.2021, Бюл.№ 7**

(72) Винахідник(и):
Тарельник В'ячеслав Борисович (UA),
Марцинковський Василь Сігізмундович (UA),
Гапонова Оксана Петрівна (UA),
Саржанов Олександр Анатолійович (UA),
Коноплянченко Євген Владиславович (UA),
Гапон Олександр Олександрович (UA),
Лазаренко Андрій Дмитрович (UA),
Мікуліна Марина Олександрівна (UA)
 (73) Володілець (володільці):
Марцинковський Василь Сігізмундович,
 вул. Березова, буд. 2, сел. Сад, Сумський р-н, Сумська обл., 42343 (UA)
 (74) Представник:
Лісна Тетяна Леонідівна, реєстр. №286

(54) СПОСІБ НІТРОЦЕМЕНТАЦІЇ ПОВЕРХОНЬ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ

(57) Реферат:

Спосіб нітроцементації поверхонь сталевих деталей, при якому використовують електроіскрове легування з нанесенням на поверхню сталеві деталі насичувального середовища. При цьому перед електроіскровим легуванням на поверхню сталеві деталі як насичувальне середовище наносять пастоподібний карбюратор, що містить азотисто-вуглецеві компоненти, і проводять електроіскрове легування графітовим електродом-інструментом.

UA 146373 U

ДОДАТОК Б.6



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **117867** (13) **C2**

(51) МПК (2018.01)

B23H 1/00**B23H 9/02** (2006.01)**C23C 8/64** (2006.01)**B23H 5/02** (2006.01)**C23C 8/66** (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

- (21) Номер заявки: **а 2016 13145**
 (22) Дата подання заявки: **22.12.2016**
 (24) Дата, з якої є чинними права на винахід: **10.10.2018**
 (41) Публікація відомостей про заявку: **25.06.2018, Бюл.№ 12**
 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: **10.10.2018, Бюл.№ 19**

- (72) Винахідник(и):
**Тарельник В'ячеслав Борисович (UA),
 Марцинковський Василь Сігізмундович (UA),
 Білоус Андрій Валерійович (UA),
 Жуков Олексій Миколайович (UA),
 Гапонова Оксана Павлівна (UA),
 Коноплянченко Євген Владиславович (UA)**
- (73) Власник(и):
**Марцинковський Василь Сігізмундович,
 вул. Березова, 2, сел. Сад, Сумський р-н,
 Сумська обл., 42343 (UA)**
- (74) Представник:
Лісна Тетяна Леонідівна, реєстр. №286
- (56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:
 RU 2337796 C2, 10.11.2008
 UA 5681 U, 15.03.2005
 SU 123823 A, 1959
 SU 102704 A, 1956
 UA 54314 U, 10.11.2010
 SU 390198 A, 11.08.1973
 RU 2360038 C2, 27.06.2008
 GB 272610 A, 17.07.1927
 JP 55134105 A, 18.10.1980
 JP 5941463 A, 07.03.1984

UA 117867 C2

(54) СПОСІБ СУЛЬФОЦЕМЕНТАЦІЇ ПОВЕРХНІ СТАЛЕВОЇ ДЕТАЛІ**(57) Реферат:**

Винахід належить до галузі електрофізичної та електрохімічної обробки. Спосіб сульфоцементациї поверхні сталевих деталей включає електроерозійне легування поверхні сталевих деталей графітовим електродом, при цьому безпосередньо перед електроерозійним легуванням на поверхню сталевих деталей наносять сірчану пасту і/або сірчану мазь, а електроерозійне легування проводять при енергії розряду $W_p=0,13-3,4$ Дж. Винахід підвищує притирання і високу зносостійкість сталевих деталей.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 663 799** (13) **C2**(51) МПК
B23H 1/00 (2006.01)
B23H 9/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B23H 1/00 (2006.01); B23H 9/00 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2016152822, 30.12.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
30.12.2016

Дата регистрации:
09.08.2018

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 30.12.2016

(43) Дата публикации заявки: 02.07.2018 Бюл. № 19

(45) Опубликовано: 09.08.2018 Бюл. № 22

Адрес для переписки:
04050, Украина, г. Киев, ул. Герцена, 17-25, оф.
1, ООО "АПП "Веполь"

(72) Автор(ы):
ТАРЕЛЬНИК Вячеслав Борисович (UA),
МАРЦИНКОВСКИЙ Василий
Сигизмундович (UA),
БЕЛОУС Андрей Валерьевич (UA),
ЖУКОВ Алексей Николаевич (UA),
Гапонова Оксана Павловна (UA),
Коноплянченко Евгений Владиславович (UA)

(73) Патентообладатель(и):
МАРЦИНКОВСКИЙ Василий
Сигизмундович (UA)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2468899 C1, 10.12.2012. RU
2337796 C2, 10.11.2008. SU 139336 A,
16.10.1959. SU 165757 A1, 26.10.1964. EP
1095725 A1, 02.05.2001.

(54) СПОСОБ СУЛЬФОЦЕМЕНТАЦИИ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

(57) Реферат:
Изобретение относится к области электрофизической и электрохимической обработки, в частности к электроэрозионному легированию (ЭЭЛ) и может быть использовано для обработки поверхностей термообработанных деталей. Способ сульфоцементации поверхности стальной детали включает электроэрозионное легирование поверхности стальной детали графитовым электродом, непосредственно перед

которым на поверхность упомянутой детали наносят серную пасту и/или серную мазь, а электроэрозионное легирование проводят при энергии разряда $W_p=0,13-3,4$ Дж. В серную пасту и/или серную мазь также добавляют коллоидную серу. Изобретение обеспечивает повышение притираемости и повышение износоустойчивости стальных деталей. 1 з.п. ф-лы, 14 ил., 5 табл.

RU 2 663 799 C 2

RU 2 663 799 C 2



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **119318** (13) **U**

(51) МПК (2017.01)

B23H 1/00**B23H 9/00****C23C 8/60** (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

- (21) Номер заявки: **u 2017 01847**
 (22) Дата подання заявки: **27.02.2017**
 (24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **25.09.2017**
 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: **25.09.2017, Бюл.№ 18**

- (72) Винахідник(и):
**Тарельник В'ячеслав Борисович (UA),
 Марцинковський Василь Сігізмундович (UA),
 Білоус Андрій Валерійович (UA),
 Гапонова Оксана Петрівна (UA),
 Коноплянченко Євген Владиславович (UA),
 Анташевський Богдан (PL),
 Кундера Чеслав (PL),
 Жуков Олексій Миколайович (UA)**

- (73) Власник(и):
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ
 УНІВЕРСИТЕТ,
 вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми,
 40021 (UA)**

- (74) Представник:
Лісна Тетяна Леонідівна, реєстр. №286

(54) СПОСІБ СУЛЬФОЦЕМЕНТАЦІЇ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ**(57) Реферат:**

Спосіб сульфоцементациї сталевих деталей електроерозійним легуванням графітовим електродом. Безпосередньо перед легуванням графітовим електродом на поверхню сталеві деталі наносять консистентну речовину, що містить сірку.

UA 119318 U

ДОДАТОК Б.7



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **121343** (13) **C2**
 (51) МПК (2020.01)
B23H 1/06 (2006.01)
B23H 9/00
C23C 12/02 (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ
 ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ ТА
 СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
 УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(21) Номер заявки: **а 2018 05935**
 (22) Дата подання заявки: **29.05.2018**
 (24) Дата, з якої є чинними права на винахід: **12.05.2020**
 (41) Публікація відомостей про заявку: **10.12.2019, Бюл.№ 23**
 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: **12.05.2020, Бюл.№ 9**

(72) Винахідник(и):
**Тарельник В'ячеслав Борисович (UA),
 Марцинковський Василь
 Сігізмундович (UA),
 Гапонова Оксана Петрівна (UA),
 Коноплянченко Євген
 Владиславович (UA),
 Тарельник Наталія В'ячеславівна (UA),
 Думанчук Михайло Юрійович (UA),
 Гончаренко Максим
 Володимирович (UA),
 Антошевський Богдан (PL),
 Кундера Чеслав (PL)**

(73) Власник(и):
**Марцинковський Василь Сігізмундович,
 вул. Березова, 2, сел. Сад, Сумський р-н,
 Сумська обл., 42343 (UA)**

(74) Представник:
Лісна Тетяна Леонідівна, реєстр. №286

(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:
 UA 119316 U, 25.09.2017
 UA 119318 U, 25.09.2017
 SU 1477778 A1, 07.05.1989
 EP 2474646 A1, 11.07.2012
 UA a201611900, 25.05.2018
 RU 2629139 C1, 24.08.2017

UA 121343 C2

(54) СПОСІБ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ**(57) Реферат:**

Винахід належить до галузі електрофізичної та електрохімічної обробки, зокрема до електроерозійного легування поверхонь сталевих деталей алюмінієм (алітування) і сіркою (сульфидування), і може бути застосовано для обробки поверхонь термооброблених сталевих деталей. Електроерозійне легування поверхні сталевого виробу алюмінієвим електродом здійснюють при енергії розряду $W_p=0,52-6,8$ Дж і продуктивності $1,0-3,0$ см²/хв. При цьому перед електроерозійним легуванням на поверхню деталі, що підлягає обробці, наносять консистентну речовину, яка містить сірку і алюмінієву пудру, після чого проводять процес електроерозійного легування, не чекаючи висихання консистентної речовини. Винахід забезпечує підвищення твердості, зносостійкості, запобігання схоплюванню при терті і поліпшення опору атмосферній корозії.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **2 696 616** (13) **C1**
 (51) МПК
B23H 9/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B23H 9/00 (2019.02)

(21)(22) Заявка: 2018120663, 04.06.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
 04.06.2018

Дата регистрации:
 06.08.2019

Приоритет(ы):
 (22) Дата подачи заявки: 04.06.2018

(45) Опубликовано: 06.08.2019 Бюл. № 22

Адрес для переписки:
 04050, Украина, г. Киев, ул. Герцена, 17-25, оф.
 1, ООО "АПП "Веполь"

(72) Автор(ы):
МАРЦИНКОВСКИЙ Василий
 Сигизмундович (UA),
ТАРЕЛЬНИК Вячеслав Борисович (UA),
ТАРЕЛЬНИК Наталья Вячеславовна (UA),
КОНОПЛЯНЧЕНКО Евгений
 Владиславович (UA),
ГАПОНОВА Оксана Павловна (UA),
ДУМАНЧУК Михаил Юрьевич (UA),
ГОНЧАРЕНКО Максим Владимирович
 (UA),
АНТОШЕВСКИЙ Богдан (PL),
КУНДЕРА Чеслав (PL)

(73) Патентообладатель(и):
МАРЦИНКОВСКИЙ Василий
 Сигизмундович (UA)

(56) Список документов, цитированных в отчете
 о поиске: UA 119316 U, 25.09.2017. RU 2629139
 C1, 24.08.2017. BY 10997 C1, 30.08.2008. EA
 019463 B1, 31.03.2014.

(54) СПОСОБ АЛИТИРОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области электрофизической и электрохимической обработки, в частности к электроэрозионному легированию поверхностей стальных деталей алюминием и серой, и может быть применено для обработки поверхностей термообработанных стальных деталей. Способ алитирования стальной детали включает электроэрозионное легирование поверхности стальной детали алюминиевым электродом при энергии разряда $W_p=0,52-6,8$ Дж и производительности $1,0-3,0$ см²/мин. При этом

перед электроэрозионным легированием на поверхность детали, подлежащую алитированию, наносят серную мазь, содержащую 33,3% серы и добавленную алюминиевую пудру, после чего, не дожидаясь высыхания нанесенной мази, проводят процесс алитирования. Изобретение обеспечивает повышение твердости и износостойкости алитированных стальных деталей, а также предотвращение схватывания при трении и улучшение сопротивления атмосферной коррозии. 1 з.п. ф-лы, 3 ил., 3 табл.

RU 2 696 616 C 1

RU 2 696 616 C 1



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **130157** (13) **U**

(51) МПК (2018.01)

B23H 1/00**B23H 9/00****C23C 10/48** (2006.01)**C23C 8/60** (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ(21) Номер заявки: **u 2018 05934**(22) Дата подання заявки: **29.05.2018**(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **26.11.2018**(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **26.11.2018, Бюл.№ 22**

(72) Винахідник(и):

**Тарельник В'ячеслав Борисович (UA),
Марцинковський Василь Сігізмундович (UA),
Гапонова Оксана Павлівна (UA),
Коноплянченко Євген Владиславович (UA),
Тарельник Наталія В'ячеславівна (UA),
Думанчук Михайло Юрійович (UA),
Гончаренко Максим Володимирович (UA),
Антошевський Богдан (PL),
Кундера Чеслав (PL)**

(73) Власник(и):

**Марцинковський Василь Сігізмундович,
вул. Березова, 2, сел. Сад, Сумський р-н,
Сумська обл., 42343 (UA)**

(74) Представник:

Лісна Тетяна Леонідівна, реєстр. №286

(54) СПОСІБ АЛІТУВАННЯ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ

(57) Реферат:

Спосіб алітування сталевих деталей методом електроерозійного легуванням алюмінієвим електродом при енергії розряду $W_p=0,52-6,8$ Дж і продуктивності $1,0-3,0$ см²/хв. Перед електроерозійним легуванням алюмінієвим електродом на поверхню деталі, що підлягає алітуванню, наносять консистентну речовину, яка містить сірку і алюмінієву пудру. Після цього проводять процес алітування, не чекаючи висихання консистентної речовини.

UA 130157 U

ДОДАТОК Б.8



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **121346** (13) **C2**
 (51) МПК (2020.01)
B23H 1/06 (2006.01)
B23H 9/00
C23C 12/02 (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ
 ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ ТА
 СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
 УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

<p>(21) Номер заявки: а 2018 07591</p> <p>(22) Дата подання заявки: 06.07.2018</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 12.05.2020</p> <p>(41) Публікація відомостей про заяву: 10.01.2020, Бюл.№ 1</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 12.05.2020, Бюл.№ 9</p>	<p>(72) Винахідник(и): Тарельник В'ячеслав Борисович (UA), Марцинковський Василь Сігізмундович (UA), Гапонова Оксана Петрівна (UA), Коноплянченко Євген Владиславович (UA), Тарельник Наталья В'ячеславівна (UA), Думанчук Михайло Юрійович (UA), Гончаренко Максим Володимирович (UA), Антошевський Богдан (PL), Кундера Чеслав (PL)</p> <p>(73) Власник(и): Марцинковський Василь Сігізмундович, вул. Березова, 2, сел. Сад, Сумський р-н, Сумська обл., 42343 (UA)</p> <p>(74) Представник: Лісна Тетяна Леонідівна, ресстр. №286</p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: UA 119318 U, 25.09.2017 UA 119316 U, 25.09.2017 RU 2468899 C1, 10.12.2012 RU 2337796 C2, 10.11.2008 UA a201613145, 25.06.2018 RU 2629139 C1, 24.08.2017 RU 2002821 C1, 15.11.1993 EA 201101074 A1, 28.12.2012</p>
--	---

UA 121346 C2
(54) СПОСІБ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ**(57) Реферат:**

Винахід належить до галузі електрофізичної та електрохімічної обробки, зокрема до електроерозійного легування поверхонь сталевих деталей алюмінієм (алітування), сіркою (сульфидування) і вуглецем (цементації) і може бути застосовано для обробки поверхонь термооброблених сталевих деталей. Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей здійснюють методом електроерозійного легування графітовим електродом при енергії розряду $W_p = 0,52 - 6,8$ Дж і продуктивності 1,0-3,0 см²/хв. При цьому перед електроерозійним легуванням на поверхню деталі, що підлягає обробці, наносять консистентну речовину, яка містить сірку і алюмінієву пудру, після чого, не чекаючи висихання консистентної речовини, проводять процес електроерозійного легування. Винахід забезпечує захист деталей від окислення при високих температурах, так само як і від атмосферної корозії і морської води, забезпечує підвищення твердості і зносостійкості деталей, запобігає схопленню при терті і поліпшує опір атмосферній корозії.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 707 776**⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
B23H 1/00 (2006.01)
B23H 9/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B23H 1/00 (2019.05); B23H 9/00 (2019.05)

(21)(22) Заявка: 2018127586, 25.07.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
25.07.2018Дата регистрации:
29.11.2019Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 25.07.2018

(45) Опубликовано: 29.11.2019 Бюл. № 34

Адрес для переписки:
04050, Украина, г. Киев, ул. Герцена, 17-25, оф.
1, ООО "АПП "Веполь"(72) Автор(ы):
МАРЦИНКОВСКИЙ Василий
Сигизмундович (UA),
ТАРЕЛЬНИК Вячеслав Борисович (UA),
ТАРЕЛЬНИК Наталья Вячеславовна (UA),
КОНОПЛЯНЧЕНКО Евгений
Владиславович (UA),
ГАПОНОВА Оксана Павловна (UA),
ДУМАНЧУК Михаил Юрьевич (UA),
ГОНЧАРЕНКО Максим Владимирович
(UA),
АНТОШЕВСКИЙ Богдан (PL),
КУНДЕРА Чеслав (PL)(73) Патентообладатель(и):
МАРЦИНКОВСКИЙ Василий
Сигизмундович (UA)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: UA 119316 U, 25.09.2017. RU 2468899
C1, 10.12.2012. RU 2337796 C2, 10.11.2008. SU
139336 A, 16.10.1959. EP 1095725 A1, 02.05.2001.RU
2 7 0 7 7 7 6
C 1RU
2 7 0 7 7 7 6
C 1

(54) СПОСОБ СУЛЬФОЦЕМЕНТАЦИИ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области электрофизической и электрохимической обработки, в частности к электроэрозионному легированию (ЭЭЛ) поверхностей стальных деталей, и может быть применено для обработки поверхностей термообработанных стальных деталей для повышения их твердости, износостойкости, предотвращения схватывания при трении и для улучшения сопротивления атмосферной коррозии. Способ включает электроэрозионное легирование поверхности стальной детали графитовым электродом при энергии разряда $W_p=0,52-6,8$ Дж и производительности $1,0-3,0$ см²/мин. При этом

перед электроэрозионным легированием графитовым электродом на поверхность детали, подлежащую сульфоцементации, наносят серную мазь с добавлением алюминиевой пудры, после чего, до высыхания нанесенной мази, проводят процесс электроэрозионного легирования графитовым электродом. Применяют серную мазь с содержанием алюминиевой пудры не более 56%. Изобретение позволяет повысить твердость и износостойкость деталей и обеспечивает предотвращение схватывания при трении и улучшение сопротивления деталей атмосферной коррозии и морской воды, а также защиту деталей от окисления при высоких температурах. 3 з.п. ф-лы, 4 ил., 3 табл.



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **130866** (13) **U**

(51) МПК (2018.01)

B23H 1/00**B23H 9/00****C23C 10/48** (2006.01)**C23C 8/60** (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2018 07593**
 (22) Дата подання заявки: **06.07.2018**
 (24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **26.12.2018**
 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: **26.12.2018, Бюл.№ 24**

(72) Винахідник(и):
**Тарельник В'ячеслав Борисович (UA),
 Марцинковський Василь Сігізмундович (UA),
 Гапонова Оксана Павлівна (UA),
 Коноплянченко Євген Владиславович (UA),
 Тарельник Наталія В'ячеславівна (UA),
 Думанчук Михайло Юрійович (UA),
 Гончаренко Максим Володимирович (UA),
 Антошевський Богдан (PL),
 Кундера Чеслав (PL)**

(73) Власник(и):
**Марцинковський Василь Сігізмундович,
 вул. Березова, 2, сел. Сад, Сумський р-н,
 Сумська обл., 42343 (UA)**

(74) Представник:
Лісна Тетяна Леонідівна, реєстр. №286

(54) СПОСІБ СУЛЬФОЦЕМЕНТАЦІЇ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ

(57) Реферат:

Спосіб сульфоцементациї електроерозійним легуванням (ЕЕЛ) графітовим електродом сталевих деталей при енергії розряду $W_p = 0,52 - 6,8$ Дж і продуктивності 1,0-3,0 см²/хв. Перед ЕЕЛ графітовим електродом на поверхню деталі, що підлягає сульфоцементациї, наносять консистентну речовину, яка містить сірку і алюмінієву пудру, після чого, не чекаючи висихання консистентної речовини, проводять процес ЕЕЛ графітовим електродом.

UA 130866 U

ДОДАТОК Б.9



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **144932** (13) **U**

(51) МПК (2020.01)

B23H 1/00**B23H 9/00****C23C 4/00****C23C 6/00****C23C 8/60** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2020 01262</p> <p>(22) Дата подання заявки: 26.02.2020</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 11.11.2020</p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 10.11.2020, Бюл.№ 21</p>	<p>(72) Винахідник(и): Тарельник В'ячеслав Борисович (UA), Марцинковський Василь Сігізмундович (UA), Гапонова Оксана Петрівна (UA), Мисливченко Олександр Миколайович (UA), Пирогов Віктор Олександрович (UA), Гапон Олександр Олександрович (UA), Лазаренко Андрій Дмитрович (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): Марцинковський Василь Сігізмундович, вул. Березова, буд. 2, сел. Сад, Сумський р-н, Сумська обл., 42343 (UA)</p> <p>(74) Представник: Лісна Тетяна Леонідівна, реєстр. №286</p>
---	--

(54) СПОСІБ ФОРМУВАННЯ ПОКРИТТЯ НА ПОВЕРХНІ СТАЛЕВОЇ ДЕТАЛІ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ**(57) Реферат:**

Спосіб формування покриття на поверхні сталевій деталі методом електроіскрового легування, при якому безпосередньо перед легуванням на поверхню сталевій деталі наносять консистентну речовину, що містить сірку. Не чекаючи висихання нанесеної на поверхню сталевій деталі консистентної речовини, яка містить сірку, здійснюють легування електродом-інструментом з молібдену при енергії розряду $W_p=0,13-3,4$ Дж і продуктивності $0,8-2,5$ см² хв.

UA 144932 U

ДОДАТОК Б.10



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **142338** (13) **U**
 (51) МПК (2020.01)
B23H 5/00
B23H 9/00

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ
 ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ ТА
 СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
 УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

- (21) Номер заявки: **u 2020 00190**
 (22) Дата подання заявки: **11.01.2020**
 (24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **25.05.2020**
 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: **25.05.2020, Бюл.№ 10**

- (72) Винахідник(и):
**Тарельник В'ячеслав Борисович (UA),
 Марцинковський Василь Сігізмундович (UA),
 Гапонова Оксана Петрівна (UA),
 Коноплянченко Євген Владиславович (UA),
 Тарельник Наталія В'ячеславівна (UA),
 Саржанов Богдан Олександрович (UA),
 Пирогов Віктор Олександрович (UA),
 Лазаренко Андрій Дмитрович (UA),
 Гапон Олександр Олександрович (UA)**
- (73) Власник(и):
**Марцинковський Василь Сігізмундович,
 вул. Березова, буд. 2, сел. Сад, Сумський р-н,
 Сумська обл., 42343 (UA)**
- (74) Представник:
Лісна Тетяна Леонідівна, реєстр. №286

(54) СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ З КОМБІНОВАНИМ ЕЛЕКТРОІСКРОВИМ ПОКРИТТЯМ НА ЗНОШУВАЛЬНИХ ПЛОСКИХ І КРИВОЛІНІЙНИХ ПОВЕРХНЯХ**(57) Реферат:**

Спосіб виготовлення деталей з нержавіючої сталі з комбінованим електроіскровим покриттям на зношувальних плоских і криволінійних поверхнях включає цементацию поверхні порожнистої заготовки методом електроіскрового легування, алітування цементованого шару методом електроіскрового легування алюмінієвим електродом і нанесення методом електроіскрового легування покриття електродом з твердого сплаву. Поверхню сформованого комбінованого електроіскрового покриття піддають поверхнево-пластичній деформації методом обкатки кулькою, потім від порожнистої заготовки відрізають кільце з нанесеним покриттям, а відрізане кільце розрізають на окремі сегменти, далі розгинають їх за допомогою преса до заданих розмірів, здійснюючи остаточну обробку покриття сегментів методом пластичної деформації.

UA 142338 U

ДОДАТОК В



Міністерство економічного розвитку та торгівлі України

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
 “СУМСЬКИЙ РЕГІОНАЛЬНИЙ НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ЦЕНТР
 СТАНДАРТИЗАЦІЇ, МЕТРОЛОГІЇ ТА СЕРТИФІКАЦІЇ”

СВІДОЦТВО ПРО АТЕСТАЦІЮ

№ РУ – 0118/18

Видане 10 квітня 2018 року

Чинне до 10 квітня 2023 року

*Це свідоцтво засвідчує,
 що науково-дослідна лабораторія прикладного
 матеріалознавства Сумського державного університету*

Адреса: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2

Телефон: (0542) 64 – 09 – 49

Код: 05408289

*відповідає критеріям атестації і атестована на проведення вимірювань
 у сфері законодавчо регульованої метрології за видами діяльності:
 забезпечення захисту життя та здоров'я громадян, контролю безпеки
 умов праці та поза сферою*

*Галузь атестації наведена в додатку до цього свідоцтва і є його
 невід'ємною частиною.*

Керівник органу з атестації
 ДП “Сумстандартметрологія”



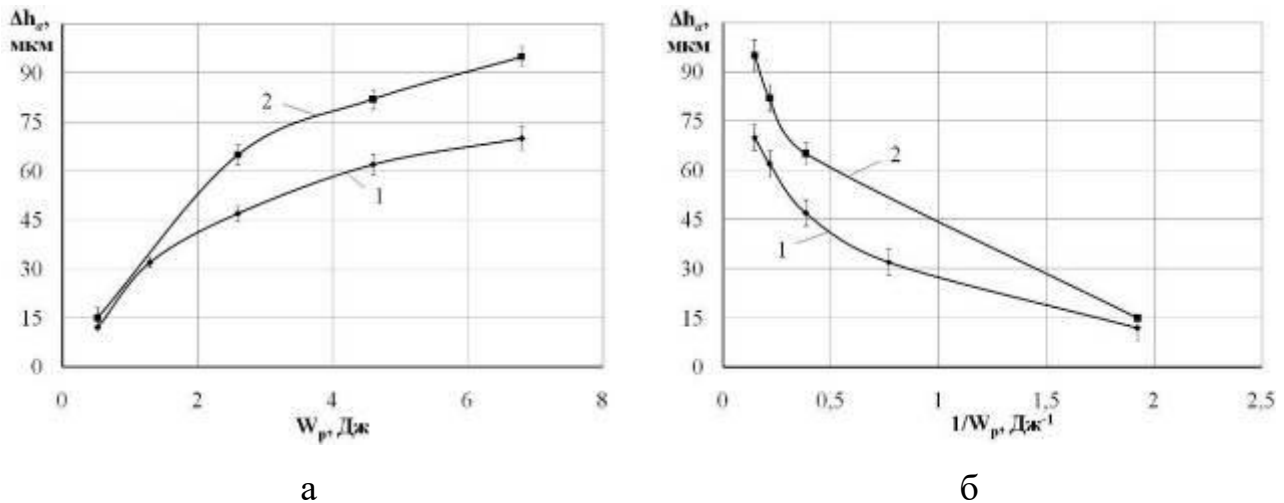
В.М. Одноралов

ДОДАТОК Г

Управління якістю однокомпонентних поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ, із застосуванням СТС

Г.1 Математична модель прогнозування якості поверхневих шарів, отриманих алітуванням методом ЕІЛ

На підставі експериментальних досліджень встановлено, що при алітуванні методом ЕІЛ сталі 20 та 40 (рис. Г.1) зі збільшенням енергії розряду збільшується товщина зміцненого шару (h_a , мкм). Між величинами h_a і зворотною енергією розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta h_a = \Delta h_{a_{max}}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. Г.1, б).

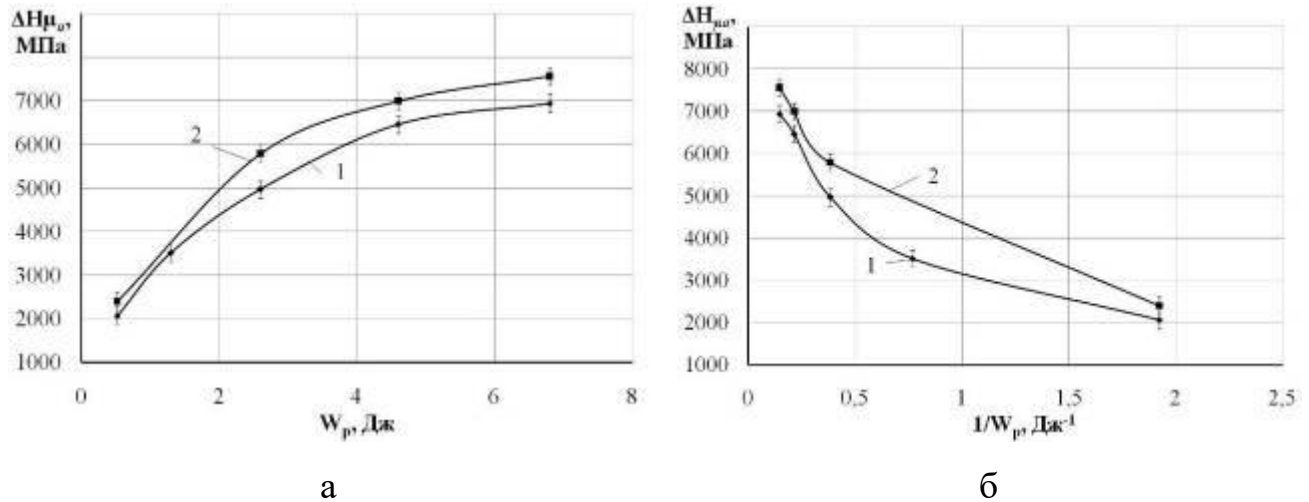


а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок Г.1 – Залежність величини товщини зміцненого шару при алітування методом ЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2)

На рис. Г.2 показана залежність величини твердості зміцненого шару при алітуванні методом ЕІЛ сталі 20 та 40 від енергії розряду: зі збільшенням енергії розряду мікротвердість збільшується. Між мікротвердістю зміцненого шару

$H_{\mu a}$ і величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta H_{\mu a} = \Delta H_{\mu a \max}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. Г.2, б).



а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

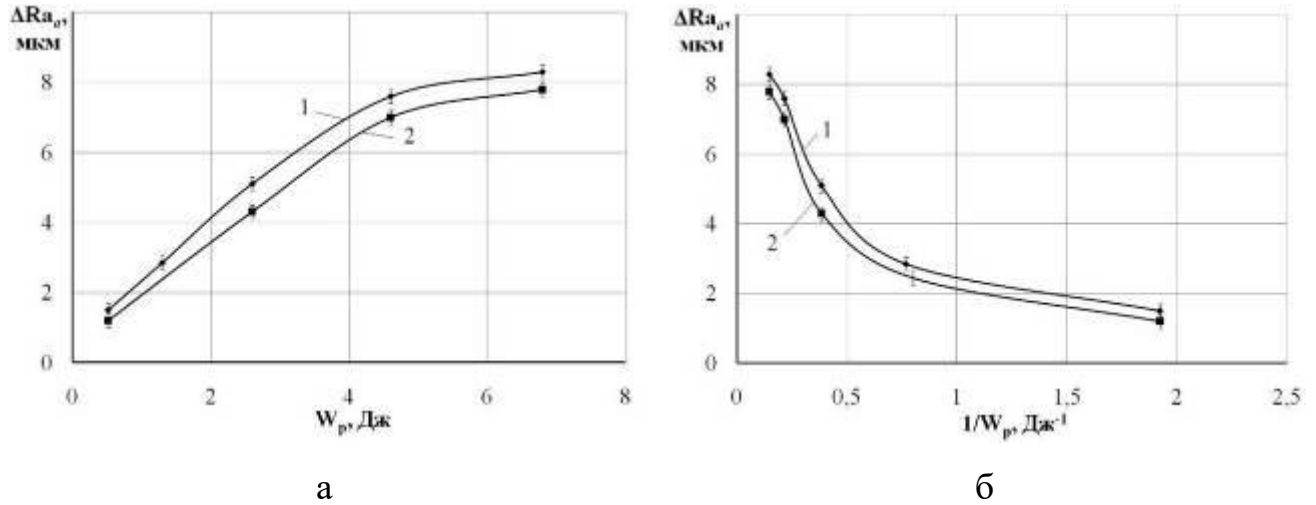
Рисунок Г.2 – Залежність мікротвердості зміцненого шару при алітування методом ЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2)

Між шорсткістю поверхневого шару Ra_a і величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) при алітуванні методом ЕІЛ до періоду, коли $\Delta Ra_a = \Delta Ra_{a \max}$, існує експоненціальна убутна залежність (див. рис. Г.3). З ростом енергії розряду шорсткість поверхні збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації, витрачена на формування шорсткості поверхні $E_{a\Delta Ra}$.

Між суцільністю шару S_a й величиною зворотною енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta S_a = \Delta S_{a \max}$, існує експоненціальна убутна залежність (див. рис. Г.4). З ростом енергії розряду суцільність шару збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації, витрачена на формування суцільності шару $E_{a\Delta S}$.

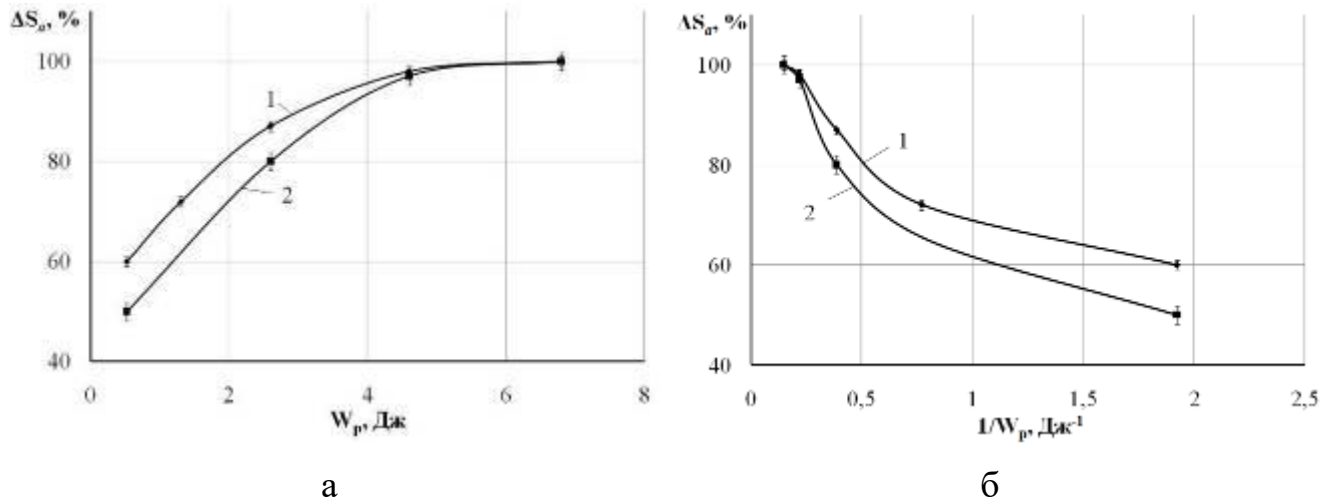
Як показано у розділі 2 режим ЕІЛ, необхідний для отримання потрібної товщини та мікротвердості зміцненого шару, шорсткості або суцільності

поверхневого шару при алітуванні методом ЕІЛ, можна визначити відповідно до рівнянь (2.21), (2.26), (2.31) та (2.36).



а – від розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

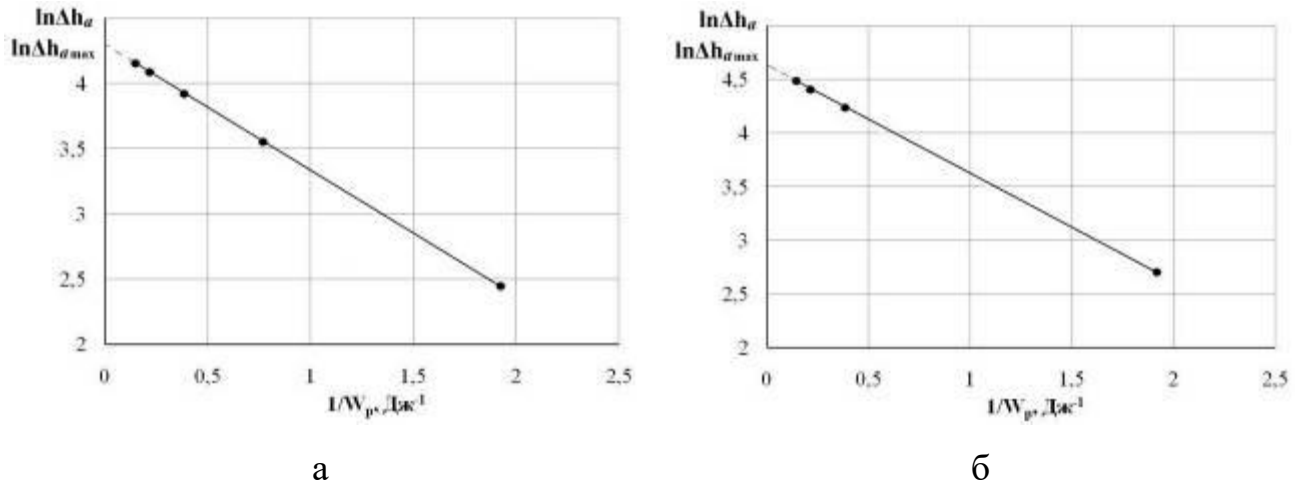
Рисунок Г.3 – Залежність шорсткості поверхні при алітуванні методом ЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2)



а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок Г.4 – Залежність суцільності шару при алітуванні методом ЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2)

Відповідно до рівняння (2.21) між логарифмом значень товщини зміцненого шару і величиною зворотної енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta h_a$ від (W_p^{-1}) .



а – сталь 20; б – сталь 40

Рисунок Г.5 – Залежність $\ln \Delta h_a$ від W_p^{-1} при алітуванні методом ЕІЛ

Як впливає з графіка (рис. Г.5), залежність $\ln \Delta h_a$ від W_p^{-1} при алітуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40 прагне до прямої лінії. Значення тангенсів кутів нахилу прямих до осі абсцис на ділянці експоненціально спадної залежності занесені в табл. Г.1.

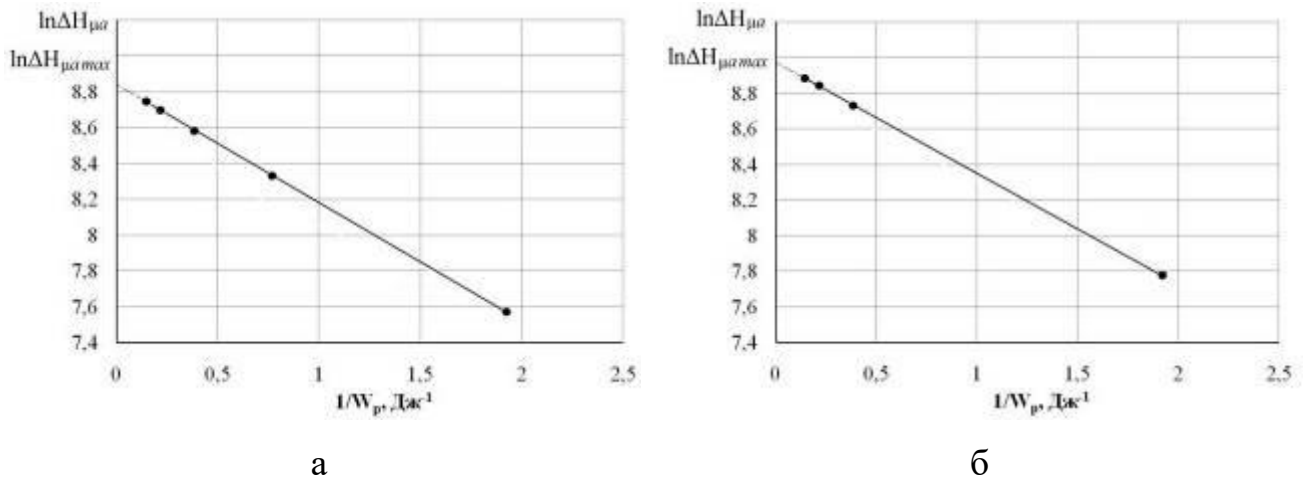
Таблиця Г.1 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{a\Delta h}$) і константи рівняння прогнозування товщини зміцненого шару при алітуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40

Основа	$E_{a\Delta h} = |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	$E_{a\Delta h} = W_p$, Дж	%	$\Delta h_{a \max}$, МКМ
Сталь 20	0,964	0,9637	0,03	73,6
Сталь 40	1,006	1,0061	0,01	102,7

Предекспоненціальний фактор (табл. Г.1) знаходимо по відрізку, який відсікається на осі ординат прямої експоненціально спадної залежності $\ln \Delta h_a$ від W_p^{-1} (рис. Г.5), продовженої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta h_a = \ln \Delta h_{a \max}$ при $W_p^{-1} \rightarrow 0$).

Результати розрахунку енергії активації $E_{a\Delta h}$ (константи рівняння (2.21) прогнозування товщини зміцненого шару при алітуванні методом ЕІЛ), визначені двома способами, перший, коли $E_{a\Delta h} = W_p$, другий – при $E_{a\Delta h} = |tg \alpha|$, занесені до табл. Г.1. Деяку несумісність значень констант ЕІЛ $E_{a\Delta h}$ (до 0,03 %), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівняння (2.26) між логарифмом значень мікротвердості і величиною зворотної енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta H_{\mu a}$ від W_p^{-1} (рис. Г.6).



а – сталь 20; б – сталь 40

Рисунок Г.6 – Залежність $\ln \Delta H_{\mu a}$ від W_p^{-1} при алітуванні методом ЕІЛ

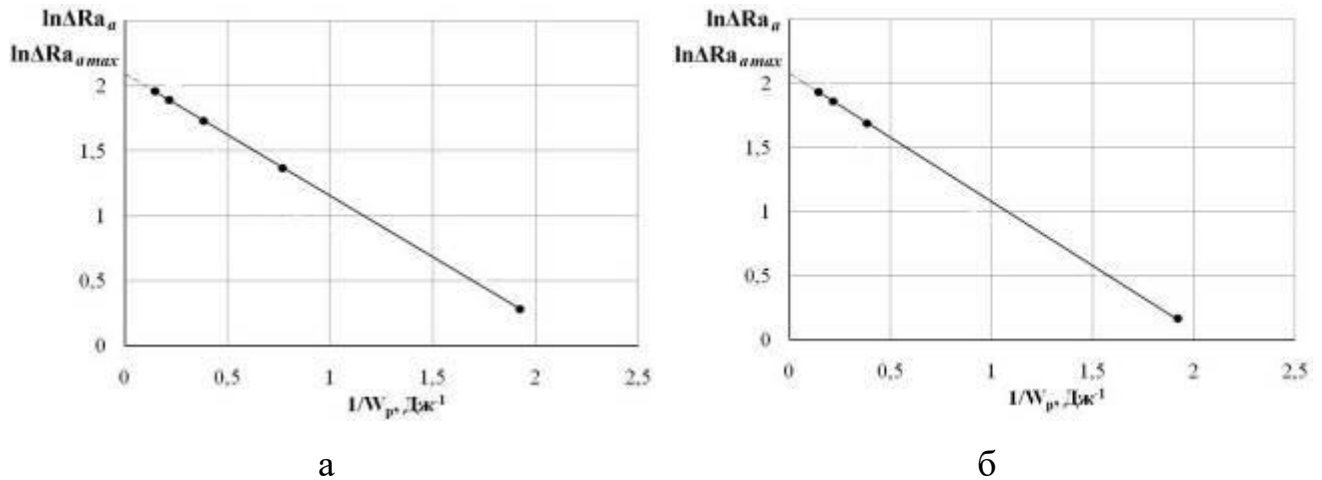
Як впливає з графіка (рис. Г.6), залежність $\ln \Delta H_{\mu a}$ від W_p^{-1} при алітуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40 прагне до прямої лінії. Значення тангенсів кутів нахилу прямих до осі абсцис на ділянці експоненціально спадної залежності занесені в табл. Г.2. Предекспоненціальний фактор знаходимо по відрізьку, який відсікається на осі ординат прямої експоненціально спадної залежності $\ln \Delta H_{\mu a}$ від W_p^{-1} (рис. Г.6), продовженої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta H_{\mu a} = \ln \Delta H_{\mu a \max}$ при $W_p^{-1} \rightarrow 0$).

Таблиця Г.2 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{a\Delta H_{\mu}}$) і константи рівняння прогнозування мікротвердості зміцненого шару при алітуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40

Основа	$E_{a\Delta H_{\mu}} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{a\Delta H_{\mu}} = W_p$, Дж	%	$\Delta H_{\mu a \max}$, МПа
Сталь 20	0,661	0,660	0,15	6921,58
Сталь 40	0,627	0,629	0,3	7906,97

Результати розрахунку енергії активації $E_{a\Delta H_{\mu}}$ (константи рівняння (2.26) прогнозування мікротвердості зміцненого шару при алітуванні методом ЕІЛ), визначені двома способами, перший, коли $E_{a\Delta H_{\mu}} = W_p$, другий – при $E_{a\Delta H_{\mu}} = |tg\alpha|$, занесені в табл. Г.2. Деяку несумісність значень констант ЕІЛ $E_{a\Delta H_{\mu}}$ (до 0,3 %), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівняння шорсткості (2.31) між логарифмом значень шорсткості і величиною зворотною енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta R a_a$ від W_p^{-1} при алітуванні методом ЕІЛ сталі 20 та 40 (рис. Г.7).



а – сталь 20; б – сталь 40

Рисунок Г.7 – Залежність $\ln \Delta Ra_a$ від W_p^{-1} при алітуванні методом ЕІЛ

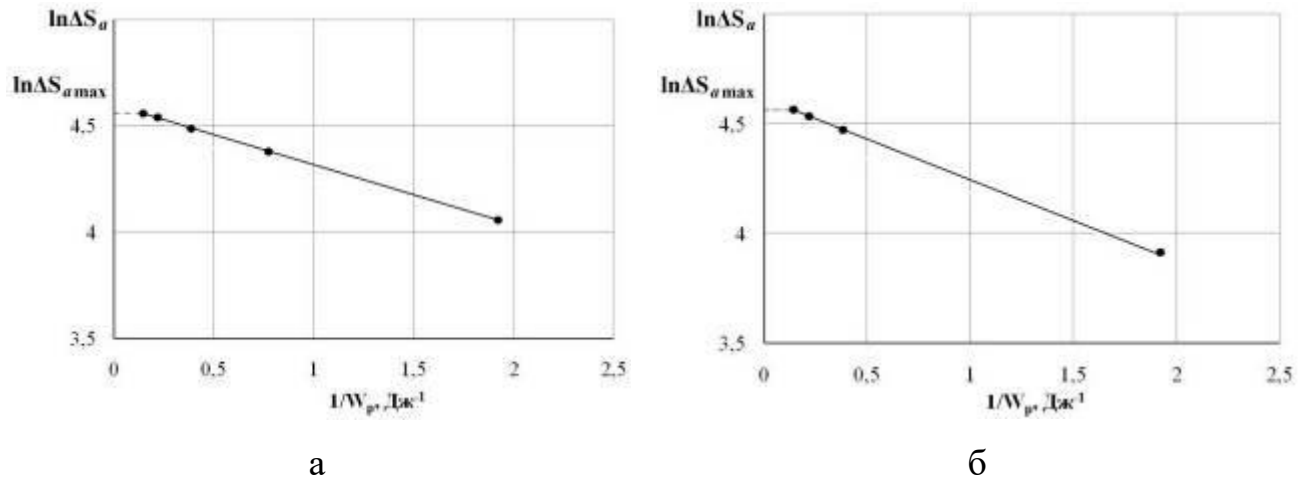
Результати розрахунку константи ΔRa_{amax} та енергії активації $E_{a\Delta Ra}$ (константи рівняння (2.31) прогнозування шорсткості поверхні при алітуванні методом ЕІЛ), визначені двома способами, перший, коли $E_{a\Delta Ra} = W_p$, другий – при $E_{a\Delta Ra} = |tg \alpha|$ занесені в табл. Г.3.

Таблиця Г.3 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{a\Delta Ra}$) і константи рівняння прогнозування шорсткості поверхні при алітуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40

Основа	$E_{a\Delta Ra} = |tg \alpha|$, Дж	$E_{a\Delta Ra} = W_p$	%	ΔRa_{amax} , МКМ
Сталь 20	1,00	0,96	4	8,08
Сталь 40	1,06	1,01	5	7,92

Деяку несумісність (4-5 %) значень констант ЕІЛ ($E_{a\Delta Ra}$), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівняння суцільності (2.36) між логарифмом значень суцільності і зворотною величиною енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta S_a$ від W_p^{-1} при алітуванні методом ЕІЛ сталі 20 та 40 (рис. Г.8).



а – сталь 20; б – сталь 40

Рисунок Г.8 – Залежність $\ln \Delta S_a$ від W_p^{-1} при ЕІЛ алітуванні

Результати розрахунку константи ΔS_{amax} та енергії активації $E_{a\Delta S}$ (константи рівняння (2.36) прогнозування суцільності поверхні при алітуванні методом ЕІЛ), визначені двома способами, перший, коли $E_{a\Delta S} = W_p$, другий – при $E_{a\Delta S} = |tg\alpha|$ занесені в табл. Г.4.

Таблиця Г.4 – Розрахунок константи ЕІЛ ($E_{a\Delta S}$) і константи суцільності шару при алітуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40

Основа	$E_{a\Delta S} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{a\Delta S} = W_p$, Дж	%	ΔS_{amax} , %
Сталь 20	0,285	0,284	0,35	100
Сталь 40	0,373	0,367	1,6	100

Деяку несумісність (до 1,6 %) значень констант ЕІЛ ($E_{a\Delta S}$), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Зведені дані констант ЕІЛ, необхідні для розрахунку параметрів якості поверхневого шару при алітуванні методом ЕІЛ, наведені в табл. Г.5.

Таблиця Г.5 – Зведені дані констант ЕІЛ при алітуванні сталей 20 та 40

Основа	$E_{a\Delta h} = |tg\alpha|$, Дж	Δh_{amax} , мкм	$E_{a\Delta H_\mu}$, Дж	$\Delta H_{\mu amax}$, МПа	$E_{a\Delta Ra}$, Дж	ΔRa_{amax} , мкм	$E_{a\Delta S}$, Дж	ΔS_{amax} , %
Сталь 20	0,964	73,6	0,661	6921,58	1,00	8,08	0,285	100
Сталь 40	1,006	102,7	0,627	7906,97	1,06	7,92	0,373	100

На підставі вище запропонованої математичної моделі (рівняння 2.21-2.36) і методики визначення констант рівнянь прогнозування товщини зміцненого шару (Δh_{amax} та енергії активації $E_{a\Delta h}$ при алітуванні методом ЕІЛ), максимальної мікротвердості поверхневого шару ($\Delta H_{\mu amax}$ та енергії активації $E_{a\Delta H_\mu}$ при алітуванні методом ЕІЛ), максимальної шорсткості (ΔRa_{amax} і енергії $E_{a\Delta Ra}$), а також рівнянь прогнозування суцільності ЕІЛ шару (максимальної суцільності ΔS_{amax} та енергії $E_{a\Delta S}$) при алітуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40, можна скласти алгоритм, що дозволяє прогнозувати основні технологічні параметри ЕІЛ шару для будь-яких матеріалів катоду.

Сутність алгоритму полягає в наступному:

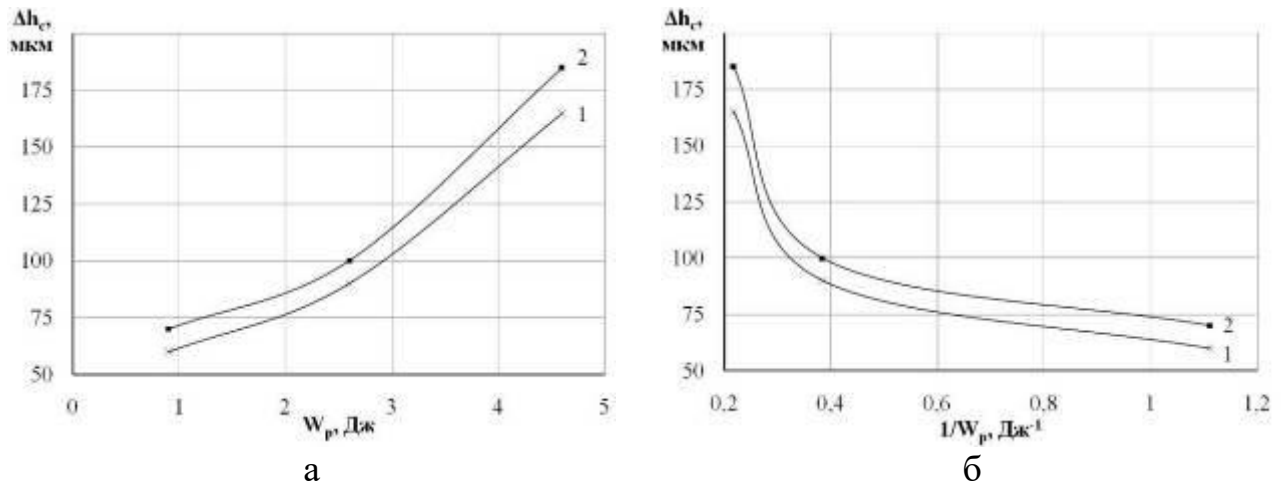
1. Експериментально вимірюється товщина і мікротвердість зміцненого шару, його шорсткість і суцільність, відповідно Δh_a і $\Delta H_{\mu a}$, ΔRa_a і ΔS_a при різних енергіях розряду W_p .
2. Будуються графіки залежності $\ln \Delta h_a$, $\ln \Delta H_{\mu a}$, $\ln \Delta Ra_a$ і $\ln \Delta S_a$ від W_p^{-1} .
3. Визначається критичні енергії розряду (енергії активації) $E_{a\Delta h}$, $E_{a\Delta H_{\mu}}$, $E_{a\Delta Ra}$, $E_{a\Delta S}$, як $|\operatorname{tg}\alpha|$, де α – кут нахилу прямих залежностей $\ln \Delta h_a$, $\ln \Delta H_{\mu a}$, $\ln \Delta Ra_a$ і $\ln \Delta S_a$ від W_p^{-1} .
4. За відрізком, який відсікається на осі ординат прямої, екстрапольованої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta h_a = \ln \Delta h_{a\max}$, $\ln \Delta H_{\mu a} = \ln \Delta H_{\mu a\max}$, $\ln \Delta Ra_a = \ln \Delta Ra_{a\max}$ і $\ln \Delta S_a = \ln \Delta S_{a\max}$).
5. Згідно рівняння (2.39) визначається режим ЕІЛ, необхідний для отримання заданої товщини зміцненого шару, його твердості, шорсткості та суцільності при алітуванні методом ЕІЛ.

Г.2 Математична модель прогнозування якості поверхневих шарів, отриманих методом ЦЕІЛ із застосуванням СТС

На підставі експериментальних досліджень встановлено, що при цементации методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20 та 40 (рис. Г.9) зі збільшенням енергії розряду збільшується товщина зміцненого шару (h_c , мкм). Між величинами h_c і зворотною енергією розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta h_c = \Delta h_{c\max}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. Г.9, б).

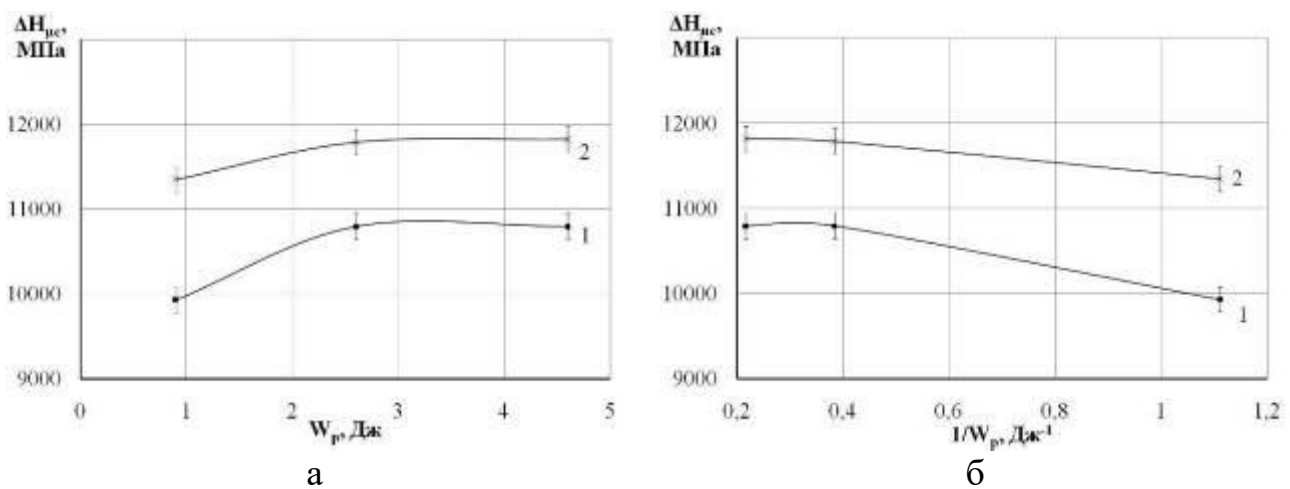
З ростом енергії розряду товщина зміцненого шару при цементации зростає і досягає максимальної величини ($\Delta h_{c\max}$). Крім того, збільшення h_c зміцненого шару зростає тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування

зміцненого шару ($E_{c\Delta h}$). На рис. Г.10 показана залежність величини мікротвердості зміцненого шару при ЦЕІЛ сталі 20 та 40 від енергії розряду: зі збільшенням енергії розряду мікротвердість збільшується. Між мікротвердістю зміцненого шару $H_{\mu c}$ і величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta H_{\mu c} = \Delta H_{\mu c \max}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. Г.10, б).



а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

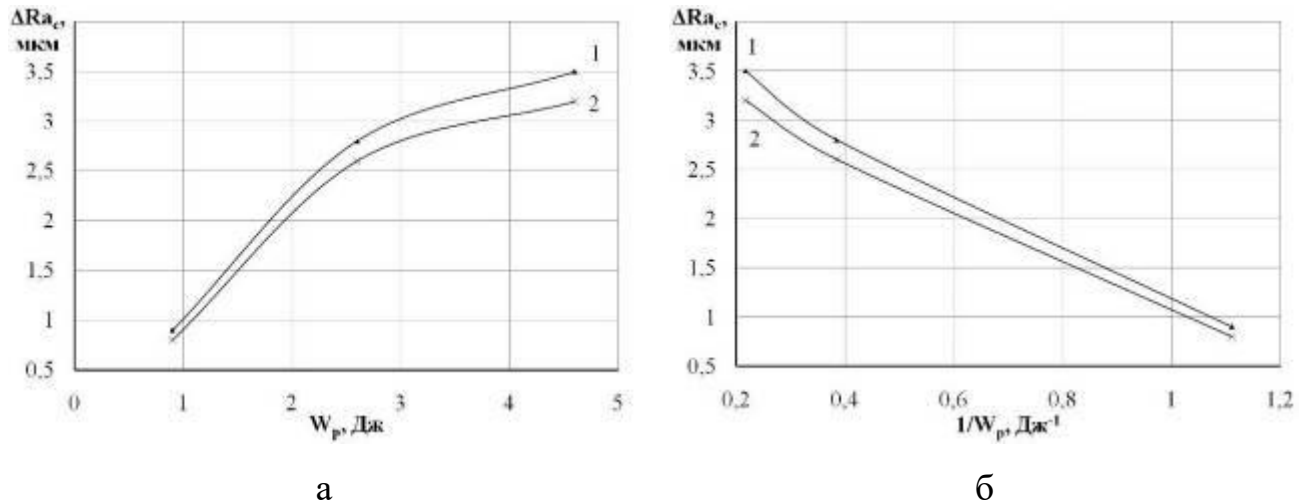
Рисунок Г.9 – Залежність величини товщини зміцненого шару при ЦЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2)



а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок Г.10 – Залежність мікротвердості зміцненого шару при ЦЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2)

Між шорсткістю поверхневого шару Ra_c і величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) при ЦЕІЛ із застосуванням СТС до періоду, коли $\Delta Ra_c = \Delta Ra_{cmax}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. Г.11). З ростом енергії розряду шорсткість поверхні збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації, витрачена на формування шорсткості поверхні $E_{c\Delta Ra}$.



а – від розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок Г.11 – Залежність шорсткості поверхні при ЦЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2)

Режим ЕІЛ, необхідний для отримання потрібної товщини та мікротвердості зміцненого шару, шорсткості або суцільності поверхневого шару при ЦЕІЛ, можна визначити відповідно до рівнянь (2.6), (2.11) та (2.16). (див. розділ 2).

Відповідно до рівняння (2.6) між логарифмом значень товщини зміцненого шару і величиною зворотної енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta h_c$ від (W_p^{-1}). Як випливає з графіка (рис. Г.12), залежність $\ln \Delta h_c$ від W_p^{-1} при ЦЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40 прагне до прямої лінії. Значення тангенсів кутів нахилу прямих до осі абсцис на ділянці експоненціально спадної залежності занесені до табл. Г.6.

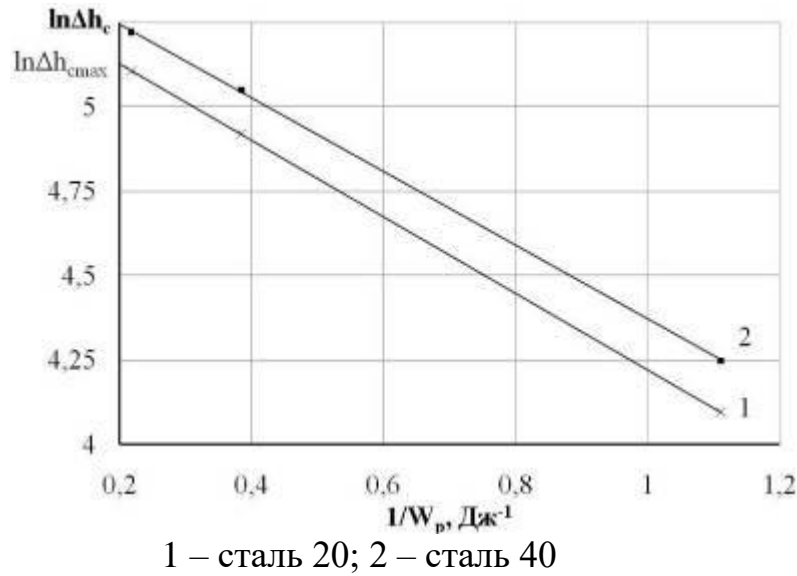


Рисунок Г.12 – Залежність $\ln \Delta h_c$ від W_p^{-1} при ЦЕІЛ

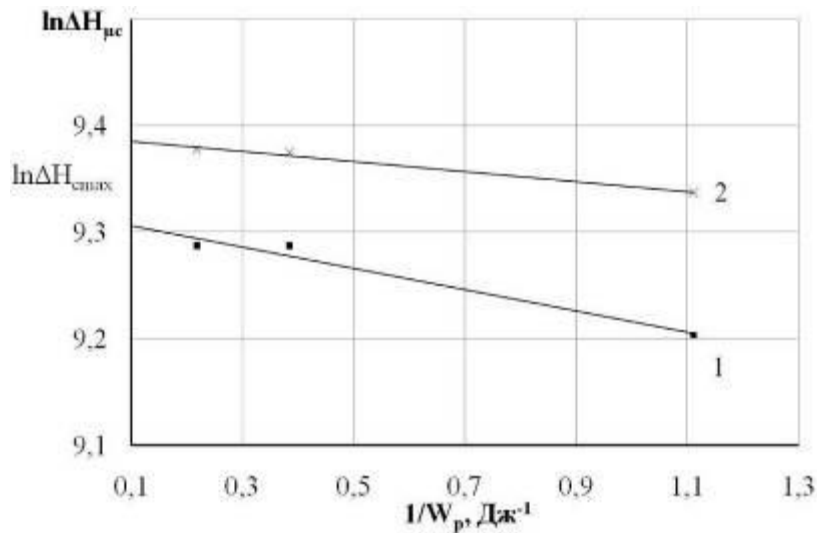
Таблиця Г.6 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{c\Delta h}$) і константи рівняння прогнозування товщини зміцненого шару при ЦЕІЛ сталей 20 та 40

Основа	$E_{c\Delta h} = |tg \alpha|$, Дж	$E_{c\Delta h} = W_p$, Дж	%	$\Delta h_{c\ max}$, МКМ
Сталь 20	1,131	1,133	0,2	211
Сталь 40	1,087	1,092	0,5	235

Предекспоненціальний фактор знаходимо по відрізку, який відсікається на осі ординат прямої експоненціально спадної залежності $\ln \Delta h_c$ від W_p^{-1} (рис. Г.12), продовженої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta h_c = \ln \Delta h_{c\ max}$ при $W_p^{-1} \rightarrow 0$). Результати розрахунку енергії активації $E_{c\Delta h}$ (константи рівняння (2.6) прогнозування товщини зміцненого шару при цементациї методом ЕІЛ), визначені двома способами, перший, коли $E_{c\Delta h} = W_p$, другий – при $E_{c\Delta h} = |tg \alpha|$, занесені до табл. Г.6.

Деяку несумісність значень констант ЕІЛ $E_{c\Delta h}$ (до 0,5 %), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівняння (2.11) між логарифмом значень мікротвердості і величиною зворотної енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta H_{\mu c}$ від W_p^{-1} (рис. Г.13).



1 – сталь 20; 2 – сталь 40

Рисунок Г.13 – Залежність $\ln \Delta H_{\mu c}$ від W_p^{-1} при цементації методом ЕІЛ

Як впливає з графіка (рис. Г.13), залежність $\ln \Delta H_{\mu c}$ від W_p^{-1} при ЦЕІЛ сталей 20 та 40 прагне до прямої лінії. Значення тангенсів кутів нахилу прямих до осі абсцис на ділянці експоненціально спадної залежності занесені до табл. Г.7. Предекспоненціальний фактор знаходимо по відрізку, який відсікається на осі ординат прямої експоненціально спадної залежності $\ln \Delta H_{\mu c}$ від W_p^{-1} (рис. Г.13), продовженої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta H_{\mu c} = \ln \Delta H_{\mu c \max}$ при $W_p^{-1} \rightarrow 0$).

Таблиця Г.7 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{c\Delta H_\mu}$) і константи рівняння прогнозування мікротвердості зміцненого шару при ЦЕІЛ сталей 20 та 40

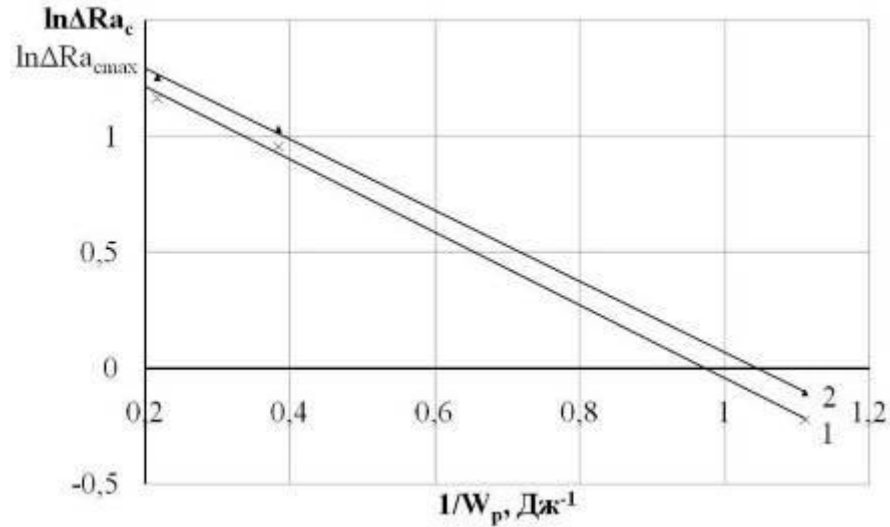
Основа	$E_{c\Delta H_\mu} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{c\Delta H_\mu} = W_p$, Дж	%	$\Delta H_{\mu c \max}$, МПа
Сталь 20	0,094	0,099	5	11114
Сталь 40	0,045	0,047	4	11968

Результати розрахунку енергії активації $E_{c\Delta H_\mu}$ (константи рівняння (2.11) прогнозування мікротвердості зміцненого шару при ЦЕІЛ із застосуванням СТС), визначені двома способами, перший, коли $E_{c\Delta H_\mu} = W_p$, другий – при $E_{c\Delta H_\mu} = |tg\alpha|$, занесені в табл. Г.7. Деяку несумісність значень констант ЕІЛ $E_{c\Delta H_\mu}$ (до 6 %), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівняння шорсткості (2.16) між логарифмом значень шорсткості і величиною зворотною енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta Ra_c$ від W_p^{-1} при ЦЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20 та 40 (рис. Г.14).

Результати розрахунку константи $\Delta Ra_{c \max}$ та енергії активації $E_{c\Delta Ra}$ (константи рівняння (2.16) прогнозування шорсткості поверхні при ЦЕІЛ), визначені двома способами, перший, коли $E_{c\Delta Ra} = W_p$, другий – при $E_{c\Delta Ra} = |tg\alpha|$ занесені до табл. Г.9. Деяку несумісність (біля 3 %) значень констант ЕІЛ ($E_{c\Delta Ra}$), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Зведені дані констант ЦЕІЛ, необхідні для розрахунку параметрів якості поверхневого шару, наведені в табл. Г.10.



1 – сталь 20; 2 – сталь 40

Рисунок Г.14 – Залежність $\ln \Delta Ra_c$ від W_p^{-1} при ЦЕІЛ

Таблиця Г.9 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{c\Delta Ra}$) і константи рівняння прогнозування шорсткості поверхні при ЦЕІЛ сталей 20 та 40

Основа	$E_{c\Delta Ra} = |tg \alpha|$, Дж	$E_{c\Delta Ra} = W_p$	%	ΔRa_{cmax} , мкм
Сталь 20	1,551	1,532	1,2	4,95
Сталь 40	1,519	1,572	3,4	4,61

Таблиця Г.10 – Зведені дані констант ЦЕІЛ сталей 20 та 40

Основа	$E_{c\Delta h} = |tg \alpha|$, Дж	Δh_{cmax} , мкм	$E_{c\Delta H_\mu} = |tg \alpha|$, Дж	$\Delta H_{\mu cmax}$, МПа	$E_{c\Delta Ra} = |tg \alpha|$, Дж	ΔRa_{cmax} , мкм
Сталь 20	1,131	211	0,093	11114	1,551	4,95
Сталь 40	1,087	235	0,045	11968	1,519	4,61

На підставі вище запропонованої математичної моделі (рівняння 2.6-2.16 розділу 2) і методики визначення констант рівнянь прогнозування товщини зміцненого шару (Δh_{cmax} та енергії активації $E_{c\Delta h}$), максимальної мікротвердості поверхневого шару ($\Delta H_{\mu cmax}$ та енергії активації $E_{c\Delta H_{\mu}}$), максимальної шорсткості (ΔRa_{cmax} і енергії $E_{c\Delta Ra}$) при ЦЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40, можна скласти алгоритм, що дозволяє прогнозувати основні технологічні параметри ЕІЛ шару для будь-яких матеріалів катоду.

Сутність алгоритму полягає в наступному:

1. Експериментально вимірюється товщина, мікротвердість зміцненого шару і його шорсткість, відповідно Δh_c , $\Delta H_{\mu c}$ і ΔRa_c при різних енергіях розряду W_p .

2. Будуються графіки залежності $\ln \Delta h_c$, $\ln \Delta H_{\mu c}$, $\ln \Delta Ra_c$ від W_p^{-1} .

3. Визначається критичні енергії розряду (енергії активації) $E_{c\Delta h}$, $E_{c\Delta H_{\mu}}$, $E_{c\Delta Ra}$, як $|\operatorname{tg}\alpha|$, де α – кут нахилу прямих залежностей $\ln \Delta h_c$, $\ln \Delta H_{\mu c}$, $\ln \Delta Ra_c$ від W_p^{-1} .

4. За відрізком, який відсікається на осі ординат прямої, екстрапольованої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta h_c = \ln \Delta h_{cmax}$, $\ln \Delta H_{\mu c} = \ln \Delta H_{\mu cmax}$, $\ln \Delta Ra_c = \ln \Delta Ra_{cmax}$).

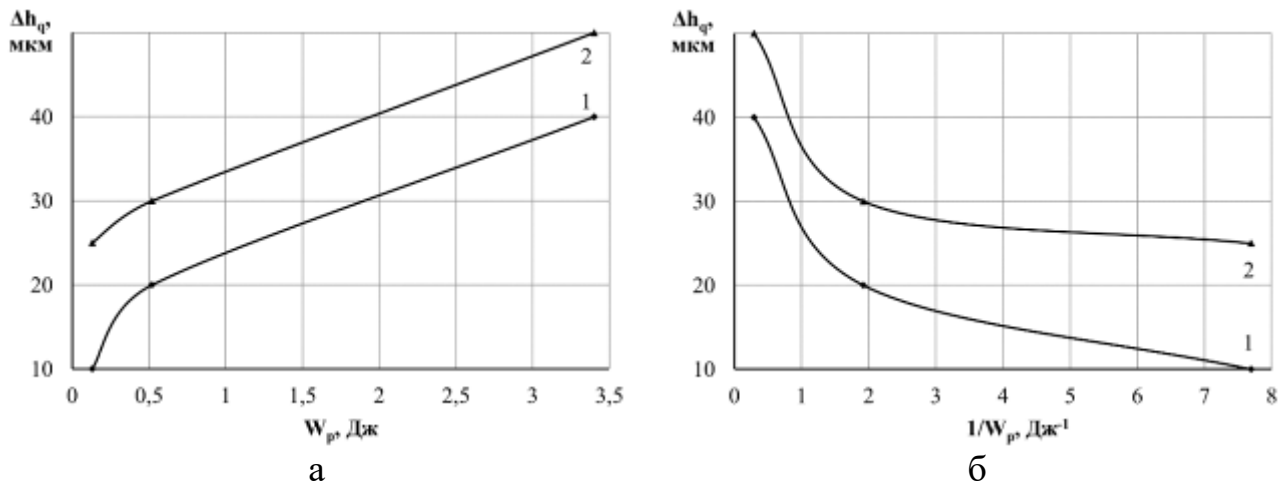
5. Згідно рівняння (2.19) визначається режим ЕІЛ, необхідний для отримання заданої товщини зміцненого шару, його твердості та шорсткості поверхні при ЦЕІЛ із застосуванням СТС.

Г.3 Математична модель прогнозування якості азотованих поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ

На підставі експериментальних досліджень встановлено, що при азотуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20 та 40 (рис. Г.15) зі збільшенням енергії розряду збільшується товщина зміцненого шару (h_q , мкм).

Між величинами h_q і зворотною енергією розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta h_q = \Delta h_{qmax}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. Г.15, б).

З ростом енергії розряду товщина зміцненого шару при азотуванні зростає і досягає максимальної величини (Δh_{qmax}). Крім того, збільшення h_q зміцненого шару зростає тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування зміцненого шару ($E_{q\Delta h}$).



а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

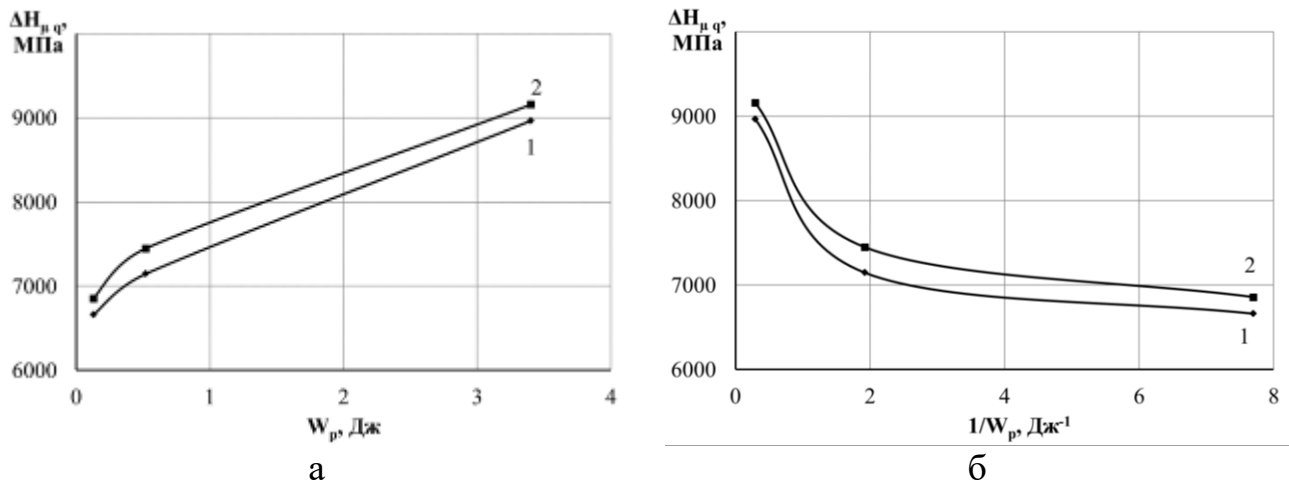
Рисунок Г.15 – Залежність величини товщини зміцненого шару при азотуванні методом ЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2)

Отримане рівняння прогнозування товщини зміцненого шару при азотуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС:

$$\Delta h_q = \Delta h_{qmax} \cdot e^{\frac{-E_q \Delta h}{W_p}} \quad (\Gamma.1)$$

На рис. Г.16 показана залежність величини мікротвердості зміцненого шару при азотуванні методом ЕІЛ сталі 20 та 40 від енергії розряду: зі збільшенням енергії розряду мікротвердість збільшується. Між мікротвердістю зміцненого шару $H_{\mu q}$ і величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta H_{\mu q} = \Delta H_{\mu q max}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. Г.16, б).

З ростом енергії розряду мікротвердість зміцненого шару, у період до досягнення максимальної мікротвердості ($\Delta H_{\mu q max}$), збільшується тим сильніше, чим більше енергія розряду, витрачена на формування зміцненого шару. Крім того, збільшення $\Delta H_{\mu q}$ зміцненого шару зростає тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування зміцненого шару ($E_{q \Delta H_{\mu}}$).



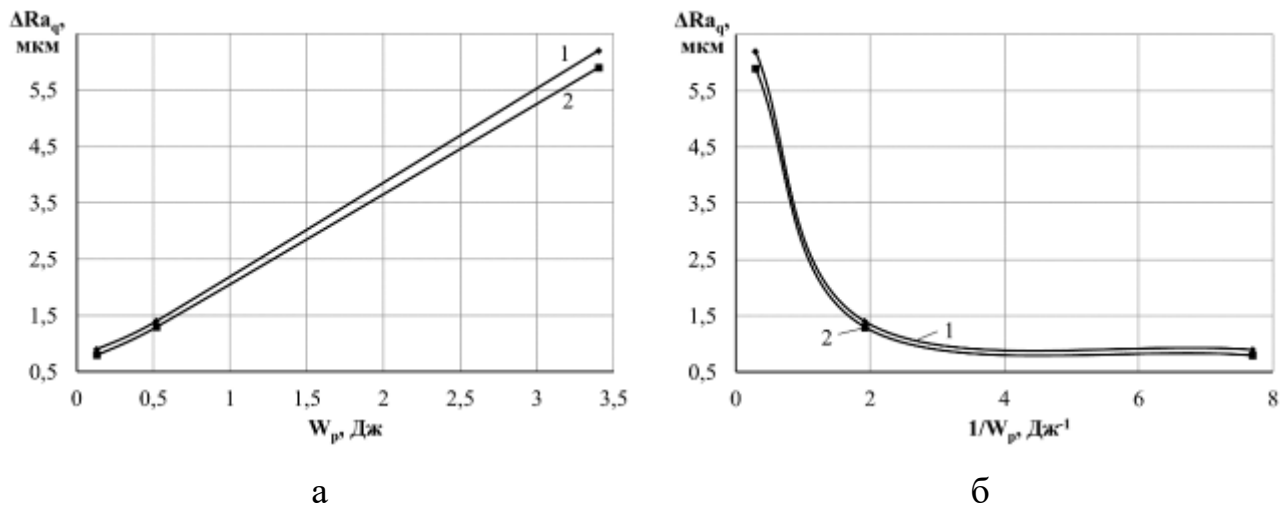
а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок Г.16 – Залежність мікротвердості зміцненого шару при азотуванні методом ЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2)

Отримане рівняння прогнозування мікротвердості зміцненого шару при азотуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС:

$$\Delta H_{\mu q} = \Delta H_{\mu q \max} \cdot e^{\frac{-E_q \Delta H_{\mu}}{W_p}} \quad (\Gamma.2)$$

Між шорсткістю поверхневого шару Ra_q і величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) при азотуванні методом ЕІЛ до періоду, коли $\Delta Ra_q = \Delta Ra_{q \max}$, існує експоненціальна убутна залежність (див. рис. Г.17). З ростом енергії розряду шорсткість поверхні збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації, витрачена на формування шорсткості поверхні $E_{q \Delta Ra}$.



а – від розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок Г.17 – Залежність шорсткості поверхні при азотуванні методом ЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2)

Отримане рівняння прогнозування шорсткості поверхні при азотуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС:

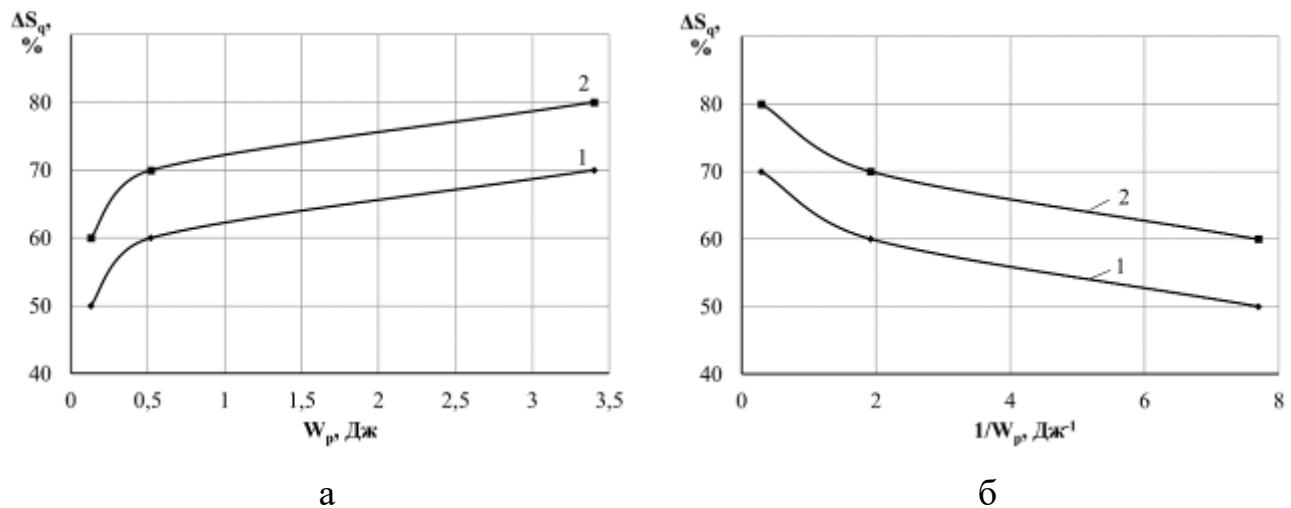
$$\Delta Ra_q = \Delta Ra_{q \max} \cdot e^{\frac{-E_q \Delta Ra}{W_p}} \quad (\Gamma.3)$$

Між суцільністю шару S_q й величиною зворотною енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta S_q = \Delta S_{qmax}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. Г.18).

Отримане рівняння прогнозування суцільності шару при азотуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС:

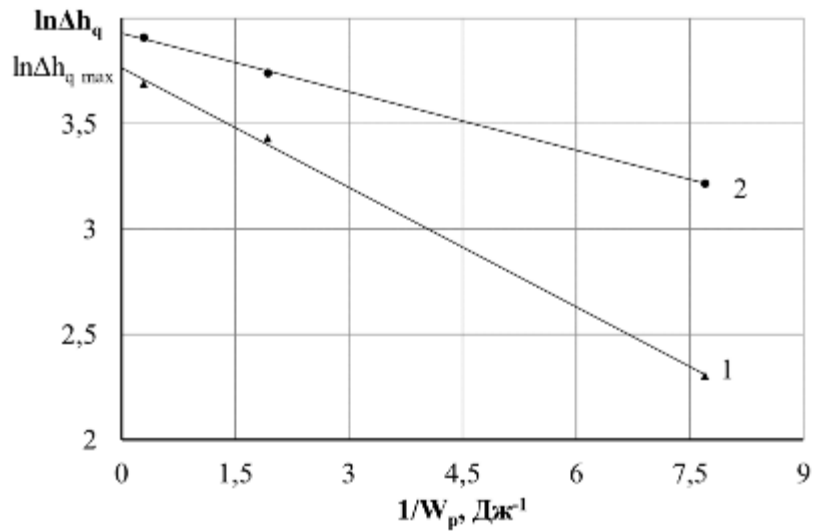
$$\Delta S_q = \Delta S_{qmax} \cdot e^{\frac{-E_q \Delta S}{W_p}} \quad (\text{Г.4})$$

Відповідно до рівняння (Г.1) між логарифмом значень товщини зміцненого шару і величиною зворотної енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta h_q$ від (W_p^{-1}) (рис. Г.19). Залежність $\ln \Delta h_q$ від W_p^{-1} при азотуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40 прагне до прямої лінії. Значення тангенсів кутів нахилу прямих до осі абсцис на ділянці експоненціально спадної залежності занесені до табл. Г.11.



а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок Г.18 – Залежність суцільності шару при азотуванні методом ЕІЛ сталей 20 (1) та 40 (2)



1 – сталь 20; 2 – сталь 40

Рисунок Г.19 – Залежність $\ln \Delta h_q$ від W_p^{-1} при азотуванні методом ЕІЛ

Таблиця Г.11 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{q\Delta h}$) і константи рівняння прогнозування товщини зміцненого шару при азотуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40

Основа	$E_{q\Delta h} = |tg \alpha|$, Дж	$E_{q\Delta h} = W_p$, Дж	%	$\Delta h_{q\max}$, МКМ
Сталь 20	0,190	0,189	1	43
Сталь 40	0,094	0,092	2	52

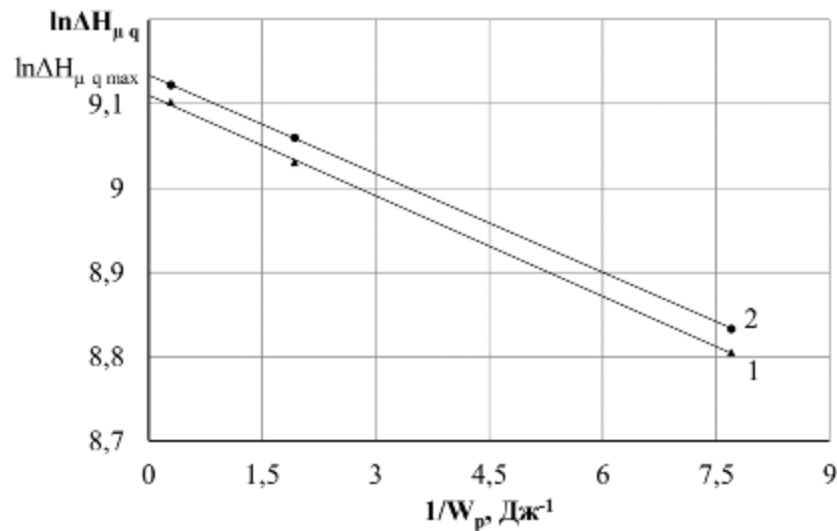
Предекспоненціальний фактор (табл. Г.11) знаходимо по відрізьку, який відсікається на осі ординат прямої експоненціально спадної залежності $\ln \Delta h_q$ від W_p^{-1} (рис. Г.19), продовженої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta h_q = \ln \Delta h_{q\max}$ при $W_p^{-1} \rightarrow 0$).

Результати розрахунку енергії активації $E_{q\Delta h}$ (константи рівняння (Г.1) прогнозування товщини зміцненого шару при азотуванні методом ЕІЛ),

визначені двома способами, перший, коли $E_{q\Delta h} = W_p$, другий – при $E_{q\Delta h} = |\operatorname{tg} \alpha|$, занесені до табл. Г.11. Деяку несумісність значень констант ЕІЛ $E_{q\Delta h}$ (до 2 %), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівняння (Г.2) між логарифмом значень мікротвердості і величиною зворотною енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta H_{\mu q}$ від W_p^{-1} (рис. Г.20). Залежність $\ln \Delta H_{\mu q}$ від W_p^{-1} при азотуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40 прагне до прямої лінії. Значення тангенсів кутів нахилу прямих до осі абсцис на ділянці експоненціально спадної залежності занесені до табл. Г.12.

Предекспоненціальний фактор (табл. Г.12) знаходимо по відрізку, який відсікається на осі ординат прямої експоненціально спадної залежності $\ln \Delta H_{\mu q}$ від W_p^{-1} (рис. Г.20), продовженої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta H_{\mu q} = \ln \Delta H_{\mu q \max}$ при $W_p^{-1} \rightarrow 0$).



1 – сталь 20; 2 – сталь 40

Рисунок Г.20 – Залежність $\ln \Delta H_{\mu q}$ від W_p^{-1} при азотуванні методом ЕІЛ

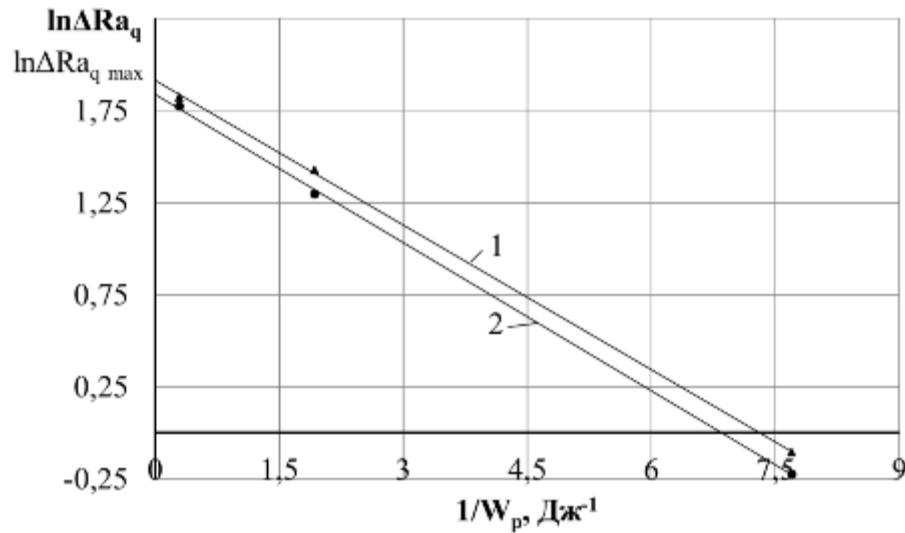
Таблиця Г.12 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{q\Delta H_\mu}$) і константи рівняння прогнозування мікротвердості зміцненого шару при азотуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40

Основа	$E_{q\Delta H_\mu} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{q\Delta H_\mu} = W_p$, Дж	%	$\Delta H_{\mu q max}$, МПа
Сталь 20	0,040	0,039	3	9050
Сталь 40	0,039	0,038	3	9265

Результати розрахунку енергії активації $E_{q\Delta H_\mu}$ (константи рівняння (Г.2) прогнозування мікротвердості зміцненого шару при азотуванні методом ЕІЛ), визначені двома способами, перший, коли $E_{q\Delta H_\mu} = W_p$, другий – при $E_{q\Delta H_\mu} = |tg\alpha|$, занесені до табл. Г.12. Деяку несумісність значень констант ЕІЛ $E_{q\Delta H_\mu}$ (до 3 %), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівняння шорсткості (Г.3) між логарифмом значень шорсткості і величиною зворотною енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta Ra_q$ від W_p^{-1} при азотуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20 та 40 (рис. Г.21).

Результати розрахунку константи ΔRa_{qmax} та енергії активації $E_{q\Delta Ra}$ (константи рівняння (Г.3) прогнозування шорсткості поверхні при азотуванні методом ЕІЛ), визначені двома способами, перший, коли $E_{q\Delta Ra} = W_p$, другий – при $E_{q\Delta Ra} = |tg\alpha|$ занесені до табл. Г.13. Деяку несумісність (до 5 %) значень констант ЕІЛ ($E_{q\Delta Ra}$), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.



1 – сталь 20; 2 – сталь 40

Рисунок Г.21 – Залежність $\ln \Delta Ra_q$ від W_p^{-1} при азотуванні методом ЕІЛ

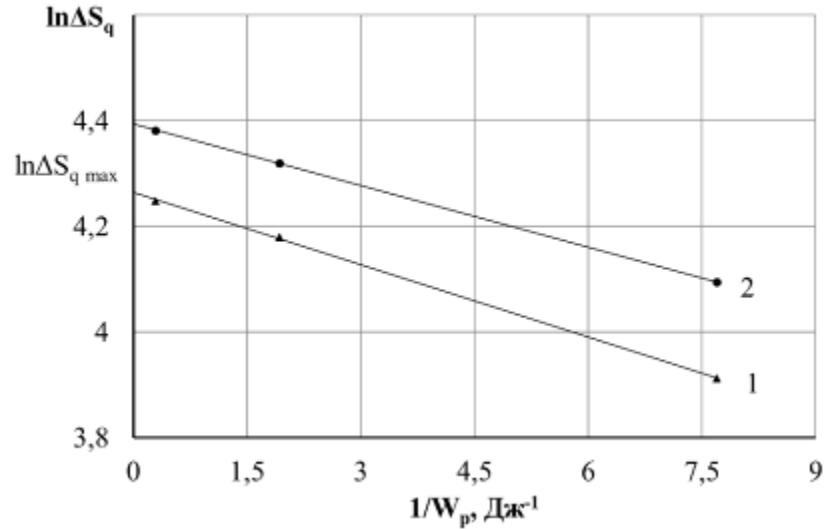
Таблиця Г.13 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{q\Delta Ra}$) і константи рівняння прогнозування шорсткості поверхні при азотуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40

Основа	$E_{q\Delta Ra} = |tg \alpha|$, Дж	$E_{q\Delta Ra} = W_p$, Дж	%	ΔRa_{qmax} , мкм
Сталь 20	0,260	0,268	3	6,28
Сталь 40	0,276	0,260	5	6,79

Відповідно до рівняння суцільності (Г.4) між логарифмом значень суцільності шару і зворотною величиною енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta S_q$ від W_p^{-1} при азотуванні методом ЕІЛ сталі 20 та 40 (рис. Г.22).

Результати розрахунку константи ΔS_{qmax} та енергії активації $E_{q\Delta S}$ (константи рівняння (Г.4) прогнозування суцільності поверхні при азотуванні

методом ЕІЛ), визначені двома способами, перший, коли $E_{q\Delta S} = W_p$, другий – при $E_{q\Delta S} = |tg\alpha|$ занесені до табл. Г.14.



1 – сталь 20; 2 – сталь 40

Рисунок Г.22 – Залежність $\ln \Delta S_q$ від W_p^{-1} при ЕІЛ азотуванні

Таблиця Г.14 – Розрахунок константи ЕІЛ ($E_{q\Delta S}$) і константи суцільності шару при азотуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40

Основа	$E_{q\Delta S} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{q\Delta S} = W_p$, Дж	%	ΔS_{qmax} , %
Сталь 20	0,045	0,046	2	72
Сталь 40	0,038	0,039	3	82

Деяку несумісність (до 3 %) значень констант ЕІЛ ($E_{q\Delta S}$), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Зведені дані констант ЕІЛ, необхідні для розрахунку параметрів якості поверхневого шару, наведені в табл. Г.15.

Таблиця Г.15 – Зведені дані констант ЕІЛ при азотуванні сталей 20 та 40

Підклад-ка	$E_{q\Delta h} = |\operatorname{tg}\alpha|$, Дж	Δh_{qmax} , МКМ	$E_{q\Delta H_\mu} = |\operatorname{tg}\alpha|$, Дж	$\Delta H_{\mu qmax}$, МПа	$E_{q\Delta Ra} = |\operatorname{tg}\alpha|$, Дж	ΔRa_{qmax} , МКМ	$E_{q\Delta S} = |\operatorname{tg}\alpha|$, Дж	ΔS_{qmax} , %
Сталь 20	0,190	43	0,040	9050	0,260	6,28	0,045	72
Сталь 40	0,094	52	0,039	9265	0,276	6,79	0,038	82

На підставі вище запропонованої математичної моделі (рівняння Г.1-Г.4) і методики визначення констант рівнянь прогнозування товщини азотованого шару (Δh_{qmax} та енергії активації $E_{q\Delta h}$ при азотуванні методом ЕІЛ), максимальної мікротвердості поверхневого шару ($\Delta H_{\mu qmax}$ та енергії активації $E_{q\Delta H_\mu}$), максимальної шорсткості поверхні (ΔRa_{qmax} і енергії $E_{q\Delta Ra}$) та максимальної суцільності шару (ΔS_{qmax} і енергії $E_{q\Delta S}$) при азотуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40, можна скласти алгоритм, що дозволяє прогнозувати основні технологічні параметри ЕІЛ шару для будь-яких матеріалів катоду.

Сутність алгоритму полягає в наступному:

1. Експериментально вимірюється товщина, мікротвердість зміцненого шару, його шорсткість і суцільність, відповідно Δh_q , $\Delta H_{\mu q}$, ΔRa_q і ΔS_q при різних енергіях розряду W_p .

2. Будуються графіки залежності $\ln \Delta h_q$, $\ln \Delta H_{\mu q}$, $\ln \Delta Ra_q$, $\ln \Delta S_q$ від W_p^{-1} .

3. Визначається критичні енергії розряду (енергії активації) $E_{q\Delta h}$, $E_{q\Delta H_\mu}$, $E_{q\Delta Ra}$, $E_{q\Delta S}$ як $|\operatorname{tg}\alpha|$, де α – кут нахилу прямих залежностей $\ln \Delta h_q$, $\ln \Delta H_{\mu q}$, $\ln \Delta Ra_q$, $\ln \Delta S_q$ від W_p^{-1} .

4. За відрізком, який відсікається на осі ординат прямої, екстрапольованої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta h_q = \ln \Delta h_{q \max}$, $\ln \Delta H_{\mu q} = \ln \Delta H_{\mu q \max}$, $\ln \Delta Ra_q = \ln \Delta Ra_{q \max}$, $\ln \Delta S_q = \ln \Delta S_{q \max}$).

5. Згідно рівняння (5.17) визначається режим ЕІЛ, необхідний для отримання заданої товщини зміцненого шару, його твердості, шорсткості поверхні та суцільності при азотуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС.

ДОДАТОК Д

Управління якістю багатокомпонентних поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ, із застосуванням СТС

Д.1 Математична модель прогнозування якості сульфоцементованих шарів, отриманих методом ЕІЛ

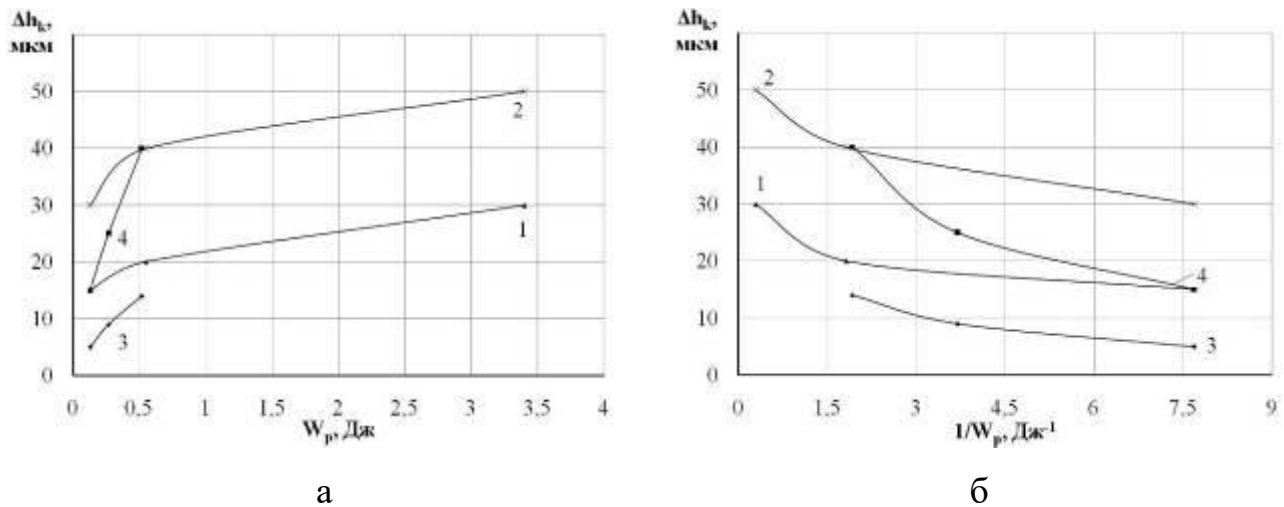
Одним з актуальних завдань машинобудування – отримання високоякісних поверхонь і покриттів деталей при їх виготовленні. Сульфоцементация методом ЕІЛ може ефективно застосовуватися для підвищення терміну служби деталей машин, що швидко зношуються. Відсутність математичної моделі, що дозволяє кількісно описати експериментальні залежності при сульфоцементации методом ЕІЛ, в даний час пояснюється складністю електро-фізико-хімічних процесів, що відбуваються при реалізації процесу. Це ускладнює вибір режимів обробки і знижує ефективність застосування процесу сульфоцементации методом ЕІЛ у виробництві та відтворюваність результатів процесу.

Нами запропонована математична модель управління якістю поверхневих шарів деталей при виконанні процесу сульфоцементации методом ЕІЛ, що дозволяє за енергетичними параметрами обладнання прогнозувати якісні показники формованого поверхневого шару, а також вирішувати зворотну задачу – визначати необхідні режими ЕІЛ при сульфоцементации для забезпечення необхідної якості поверхні. Розроблено методику, що дозволяє встановлювати критерії оцінки альтернативних варіантів способів сульфоцементации методом ЕІЛ поверхневих шарів необхідної якості і вибору найбільш раціонального.

На підставі експериментальних досліджень встановлено, що при сульфоцементации методом ЕІЛ сталі 20 та 40 (рис. Д.1) зі збільшенням енергії розряду збільшується товщина шару зниженої мікротвердості так і зміцненого

шару ($h_{км}$ і $h_{кз}$, мкм, відповідно). Між величинами $h_{км}$, $h_{кз}$ і зворотною енергією розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta h_{км} = \Delta h_{км max}$ та $\Delta h_{кз} = \Delta h_{кз max}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. Д.1, б).

З ростом енергії розряду товщина шару зниженої мікротвердості і зміцненого шару зростає і досягає максимальної величини ($\Delta h_{км max}$ і $\Delta h_{кз max}$). Крім того, збільшення $h_{км}$ і $h_{кз}$ тим сильніше, чим більше енергія активації процесу їх формування ($E_{к\Delta h}$).



а – від енергії розряду W_p ; б – від зворотної величини енергії розряду $1/W_p$;

1 – сталь 20, шар зниженої мікротвердості; 2 – сталь 20, зміцнений шар;

3 – сталь 40, шар зниженої мікротвердості; 4 – сталь 40, зміцнений шар;

Рисунок Д.1 – Залежність товщини шару зниженої мікротвердості та зміцненого шарів при сульфоцементатії методом ЕІЛ

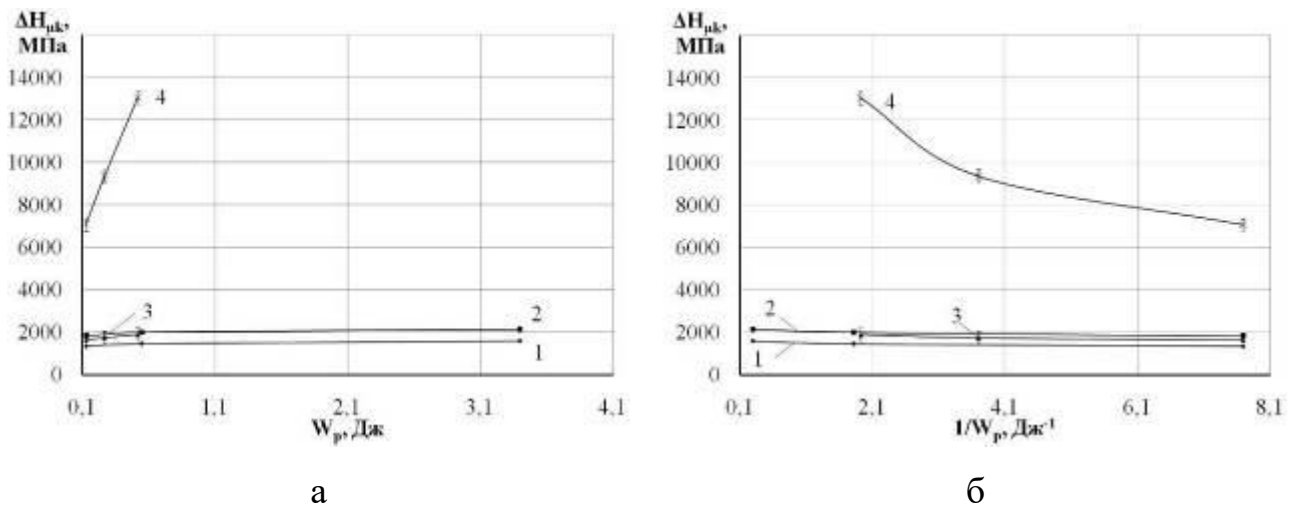
Рівняння прогнозування товщини шару зниженої мікротвердості при сульфоцементатії методом ЕІЛ:

$$\Delta h_{км} = \Delta h_{км max} \cdot e^{\frac{-E_{\Delta h}}{W_p}} \quad (Д.1)$$

Аналогічно для зміцненого шару при сульфоцементациї методом ЕІЛ рівняння (Д.1) приймає вигляд:

$$\Delta h_{kз} = \Delta h_{kзmax} \cdot e^{\frac{-E_k \Delta h}{W_p}} \quad (Д.2)$$

На рис. Д.2 показана залежність величини твердості шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару при сульфоцементациї методом ЕІЛ сталі 20 та 40 від енергії розряду: зі збільшенням енергії розряду мікротвердість обох шарів збільшується. Між мікротвердістю $H_{\mu k}$ і величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta H_{\mu km} = \Delta H_{\mu km max}$ і $\Delta H_{\mu kз} = \Delta H_{\mu kзmax}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. Д.2, б).



а – від енергії розряду W_p ; б – від зворотної величини енергії розряду $1/W_p$;

1 – сталь 20, шар зниженої мікротвердості; 2 – сталь 20, зміцнений шар;

3 – сталь 40, шар зниженої мікротвердості; 4 – сталь 40, зміцнений шар

Рисунок Д.2 – Залежність мікротвердості шару зниженої мікротвердості та зміцненого шарів при сульфоцементациї методом ЕІЛ

З ростом енергії розряду мікротвердість шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару, у період до досягнення максимальної мікротвердості

($\Delta H_{\mu kmmax}$ і $\Delta H_{\mu kzmax}$, відповідно), збільшується тим сильніше, чим більше енергія розряду, витрачена на формування відповідного шару. Крім того, $H_{\mu k}$ зростає тим сильніше, чим більше енергія активації ($E_{k\Delta H_{\mu}}$).

Рівняння прогнозування мікротвердості шару зниженої мікротвердості при сульфоцементатії методом ЕІЛ:

$$\Delta H_{\mu km} = \Delta H_{\mu kmmax} \cdot e^{\frac{-E_{k\Delta H_{\mu}}}{W_p}} . \quad (Д.3)$$

Аналогічно для зміцненого шару рівняння (Д.3) приймає вигляд:

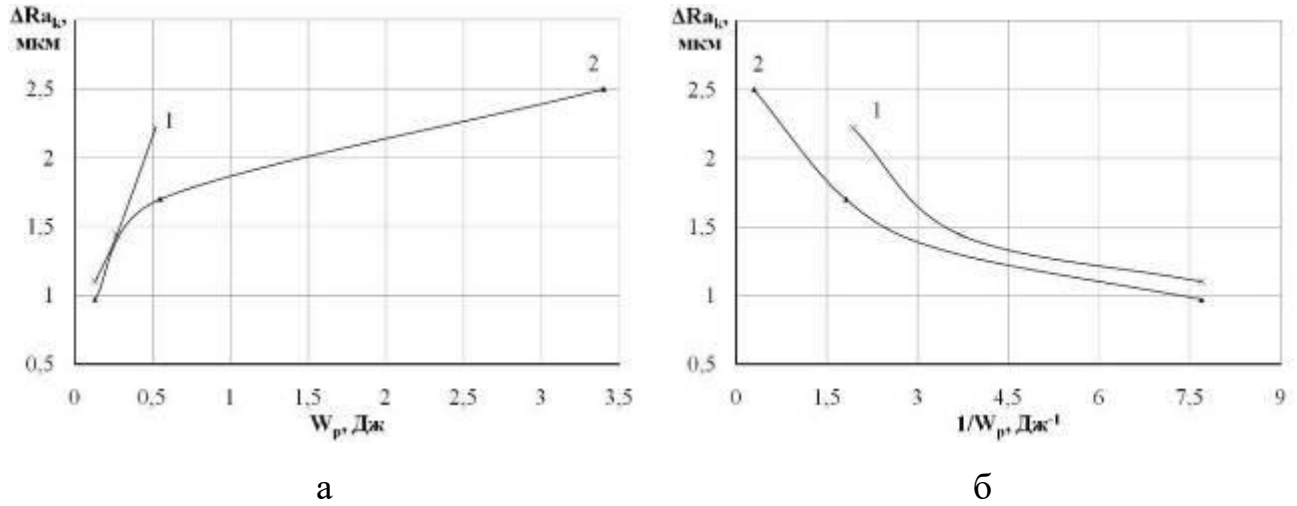
$$\Delta H_{\mu kz} = \Delta H_{\mu kzmax} \cdot e^{\frac{-E_{k\Delta H_{\mu}}}{W_p}} . \quad (Д.4)$$

Між шорсткістю поверхні Ra_k і величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) при сульфоцементатії методом ЕІЛ до періоду, коли $\Delta Ra_k = \Delta Ra_{kmax}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. Д.3). З ростом енергії розряду шорсткість поверхні збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації, витрачена на формування шорсткості поверхні $E_{k\Delta Ra}$.

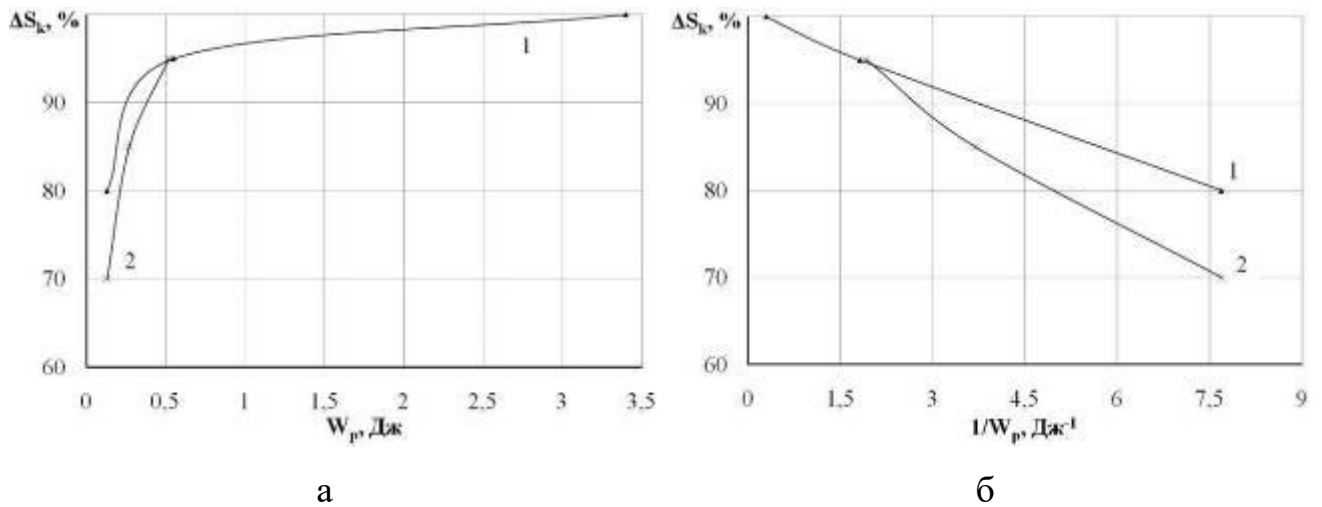
Рівняння прогнозування шорсткості поверхні при сульфоцементатії методом ЕІЛ із застосуванням СТС:

$$\Delta Ra_k = \Delta Ra_{kmax} \cdot e^{\frac{-E_{k\Delta Ra}}{W_p}} . \quad (Д.5)$$

Між суцільністю шару S_k й величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta S_k = \Delta S_{kmax}$, існує експоненціальна убутна залежність (див. рис. Д.4). З ростом енергії розряду суцільність шару збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації, витрачена на формування суцільного шару $E_{k\Delta S}$.



а – від розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$
 Рисунок Д.3 – Залежність шорсткості поверхні при сульфоцементації методом ЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2)



а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$
 Рисунок Д.4 – Залежність суцільності шару зниженої мікротвердості при сульфоцементації методом ЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2)

Рівняння прогнозування суцільності шару при сульфоцементації методом ЕІЛ із застосуванням СТС:

$$\Delta S_k = \Delta S_{k \max} \cdot e^{\frac{-E_{k\Delta S}}{W_p}} \quad (\text{Д.6})$$

Режим ЕІЛ, необхідний для отримання потрібної товщини та мікротвердості шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару, шорсткості поверхні та суцільності шару при сульфоцементації методом ЕІЛ, можна визначити відповідно до рівнянь (Д.1-Д.6). Тоді, відповідно:

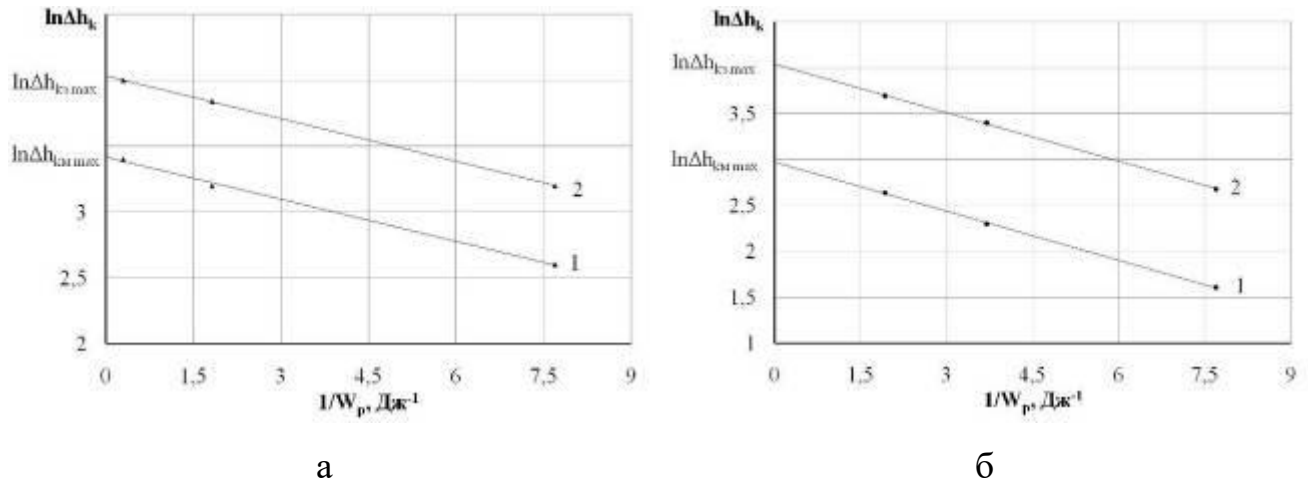
$$\begin{aligned} W_p &= \frac{E_{k\Delta h}}{\ln \frac{\Delta h_{k\max}}{\Delta h_x}}; & W_p &= \frac{E_{k\Delta h}}{\ln \frac{\Delta h_{k3\max}}{\Delta h_x}} \\ W_p &= \frac{E_{k\Delta H_\mu}}{\ln \frac{\Delta H_{\mu k\max}}{\Delta H_{\mu x}}}; & W_p &= \frac{E_{k\Delta H_\mu}}{\ln \frac{\Delta H_{\mu k3\max}}{\Delta H_{\mu x}}} \\ W_p &= \frac{E_{k\Delta Ra}}{\ln \frac{\Delta Ra_{k\max}}{\Delta Ra_x}}; & W_p &= \frac{E_{k\Delta S}}{\ln \frac{\Delta S_{k\max}}{\Delta S_x}} \end{aligned} \quad (\text{Д.7})$$

Відповідно до рівняння (Д.1) та (Д.2) між логарифмом значень товщини шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару і величиною зворотної енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta h_k$ від (W_p^{-1}) . Як випливає з графіків (рис. Д.5), залежність $\ln \Delta h_k$ від W_p^{-1} при сульфоцементації методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40 прагне до прямої лінії. Значення тангенсів кутів нахилу прямих до осі абсцис на ділянці експоненціально спадної залежності занесені до табл. Д.1 і Д.2.

Предекспоненціальний фактор (табл. Д.1 і Д.2) знаходимо за відрізком, який відсікається на осі ординат прямої експоненціально спадної залежності

$\ln \Delta h_k$ від W_p^{-1} (рис. Д.5), продовженої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ (при $W_p^{-1} \rightarrow 0$ $\ln \Delta h_{км} = \ln \Delta h_{км max}$ і $\ln \Delta h_{кз} = \ln \Delta h_{кз max}$).

Результати розрахунку енергії активації $E_{k\Delta h}$ – константи рівняння (Д.1) та (Д.2), визначені двома способами, перший, коли $E_{k\Delta h} = W_p$, другий – при $E_{k\Delta h} = |tg \alpha|$, занесені до табл. Д.1 і Д.2.



а – сталь 20; б – сталь 40: 1 – шар зниженої мікротвердості; 2 – зміцнений шар
Рисунок Д.5 – Залежність $\ln \Delta h_k$ від $(W_p)^{-1}$ при сульфоцементації методом ЕІЛ

Таблиця Д.1 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{k\Delta h}$), константи рівняння прогнозування товщини шару зниженої мікротвердості $\Delta h_{км max}$ та константи рівняння прогнозування товщини зміцненого шару $\Delta h_{кз max}$ при сульфоцементації методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20

$E_{k\Delta h} = |tg \alpha|$, Дж	$E_{k\Delta h} = W_p$, Дж	%	$\Delta h_{км max}$, мкм	$\Delta h_{кз max}$, мкм
0,106*	0,108*	2	31	58
0,108**	0,108**			

* – для шару зниженої мікротвердості; ** – для зміцненого шару

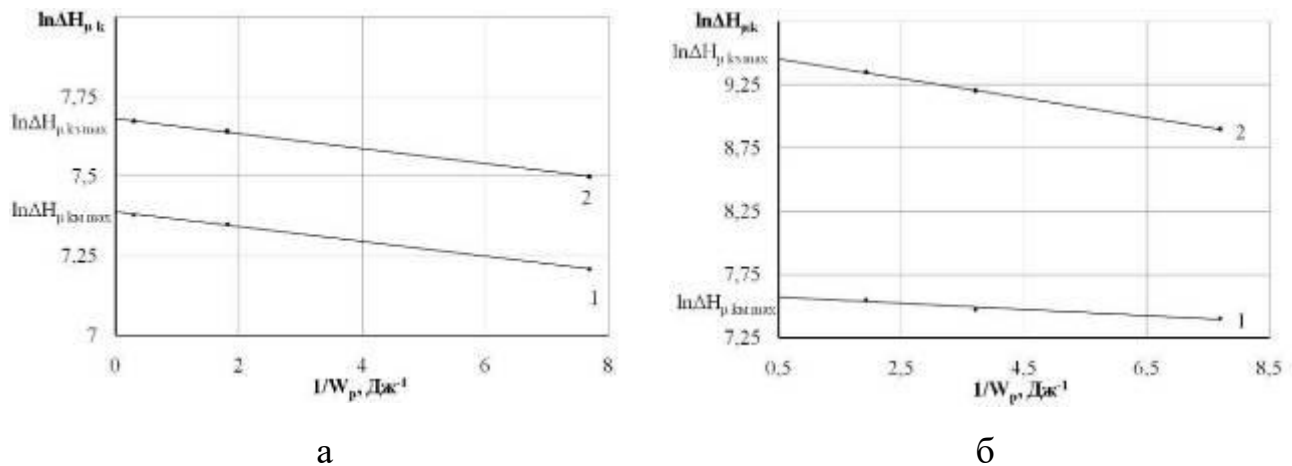
Таблиця Д.2 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{k\Delta h}$), константи рівняння прогнозування товщини шару зниженої мікротвердості $\Delta h_{km\ max}$ та константи рівняння прогнозування товщини зміцненого шару $\Delta h_{kz\ max}$ при сульфоцементації методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 40

$E_{k\Delta h} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{k\Delta h} = W_p$, Дж	%	$\Delta h_{km\ max}$, МКМ	$\Delta h_{kz\ max}$, МКМ
0,178*	0,177*	1	20	56
0,175**	0,175**			

* – для шару зниженої мікротвердості; ** – для зміцненого шару

Деяку несумісність значень констант ЕІЛ $E_{k\Delta h}$ (до 2 %), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівнянь (Д.3) і (Д.4) між логарифмом значень мікротвердості і величиною зворотної енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta H_{\mu k m}$ і $\ln \Delta H_{\mu k z}$ від W_p^{-1} (рис. Д.6).



а – сталь 20; б – сталь 40

Рисунок Д.6 – Залежність $\ln \Delta H_{\mu k}$ від (W_p^{-1}) шару зниженої мікротвердості (1) та зміцненого шару (2) при сульфоцементації методом ЕІЛ

Як впливає з графіків (рис. Д.6), залежності $\ln \Delta H_{\mu k m}$ і $\ln \Delta H_{\mu k z}$ від $(W_p)^{-1}$ при сульфоцементатії методом ЕІЛ сталей 20 та 40 прагнуть до прямої лінії. Значення тангенсів кутів нахилу прямих до осі абсцис на ділянці експоненціально спадної залежності занесені до табл. Д.3 і Д.4.

Предекспоненціальні фактори знаходимо за відрізками, які відсікаються на осі ординат прямих експоненціально спадних залежностей $\ln \Delta H_{\mu k}$ від $(W_p)^{-1}$ (рис. Д.6), продовжені до значення абсциси $(W_p)^{-1} = 0$ (при $(W_p)^{-1} \rightarrow 0 \ln \Delta H_{\mu k m} = \ln \Delta H_{\mu k m \max}$ і $\ln \Delta H_{\mu k z} = \ln \Delta H_{\mu k z \max}$).

Результати розрахунку енергії активації $E_{k \Delta H_{\mu}}$, визначені двома способами, перший, коли $E_{k \Delta H_{\mu}} = W_p$, другий – при $E_{k \Delta H_{\mu}} = |tg \alpha|$, занесені до табл. Д.3 і Д.4. Деяку несумісність значень констант ЕІЛ $E_{k \Delta H_{\mu}}$ (до 5 %), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Таблиця Д.3 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{k \Delta H_{\mu}}$), константи рівняння прогнозування мікротвердості шару зниженої мікротвердості $\Delta H_{\mu k m \max}$ та константи рівняння прогнозування мікротвердості зміцненого шару $\Delta H_{\mu k z \max}$ при сульфоцементатії методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20

$E_{k \Delta H_{\mu}} = |tg \alpha|$, Дж	$E_{k \Delta H_{\mu}} = W_p$, Дж	%	$\Delta H_{\mu k m \max}$, МКМ	$\Delta H_{\mu k z \max}$, МКМ
0,023*	0,023*	4	1616	2166
0,024**	0,023**			

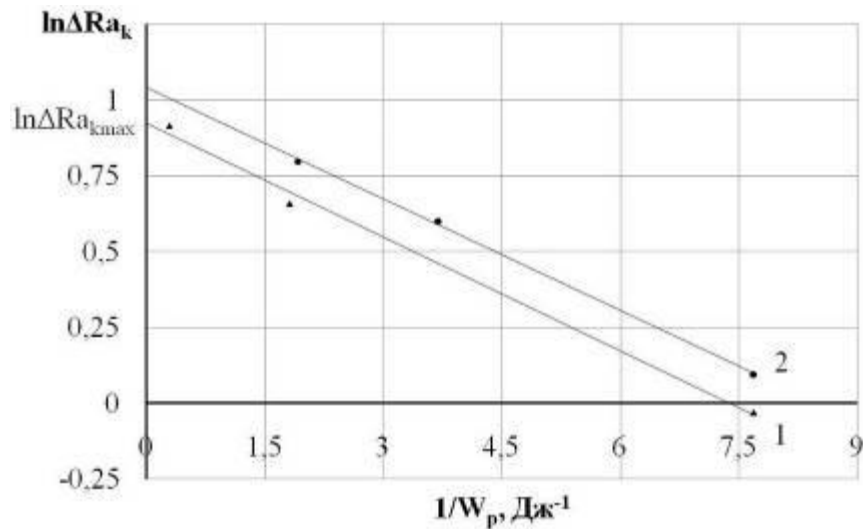
* – для шару зниженої мікротвердості; ** – для зміцненого шару

Таблиця Д.4 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{k\Delta H_\mu}$), константи рівняння прогнозування мікротвердості шару зниженої мікротвердості $\Delta H_{\mu\text{ кмmax}}$ та константи рівняння прогнозування мікротвердості зміцненого шару $\Delta H_{\mu\text{ кзmax}}$ при сульфоцементатії методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 40

$E_{k\Delta H_\mu} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{k\Delta H_\mu} = W_p$, Дж	%	$\Delta H_{\mu\text{ кмmax}}$, МКМ	$\Delta H_{\mu\text{ кзmax}}$, МКМ
0,026*	0,025*	5	1962	13280
0,027**	0,028**			

* – для шару зниженої мікротвердості; ** – для зміцненого шару

Відповідно до рівняння шорсткості (Д.5) між логарифмом значень шорсткості і величиною зворотною енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta Ra_k$ від W_p^{-1} при сульфоцементатії методом ЕІЛ сталі 20 та 40 (рис. Д.7).



1 – сталь 20; 2 – сталь 40

Рисунок Д.7 – Залежність $\ln \Delta Ra_k$ від W_p^{-1} при сульфоцементатії методом ЕІЛ

Результати розрахунку константи ΔRa_{kmax} та енергії активації $E_{k\Delta Ra}$ (константи рівняння (Д.5) прогнозування шорсткості поверхні при сульфоцементациї методом ЕІЛ), визначені двома способами, перший, коли $E_{k\Delta Ra} = W_p$, другий – при $E_{k\Delta Ra} = |tg\alpha|$ занесені до табл. Д.5.

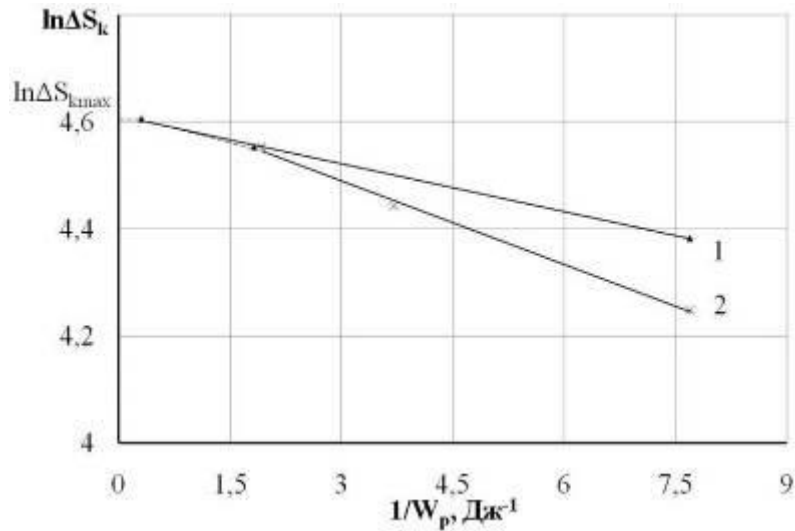
Таблиця Д.5 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{k\Delta Ra}$) і константи рівняння прогнозування шорсткості поверхні при сульфоцементациї методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40

Основа	$E_{k\Delta Ra} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{k\Delta Ra} = W_p$	%	ΔRa_{kmax} , мкм
Сталь 20	0,127	0,125	2	2,6
Сталь 40	0,121	0,122	1	2,8

Деяку несумісність (біля 2 %) значень констант ЕІЛ ($E_{k\Delta Ra}$), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівняння суцільності шару (Д.6) між логарифмом значень суцільності і зворотною величиною енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta S_k$ від W_p^{-1} при сульфоцементациї методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20 та 40 (рис. Д.8).

Результати розрахунку константи ΔS_{kmax} та енергії активації $E_{k\Delta S}$ (константи рівняння (Д.6) прогнозування суцільності шару зниженої мікротвердості при сульфоцементациї методом ЕІЛ), визначені двома способами, перший, коли $E_{k\Delta S} = W_p$, другий – при $E_{k\Delta S} = |tg\alpha|$, занесені до табл. Д.6. Деяку несумісність (до 3 %) значень констант ЕІЛ ($E_{k\Delta S}$), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.



1 – сталь 20; 2 – сталь 40

Рисунок Д.8 – Залежність $\ln \Delta S_k$ від W_p^{-1} при сульфоцементації методом ЕІЛ

Таблиця Д.6 – Розрахунок константи ЕІЛ ($E_{k\Delta S}$) і константи суцільності шару зниженої мікротвердості при сульфоцементації методом ЕІЛ сталей 20 та 40

Основа	$E_{k\Delta S} = |tg \alpha|$, Дж	$E_{k\Delta S} = W_p$, Дж	%	ΔS_{kmax} , %
Сталь 20	0,0299	0,0308	3	100
Сталь 40	0,0522	0,0532	2	100

Зведені дані констант ЕІЛ, необхідні для розрахунку параметрів якості поверхневого шару, наведені в табл. Д.7.

На підставі вище запропонованої математичної моделі (рівняння Д.1-Д.6) і методики визначення констант рівнянь прогнозування товщини шару зниженої мікротвердості (Δh_{kmmax}), товщини зміцненого шару (Δh_{kzmax}) та енергії активації $E_{k\Delta h}$, максимальної мікротвердості шару зниженої мікротвердості ($\Delta H_{\mu kmmax}$), максимальної мікротвердості зміцненого шару ($\Delta H_{\mu kzmax}$) та енергії активації $E_{k\Delta H_{\mu}}$, максимальної шорсткості поверхні (ΔRa_{kmax} і енергії активації $E_{k\Delta Ra}$), а також рівнянь прогнозування суцільності шару (максимальної суцільності

ΔS_{kmax} та енергії активації $E_{k\Delta S}$) при сульфоцементації методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40, можна скласти алгоритм, що дозволяє прогнозувати основні технологічні параметри ЕІЛ шару при сульфоцементації.

Сутність алгоритму полягає в наступному:

1. Експериментально вимірюється товщина і мікротвердість шару зниженої мікротвердості і зміцненого шару, шорсткість поверхні і суцільність шару зниженої мікротвердості, відповідно $\Delta h_{км}$ і $\Delta h_{кз}$, $\Delta H_{\mu км}$ і $\Delta H_{\mu кз}$, ΔRa_k , ΔS_k при різних енергіях розряду W_p .

2. Будуються графіки залежності $\Delta h_{км}$ і $\Delta h_{кз}$, $\Delta H_{\mu км}$ і $\Delta H_{\mu кз}$, ΔRa_k , ΔS_k та $\ln \Delta h_{км}$ і $\ln \Delta h_{кз}$, $\ln \Delta H_{\mu км}$ і $\ln \Delta H_{\mu кз}$, $\ln \Delta Ra_k$, $\ln \Delta S_k$ від W_p^{-1} .

3. Визначається критичні енергії розряду (енергії активації) $E_{k\Delta h}$, $E_{k\Delta H_{\mu}}$, $E_{k\Delta Ra}$, $E_{k\Delta S}$, як $|\operatorname{tg}\alpha|$, де α – кут нахилу прямих залежностей $\ln \Delta h_k$, $\ln \Delta H_{\mu k}$, $\ln \Delta Ra_k$ і $\ln \Delta S_k$ від W_p^{-1} .

4. За відрізком, який відсікається на осі ординат прямої, екстрапольованої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta h_{км} = \ln \Delta h_{кмmax}$, $\ln \Delta h_{кз} = \ln \Delta h_{кзmax}$, $\ln \Delta H_{\mu км} = \ln \Delta H_{\mu кмmax}$, $\ln \Delta H_{\mu кз} = \ln \Delta H_{\mu кзmax}$, $\ln \Delta Ra_k = \ln \Delta Ra_{kmax}$ і $\ln \Delta S_k = \ln \Delta S_{kmax}$).

5. Згідно рівняння (Д.7) визначається режим ЕІЛ, необхідний для отримання заданої товщини шарів, твердості, шорсткості та суцільності при сульфоцементації методом ЕІЛ із застосуванням СТС.

Таблиця Д.7 – Зведені дані констант ЕІЛ при сульфоцементатії сталей 20 та 40

Основа	Шар зниженої мікротвердості				Зміцнений шар		$E_{k\Delta H_\mu} =$ $= |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	$E_{k\Delta h} =$ $= |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	$E_{k\Delta Ra} =$ $= |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	$\Delta Ra_{k\max}$, МКМ
	$\Delta H_{\mu k\max}$, МПа	$\Delta h_{k\max}$, МКМ	$E_{k\Delta S} =$ $= |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	$\Delta S_{k\max}$, %	$\Delta H_{\mu k3\max}$, МПа	$\Delta h_{k3\max}$, МКМ				
Сталь 20	1616	31	0,0299	100	2166	58	0,023	0,108	0,127	2,6
Сталь 40	1962	20	0,0522	100	13280	56	0,026	0,176	0,121	2,8

Д.2 Математична модель прогнозування якості сульфоалітованих поверхневих шарів

На підставі експериментальних досліджень встановлено, що при сульфоалітуванні методом ЕІЛ сталі 20 та 40 (рис. Д.9) зі збільшенням енергії розряду зменшується товщина шару зниженої мікротвердості ($h_{g\ m}$), а товщина зміцненого шару збільшується ($h_{g\ z}$). Між величинами $h_{g\ m}$, $h_{g\ z}$ і зворотною енергією розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta h_{g\ m} = \Delta h_{g\ m\ min}$ та $\Delta h_{g\ z} = \Delta h_{g\ z\ max}$, існує експоненціальна залежність (рис. Д.9, б).

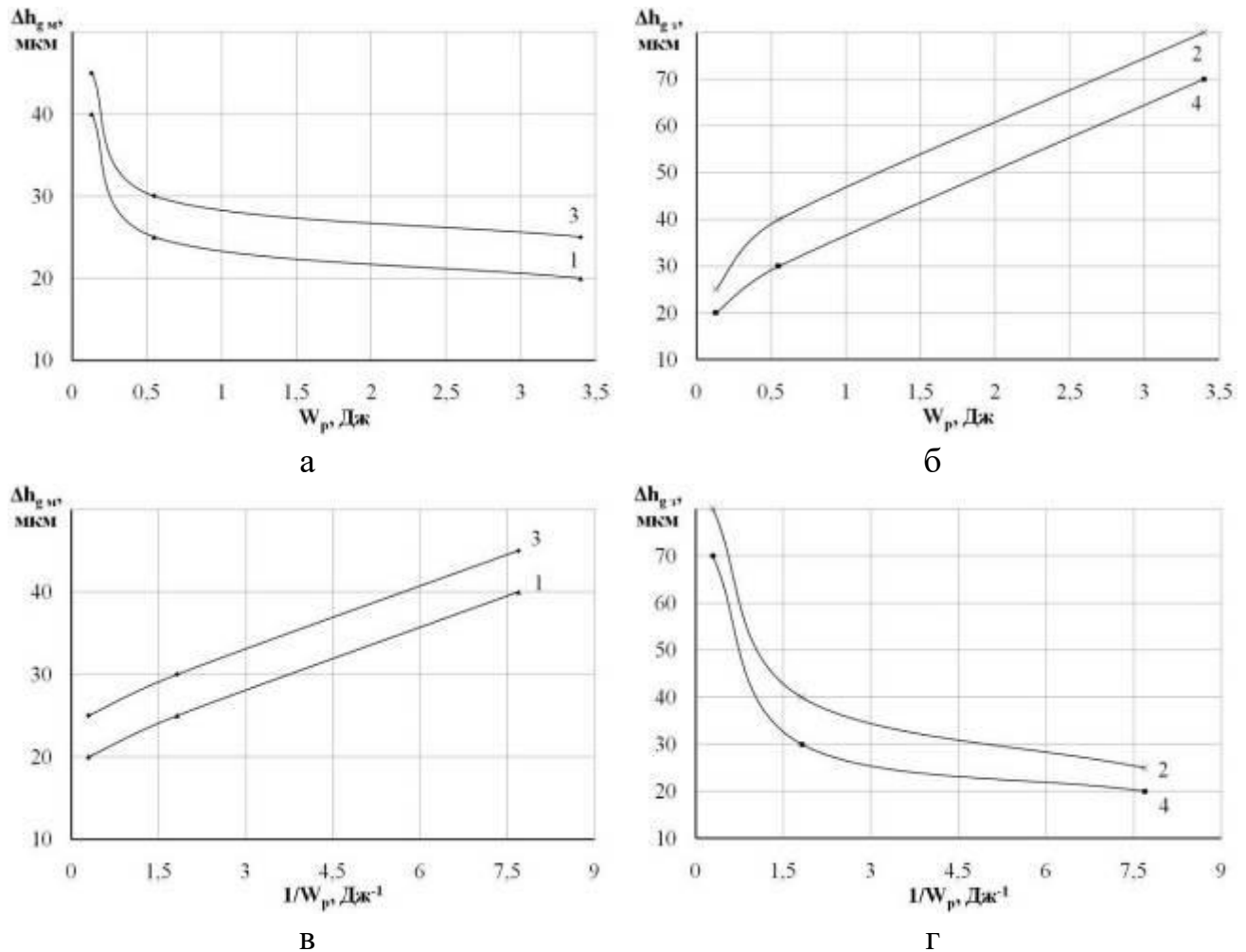
$$\Delta h_{g\ m} = \Delta h_{g\ m\ min} \cdot e^{\frac{-E_{g\ \Delta h}}{W_p}}. \quad (Д.8)$$

З ростом енергії розряду товщина шару зниженої мікротвердості зменшується і досягає мінімальної величини ($\Delta h_{g\ m\ min}$). Крім того, зменшення $h_{g\ m}$ тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування шару при сульфоалітуванні ($E_{g\ \Delta h}$). З ростом енергії розряду товщина зміцненого шару зростає і досягає максимальної величини ($\Delta h_{g\ z\ max}$). Крім того, збільшення $h_{g\ z}$ тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування шару при сульфоалітуванні ($E_{g\ \Delta h}$).

Залежність (Д.8) – рівняння прогнозування товщини шару зниженої мікротвердості при сульфоалітуванні методом ЕІЛ.

Аналогічно для зміцненого шару рівняння (Д.8) приймає вигляд:

$$\Delta h_{g\ z} = \Delta h_{g\ z\ max} \cdot e^{\frac{-E_{g\ \Delta h}}{W_p}}. \quad (Д.9)$$

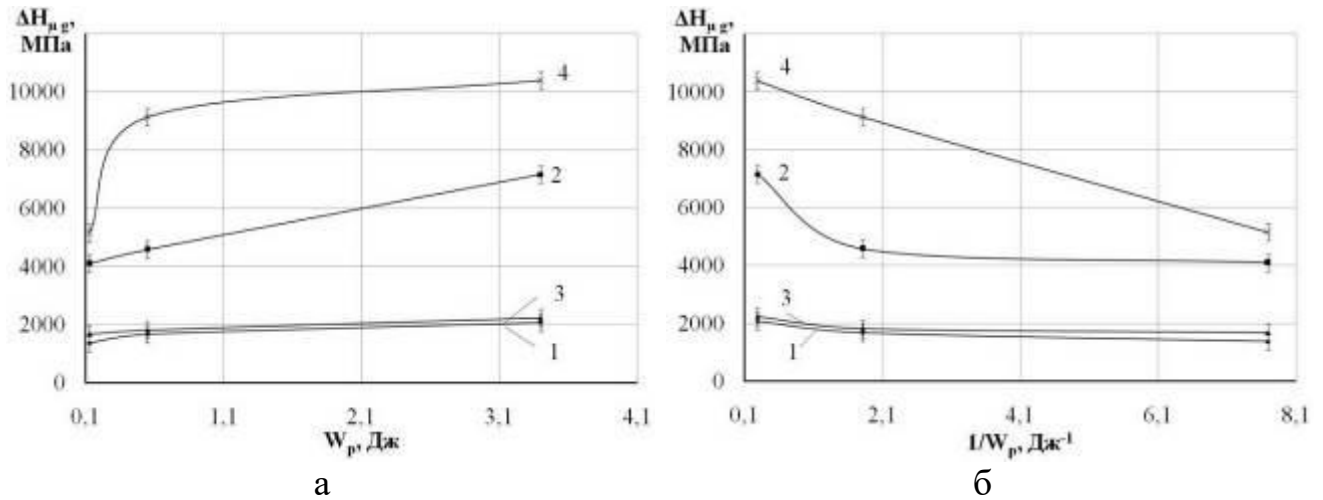


а, б – від енергії розряду W_p ; в, г – від зворотної величини енергії розряду $1/W_p$;
 1 – сталь 20, шар зниженої мікротвердості; 2 – сталь 20, зміцнений шар;
 3 – сталь 40, шар зниженої мікротвердості; 4 – сталь 40, зміцнений шар

Рисунок Д.9 – Залежність товщини шару зниженої мікротвердості та зміцненого шарів при сульфолітуванні методом ЕІЛ

На рис. Д.10 показана залежність величини твердості шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару при сульфолітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20 та 40 від енергії розряду: зі збільшенням енергії розряду мікротвердість обох шарів збільшується. Між мікротвердістю $H_{\mu g}$ і

величиною зворотною енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta H_{\mu g \cdot m} = \Delta H_{\mu g \cdot m \max}$ і $\Delta H_{\mu g \cdot z} = \Delta H_{\mu g \cdot z \max}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. Д.10, б).



а – від енергії розряду W_p ; б – від зворотної величини енергії розряду $1/W_p$;
 1 – сталь 20, шар зниженої мікротвердості; 2 – сталь 20, зміцнений шар;
 3 – сталь 40, шар зниженої мікротвердості; 4 – сталь 40, зміцнений шар
 Рисунок Д.10 – Залежність мікротвердості шару зниженої мікротвердості та зміцненого шарів при сульфоалітуванні методом ЕІЛ

З ростом енергії розряду мікротвердість шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару, у період до досягнення максимальної мікротвердості ($\Delta H_{\mu g \cdot m \max}$ і $\Delta H_{\mu g \cdot z \max}$, відповідно), збільшується тим сильніше, чим більше енергія розряду, витрачена на формування шарів при сульфоалітуванні. Крім того, $H_{\mu g}$ зростає тим сильніше, чим більше енергія активації процесу сульфоалітування методом ЕІЛ ($E_{g\Delta H_{\mu}}$).

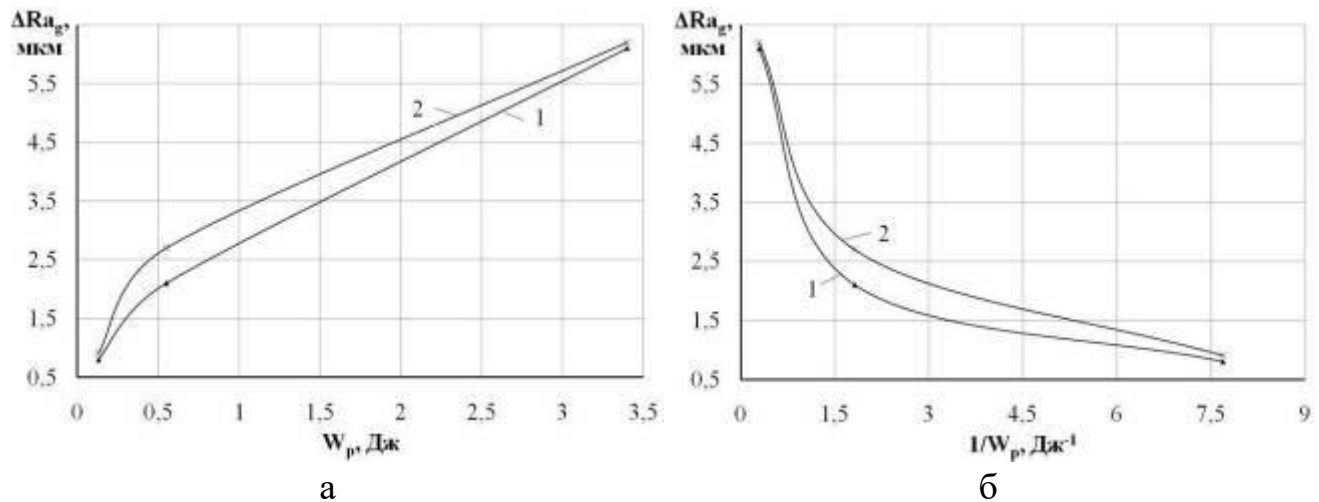
$$\Delta H_{\mu g \cdot m} = \Delta H_{\mu g \cdot m \max} \cdot e^{\frac{-E_{g\Delta H_{\mu}}}{W_p}} \quad (\text{Д.10})$$

Залежність (Д.10) – рівняння прогнозування мікротвердості шару зниженої мікротвердості при сульфолітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС.

Аналогічно для зміцненого шару рівняння (Д.10) приймає вигляд:

$$\Delta H_{\mu g z} = \Delta H_{\mu g z max} \cdot e^{\frac{-E_g \Delta H_{\mu}}{W_p}} . \quad (Д.11)$$

Між шорсткістю поверхні Ra_g і величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) при сульфолітуванні методом ЕІЛ до періоду, коли $\Delta Ra_g = \Delta Ra_{g max}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. Д.11).



а – від розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок Д.11 – Залежність шорсткості поверхні при сульфолітуванні методом ЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2)

З ростом енергії розряду шорсткість поверхні збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації, витрачена на формування шорсткості поверхні

$$E_{g \Delta Ra} \cdot$$

$$\Delta Ra_g = \Delta Ra_{g \max} \cdot e^{\frac{-E_{g\Delta Ra}}{W_p}} . \quad (Д.12)$$

Залежність (Д.12) – рівняння прогнозування шорсткості поверхні при сульфоалітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС.

Між суцільністю шару зниженої мікротвердості S_{gm} та зміцненого шару S_{gz} й величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta S_{gm} = \Delta S_{gm \max}$ та $\Delta S_{gz} = \Delta S_{gz \max}$ існує експоненціальна убутна залежність (див. рис. Д.12, б).

З ростом енергії розряду суцільність шарів збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації, витрачена на формування суцільного шару $E_{g\Delta S}$.

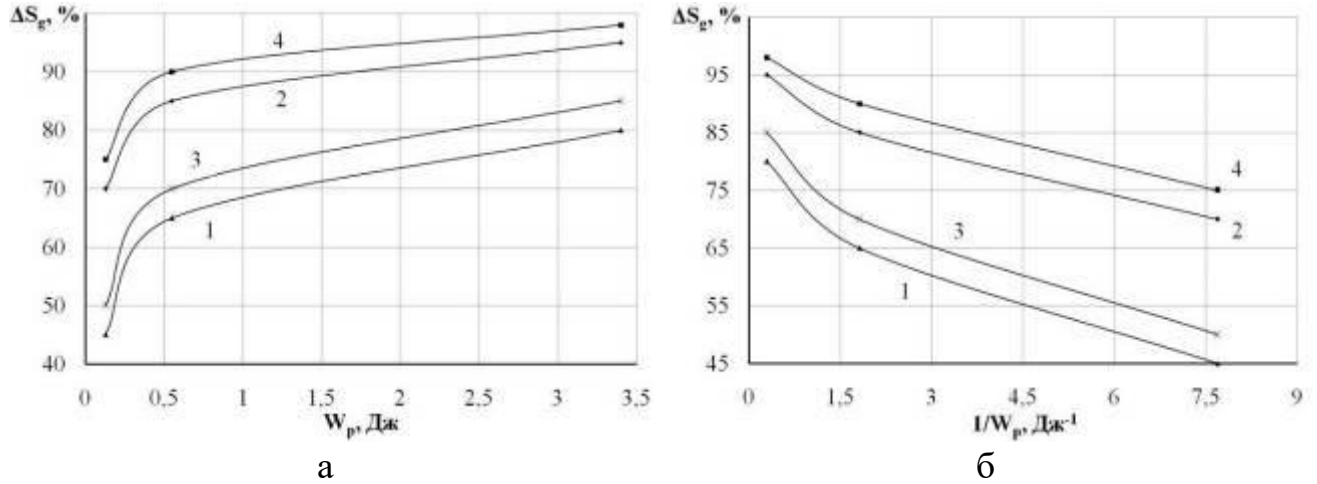
$$\Delta S_{gm} = \Delta S_{gm \max} \cdot e^{\frac{-E_{g\Delta S}}{W_p}} . \quad (Д.13)$$

Залежність (Д.13) – рівняння прогнозування суцільності шару зниженої мікротвердості при сульфоалітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС.

Аналогічно для зміцненого шару рівняння (Д.13) приймає вигляд:

$$\Delta S_{gz} = \Delta S_{gz \max} \cdot e^{\frac{-E_{g\Delta S}}{W_p}} . \quad (Д.14)$$

Режим ЕІЛ, необхідний для отримання потрібної товщини, мікротвердості та суцільності шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару, шорсткості поверхні при сульфоалітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС, можна визначити відповідно до рівнянь (Д.8)-(Д.14).

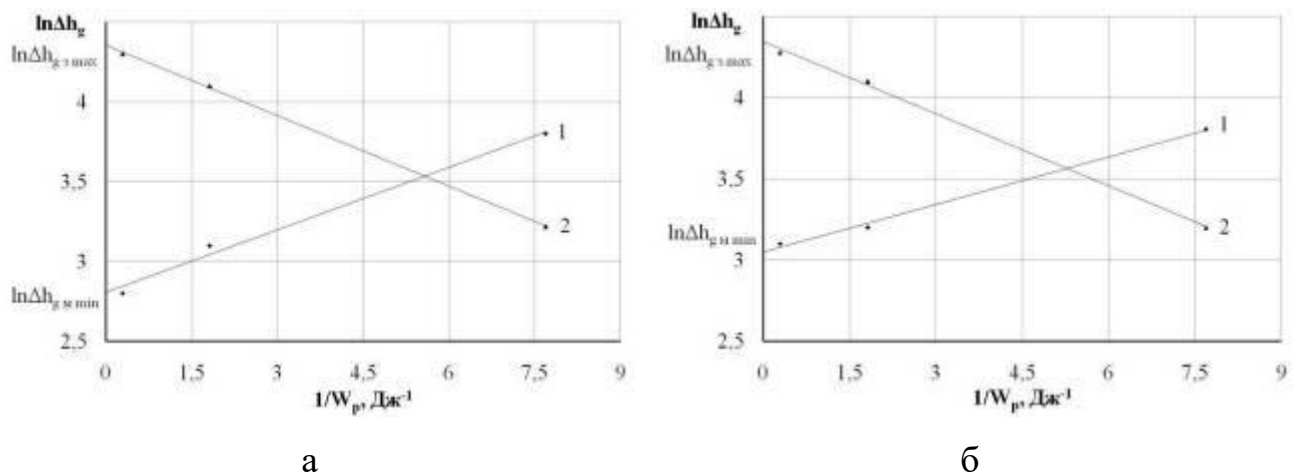


а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$;
 1 – сталь 20, шар зниженої мікротвердості; 2 – сталь 20, зміцнений шар;
 3 – сталь 40, шар зниженої мікротвердості; 4 – сталь 40, зміцнений шар
 Рисунок Д.12 – Залежність суцільності шару зниженої мікротвердості при
 сульфолітуванні методом ЕІЛ сталі 20 та 40

Тоді

$$\begin{aligned}
 W_p &= \frac{E_g \Delta h}{\ln \frac{\Delta h_{gM \min}}{\Delta h_x}}; & W_p &= \frac{E_g \Delta h}{\ln \frac{\Delta h_{g3 \max}}{\Delta h_x}}; \\
 W_p &= \frac{E_g \Delta H_\mu}{\ln \frac{\Delta H_{\mu gM \max}}{\Delta H_{\mu x}}}; & W_p &= \frac{E_g \Delta H_\mu}{\ln \frac{\Delta H_{\mu g3 \max}}{\Delta H_{\mu x}}}; \\
 W_p &= \frac{E_g \Delta Ra}{\ln \frac{\Delta Ra_{g \max}}{\Delta Ra_x}}; \\
 W_p &= \frac{E_g \Delta S}{\ln \frac{\Delta S_{gM \max}}{\Delta S_x}}; & W_p &= \frac{E_g \Delta S}{\ln \frac{\Delta S_{g3 \max}}{\Delta S_x}}.
 \end{aligned}
 \tag{Д.15}$$

Відповідно до рівняння (Д.8) та (Д.9) між логарифмом значень товщини шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару і величиною зворотної енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta h_g$ від (W_p^{-1}) . Як випливає з графіку (рис. Д.13, а), залежність $\ln \Delta h_{gm}$ від W_p^{-1} прагне до прямої лінії. Значення тангенсів кутів нахилу прямих до осі абсцис на ділянці експоненціально зростаючої залежності занесені до табл. Д.8.



а – сталь 20; б – сталь 40; 1 – шар зниженої мікротвердості; 2 – зміцнений шар
Рисунок Д.13 – Залежність $\ln \Delta h_g$ від $(W_p)^{-1}$ при сульфолітуванні методом ЕІЛ:

Таблиця Д.8 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{g\Delta h}$), константи рівняння прогнозування товщини шару зниженої мікротвердості $\Delta h_{gm\ min}$ та константи рівняння прогнозування товщини зміцненого шару $\Delta h_{gz\ max}$ при сульфолітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20

$E_{g\Delta h} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{g\Delta h} = W_p$, Дж	%	$\Delta h_{gm\ min}$, МКМ	$\Delta h_{gz\ max}$, МКМ
0,137*	0,136*	6	16	82
0,147**	0,146**			

* – для шару зниженої мікротвердості; ** – для зміцненого шару

Таблиця Д.9 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{g\Delta h}$), константи рівняння прогнозування товщини шару зниженої мікротвердості $\Delta h_{gm\ min}$ та константи рівняння прогнозування товщини зміцненого шару $\Delta h_{gz\ max}$ при сульфолітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 40

$E_{g\Delta h} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{g\Delta h} = W_p$, Дж	%	$\Delta h_{gm\ min}$, МКМ	$\Delta h_{gz\ max}$, МКМ
0,097*	0,096*	6	21	76
0,103**	0,102**			

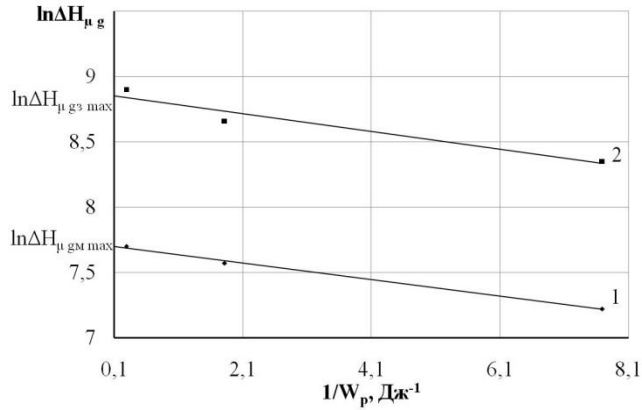
* – для шару зниженої мікротвердості; ** – для зміцненого шару

Предекспоненціальний фактор (табл. Д.8-Д.9) знаходимо за відрізком, який відсікається на осі ординат прямої експоненціально зростаючої ($\ln \Delta h_{gm}$ від W_p^{-1}) і спадної ($\ln \Delta h_{gz}$ від W_p^{-1}) і функції (рис. Д.13), продовженої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ (при $W_p^{-1} \rightarrow 0$ $\ln \Delta h_{gm} = \ln \Delta h_{gm\ min}$ і $\ln \Delta h_{gz} = \ln \Delta h_{gz\ max}$, відповідно).

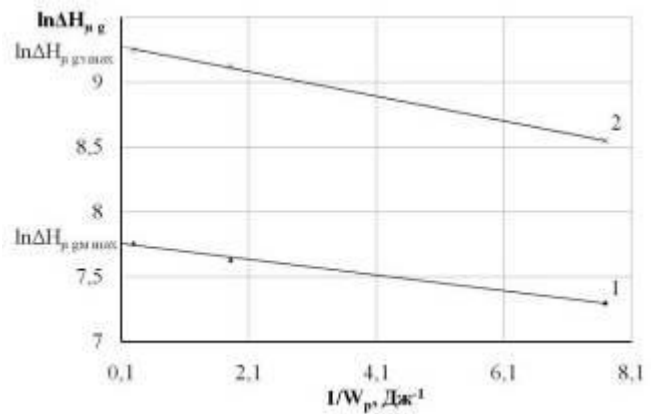
Результати розрахунку енергії активації $E_{g\Delta h}$ – константи рівняння (Д.8) та (Д.9), визначені двома способами, перший, коли $E_{g\Delta h} = W_p$, другий – при $E_{g\Delta h} = |tg\alpha|$, занесені до табл. Д.8 і Д.9.

Деяку несумісність значень констант ЕІЛ $E_{g\Delta h}$ (біля 6 %), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівнянь (Д.11) і (Д.12) між логарифмом значень мікротвердості і величиною зворотної енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta H_{\mu_m}$ і $\ln \Delta H_{\mu_s}$ від W_p^{-1} (рис. Д.14).



а



б

а – сталь 20; б – сталь 40; 1 – шар зниженої мікротвердості; 2 – зміцнений шар
Рисунок Д.14 – Залежність $\ln \Delta H_{\mu}$ від $(W_p)^{-1}$ шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару при сульфоалітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС

Як впливає з графіка (рис. Д.14), залежності $\ln \Delta H_{\mu g}$ від $(W_p)^{-1}$ прагнуть до прямої лінії. Значення тангенсів кутів нахилу прямих до осі абсцис на ділянці експоненціально спадної залежності занесені до табл. Д.10 і Д.11.

Предекспоненціальні фактори знаходимо за відрізками, які відсікаються на осі ординат прямих експоненціально спадних залежностей $\ln \Delta H_{\mu g}$ від $(W_p)^{-1}$ (рис. Д.14), продовжені до значення абсциси $(W_p)^{-1} = 0$ (при $(W_p)^{-1} \rightarrow 0$ $\ln \Delta H_{\mu g m} = \ln \Delta H_{\mu g m \text{ max}}$ і $\ln \Delta H_{\mu g z} = \ln \Delta H_{\mu g z \text{ max}}$).

Результати розрахунку енергії активації $E_{g \Delta H_{\mu}}$, визначені двома способами, перший, коли $E_{g \Delta H_{\mu}} = W_p$, другий – при $E_{g \Delta H_{\mu}} = |tg \alpha|$, занесені до табл. Д.10 і Д.11.

Деяку несумісність значень констант ЕІЛ $E_{g \Delta H_{\mu}}$ (до 5 %), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Таблиця Д.10 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{g\Delta H_\mu}$), константи рівняння прогнозування мікротвердості шару зниженої мікротвердості $\Delta H_{\mu\ g\max}$ та константи рівняння прогнозування мікротвердості зміцненого шару $\Delta H_{\mu\ g3\max}$ при сульфоалітуванні методом ЕІЛ сталі 20

$E_{g\Delta H_\mu} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{g\Delta H_\mu} = W_p$, Дж	%	$\Delta H_{\mu\ g\max}$, МКМ	$\Delta H_{\mu\ g3\max}$, МКМ
0,065*	0,067*	4	2216	7259
0,068**	0,0683**			

* – для шару зниженої мікротвердості; ** – для зміцненого шару

Таблиця Д.11 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{g\Delta H_\mu}$), константи рівняння прогнозування мікротвердості шару зниженої мікротвердості $\Delta H_{\mu\ g\max}$ та константи рівняння прогнозування мікротвердості зміцненого шару $\Delta H_{\mu\ g3\max}$ при сульфоалітуванні методом ЕІЛ сталі 40

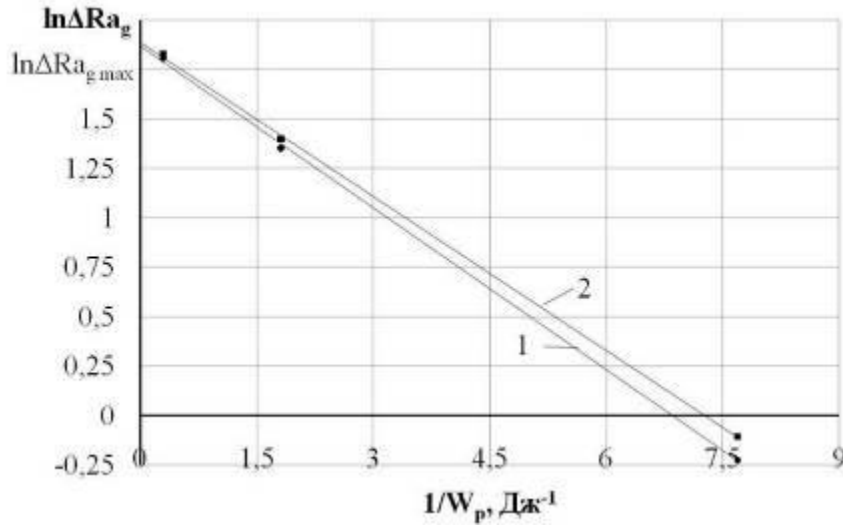
$E_{g\Delta H_\mu} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{g\Delta H_\mu} = W_p$, Дж	%	$\Delta H_{\mu\ g\max}$, МКМ	$\Delta H_{\mu\ g3\max}$, МКМ
0,086*	0,087*	5	2332	10755
0,094**	0,095**			

* – для шару зниженої мікротвердості; ** – для зміцненого шару

Відповідно до рівняння шорсткості (Д.12) між логарифмом значень шорсткості і величиною зворотною енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta Ra_g$ від W_p^{-1} при сульфоалітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20 та 40 (рис. Д.15).

Результати розрахунку константи $\Delta Ra_{g\max}$ та енергії активації $E_{g\Delta Ra}$ (константи рівняння (Д.12) прогнозування шорсткості поверхні), визначені

двома способами, перший, коли $E_{g\Delta Ra} = W_p$, другий – при $E_{g\Delta Ra} = |tg\alpha|$ занесені до табл. Д.12.



1 – сталь 20; 2 – сталь 40

Рисунок Д.15 – Залежність $\ln \Delta Ra_g$ від W_p^{-1} при сульфолітуванні методом ЕІЛ

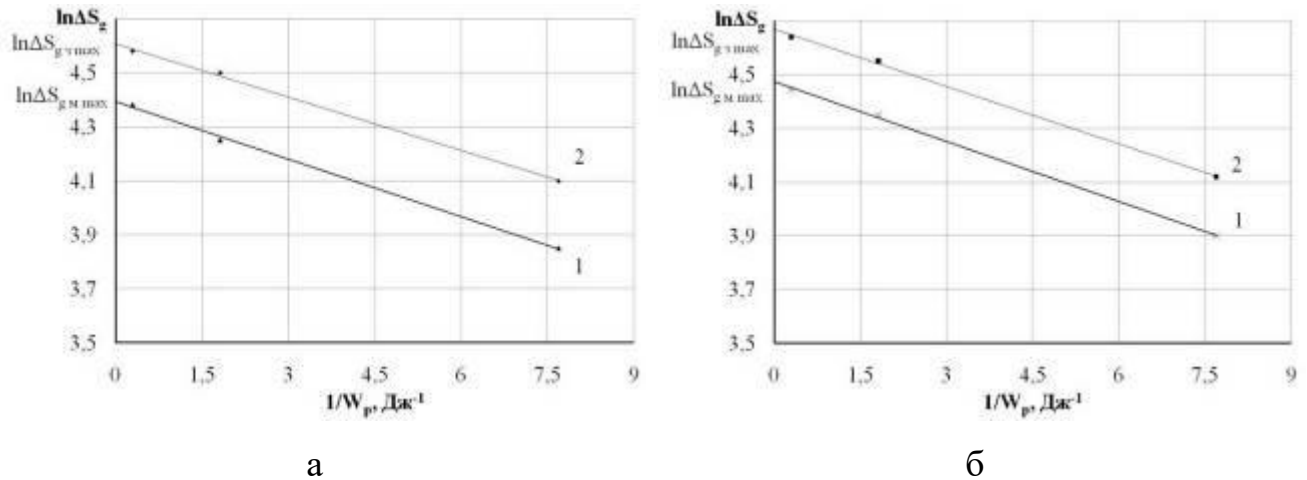
Таблиця Д.12 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{g\Delta Ra}$) і константи рівняння прогнозування шорсткості поверхні при сульфолітуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40

Основа	$E_{g\Delta Ra} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{g\Delta Ra} = W_p$, Дж	%	$\Delta Ra_{g\max}$, МКМ
Сталь 20	0,27	0,28	4	6,49
Сталь 40	0,26	0,27		6,61

Деяку несумісність (біля 4 %) значень констант ЕІЛ ($E_{g\Delta Ra}$), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому розбіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівнянь суцільності шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару, (Д.13) та (Д.14), відповідно, між логарифмом значень

суцільності і зворотною величиною енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta S_g$ від W_p^{-1} (рис. Д.16).



а – сталь 20; б – сталь 40; 1 – шар зниженої мікротвердості; 2 – зміцнений шар

Рисунок Д.16 – Залежність $\ln \Delta S_g$ від W_p^{-1} при сульфоалітуванні методом ЕІЛ

Результати розрахунку константи $\Delta S_{g_{max}}$ та $\Delta S_{g_{zmax}}$, енергії активації $E_{g_{\Delta S}}$ (констант рівняння (Д.13) прогнозування суцільності шару зниженої мікротвердості та рівняння (Д.14) прогнозування суцільності зміцненого шару, відповідно), визначені двома способами, перший, коли $E_{g_{\Delta S}} = W_p$, другий – при $E_{g_{\Delta S}} = |tg \alpha|$, занесені до табл. Д.13 та Д.14.

Деяку несумісність (до 5 %) значень констант ЕІЛ ($E_{g_{\Delta S}}$), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Зведені дані констант ЕІЛ, необхідні для розрахунку параметрів якості поверхневого шару, наведені в табл. Д.15.

Таблиця Д.13 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{g\Delta S}$), константи рівняння прогнозування суцільності шару зниженої мікротвердості $\Delta S_{gm\max}$ та константи рівняння прогнозування суцільності зміцненого шару $\Delta S_{gz\max}$ при сульфоалітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20

$E_{g\Delta S} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{g\Delta S} = W_p$, Дж	%	$\Delta S_{gm\max}$, %	$\Delta S_{gz\max}$, %
0,07*	0,07*	5	81	100
0,066**	0,065**			

* – для шару зниженої мікротвердості; ** – для зміцненого шару

Таблиця Д.14 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{g\Delta S}$), константи рівняння прогнозування суцільності шару зниженої мікротвердості $\Delta S_{gm\max}$ та константи рівняння прогнозування суцільності зміцненого шару $\Delta S_{gz\max}$ при сульфоалітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 40

$E_{g\Delta S} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{g\Delta S} = W_p$, Дж	%	$\Delta S_{gm\max}$, %	$\Delta S_{gz\max}$, %
0,073*	0,072*	5	88	100
0,068**	0,068**			

* – для шару зниженої мікротвердості; ** – для зміцненого шару

На підставі вище запропонованої математичної моделі (рівняння Д.8-Д.14) і методики визначення констант рівнянь прогнозування товщини шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару ($\Delta h_{g\min}$, $\Delta h_{gz\max}$ та енергії активації $E_{g\Delta h}$), максимальної мікротвердості шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару ($\Delta H_{\mu\max}$, $\Delta H_{\mu\max}$ та енергії активації $E_{g\Delta H_{\mu}}$), максимальної шорсткості поверхні ($\Delta Ra_{g\max}$ і енергії $E_{g\Delta Ra}$), а також рівнянь прогнозування суцільності

Таблиця Д.15 – Зведені дані констант ЕІЛ при сульфоалітуванні сталей 20 та 40

Основа	Шар зниженої мікротвердості			Зміцнений шар			$E_{g\Delta h} = |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	$E_{g\Delta H_{\mu}} = |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	$E_{g\Delta S} = |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	$E_{g\Delta Ra} = |\operatorname{tg} \alpha|$, Дж	$\Delta Ra_{g\max}$, МКМ
	$\Delta h_{g\min}$, МКМ	$\Delta H_{\mu g\max}$, МПа	$\Delta S_{g\max}$, %	$\Delta h_{gz\max}$, МКМ	$\Delta H_{\mu gz\max}$, МПа	$\Delta S_{gz\max}$, %					
Сталь 20	16	2216	81	82	7259	100	0,141	0,066	0,067	0,27	6,49
Сталь 40	21	2332	88	76	10755	100	0,10	0,090	0,07	0,26	6,61

шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару (максимальної суцільності $\Delta S_{g_{max}}$, $\Delta S_{g_{3max}}$ та енергії $E_{g\Delta S}$) при сульфолітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40, можна скласти алгоритм, що дозволяє прогнозувати основні технологічні параметри ЕІЛ шару при сульфолітуванні.

Сутність алгоритму полягає в наступному:

1. Експериментально вимірюється товщина і мікротвердість шару зниженої мікротвердості і зміцненого шару, шорсткість поверхні і суцільність шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару, відповідно Δh_{g_m} і Δh_{g_3} , $\Delta H_{\mu_{gm}}$ і $\Delta H_{\mu_{g3}}$, ΔRa_g , ΔS_{g_m} і ΔS_{g_3} при різних енергіях розряду W_p .

2. Будуються графіки залежності Δh_{g_m} і Δh_{g_3} , $\Delta H_{\mu_{gm}}$ і $\Delta H_{\mu_{g3}}$, ΔRa_g , ΔS_{g_m} і ΔS_{g_3} , $\ln \Delta h_{g_m}$ і $\ln \Delta h_{g_3}$, $\ln \Delta H_{\mu_{gm}}$ і $\ln \Delta H_{\mu_{g3}}$, $\ln \Delta Ra_g$, $\ln \Delta S_{g_m}$ і $\ln \Delta S_{g_3}$ від W_p^{-1} .

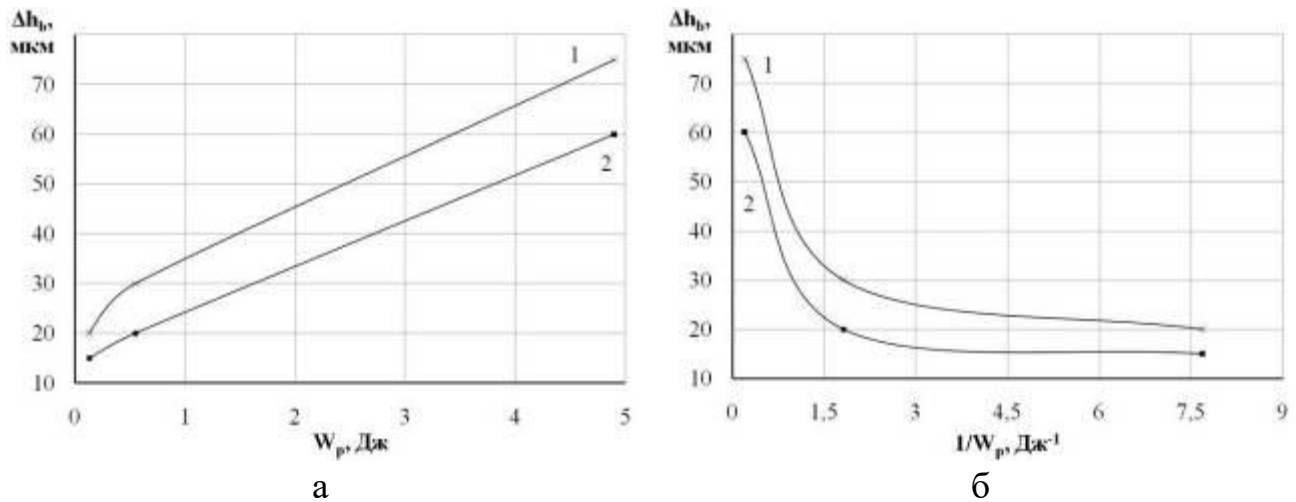
3. Визначається критичні енергії розряду (енергії активації) $E_{g\Delta h}$, $E_{g\Delta H_\mu}$, $E_{g\Delta Ra}$, $E_{g\Delta S}$ як $|\operatorname{tg}\alpha|$, де α – кут нахилу прямих залежностей $\ln \Delta h_g$, $\ln \Delta H_{\mu_g}$, $\ln \Delta Ra_g$ і $\ln \Delta S_g$ від W_p^{-1} .

4. За відрізком, який відсікається на осі ординат прямої, екстрапольованої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta h_{g_m} = \ln \Delta h_{g_{min}}$, $\ln \Delta h_{g_3} = \ln \Delta h_{g_{3max}}$, $\ln \Delta H_{\mu_{gm}} = \ln \Delta H_{\mu_{gmmax}}$, $\ln \Delta Ra_g = \ln \Delta Ra_{g_{max}}$ і $\ln \Delta S_g = \ln \Delta S_{g_{max}}$).

5. Згідно рівняння (Д.15) визначається режим ЕІЛ, необхідний для отримання заданої товщини шарів, твердості, шорсткості та суцільності при сульфолітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС.

Д.3 Математична модель прогнозування якості Al+C+V поверхневих шарів

На підставі експериментальних досліджень встановлено, що при створенні Al+C+V поверхневих шарів методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40 (рис. Д.17) зі збільшенням енергії розряду збільшується товщина зміцненого шару (h_b). Між величиною h_b і зворотною енергією розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta h_b = \Delta h_{b_{max}}$, існує експоненціальна залежність (рис. Д.17, б). З ростом енергії розряду товщина зміцненого шару збільшуються і досягає максимальної величини ($\Delta h_{b_{max}}$). Крім того, збільшення h_b тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування шару ($E_{b\Delta h}$).



а – від енергії розряду W_p ; б – від зворотної величини енергії розряду $1/W_p$;

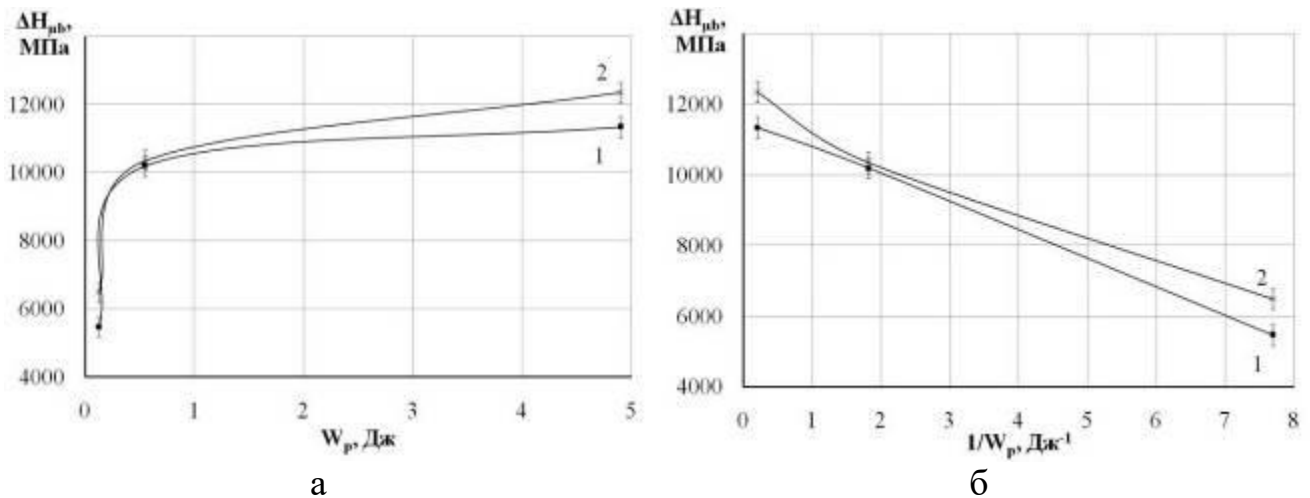
1 – сталь 20; 2 – сталь 40

Рисунок Д.17 – Залежність товщини зміцненого шару при формуванні покриттів системи Al-C-V методом ЕІЛ

$$\Delta h_b = \Delta h_{b_{max}} \cdot e^{\frac{-E_{b\Delta h}}{W_p}} \quad (D.16)$$

Залежність (Д.16) – рівнянням прогнозування товщини зміцненого шару при формуванні покриттів системи Al-C-V методом ЕІЛ із застосуванням СТС.

На рисунку Д.18 показана залежність величини твердості зміцненого шару: зі збільшенням енергії розряду мікротвердість покриття збільшується. Між мікротвердістю $H_{\mu b}$ і величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta H_{\mu b} = \Delta H_{\mu bmax}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. Д.18, б). З ростом енергії розряду мікротвердість шару у період до досягнення максимальної мікротвердості ($\Delta H_{\mu bmax}$) збільшується тим сильніше, чим більше енергія розряду, витрачена на покриття. Крім того, $H_{\mu b}$ зростає тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування зміцненого шару ($E_{b\Delta H_{\mu}}$).



а – від енергії розряду W_p ; б – від зворотної величини енергії розряду $1/W_p$;
1 – сталь 20; 2 – сталь 40

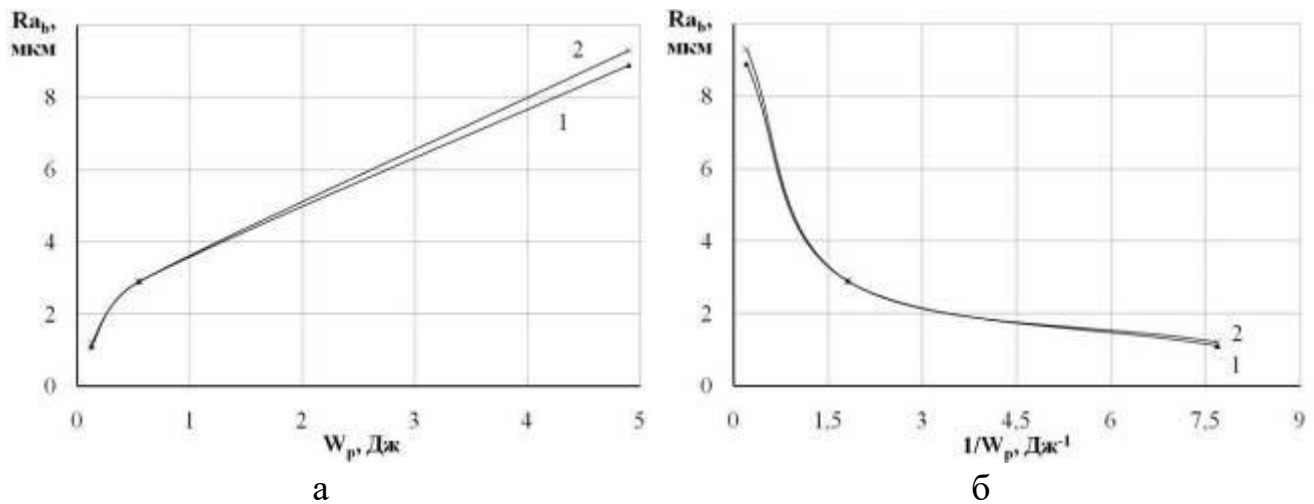
Рисунок Д.18 – Залежність мікротвердості зміцненого шару при формуванні покриттів системи Al-C-V методом ЕІЛ

$$\Delta H_{\mu b} = \Delta H_{\mu bmax} \cdot e^{\frac{-E_{b\Delta H_{\mu}}}{W_p}} \quad (Д.17)$$

Залежність (Д.17) – рівняння прогнозування мікротвердості зміцненого шару при формуванні покриттів системи Al-C-V методом ЕІЛ із застосуванням СТС.

Між шорсткістю поверхні Ra_b і величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) при формуванні покриттів системи Al-C-V методом ЕІЛ до періоду, коли $\Delta Ra_b = \Delta Ra_{bmax}$, існує експоненціальна убутна залежність (див. рис. Д.19).

З ростом енергії розряду шорсткість поверхні збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації, витрачена на формування шорсткості поверхні $E_{b\Delta Ra}$.



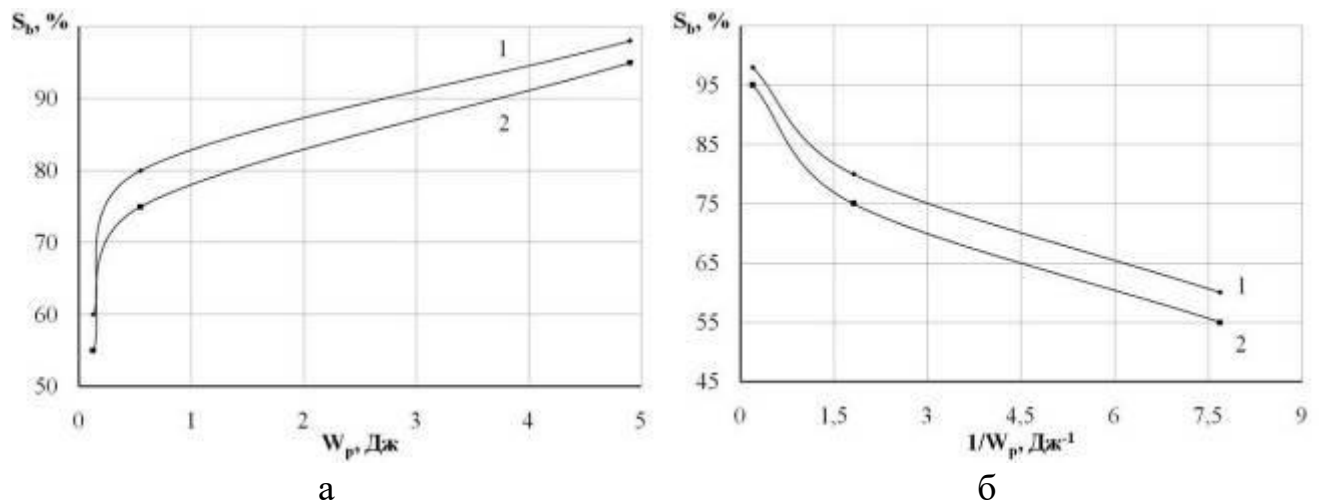
а – від розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок Д.19 – Залежність шорсткості поверхні при формуванні Al+C+V покриттів методом ЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2)

$$\Delta Ra_b = \Delta Ra_{bmax} \cdot e^{\frac{-E_{b\Delta Ra}}{W_p}} \quad (Д.18)$$

Залежність (Д.18) – рівняння прогнозування шорсткості поверхні при формуванні покриттів системи Al-C-V методом ЕІЛ із застосуванням СТС.

Між суцільністю поверхневого шару S_b й величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta S_b = \Delta S_{bmax}$ існує експоненціальна убутна залежність (див. рис. Д.20, б). З ростом енергії розряду суцільність шару збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації, витрачена на формування суцільного шару $E_{b\Delta S}$.



а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок Д.20 – Залежність суцільності зміцненого шару при формуванні покриттів системи Al-C-V методом ЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2)

$$\Delta S_b = \Delta S_{bmax} \cdot e^{\frac{-E_{b\Delta S}}{W_p}} \quad (Д.19)$$

Залежність (Д.19) – рівняння прогнозування суцільності зміцненого шару при формуванні покриттів системи Al-C-V методом ЕІЛ.

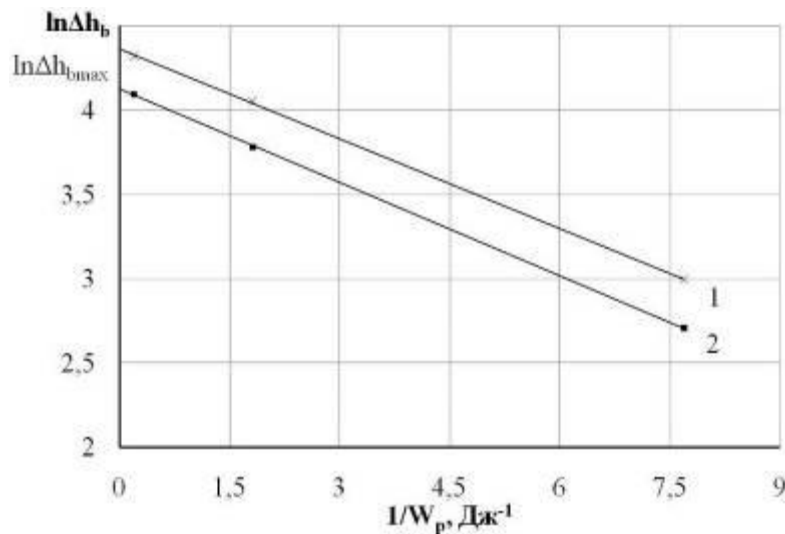
Режим ЕІЛ, необхідний для отримання потрібної товщини, мікротвердості та суцільності шару при формуванні покриттів системи Al-C-V методом ЕІЛ із застосуванням СТС, можна визначити відповідно до рівнянь (Д.16-Д.19). Тоді, відповідно:

$$W_p = \frac{E_{b\Delta h}}{\ln \frac{\Delta h_{bmax}}{\Delta h_x}}; W_p = \frac{E_{\Delta H_{\mu b}}}{\ln \frac{\Delta H_{\mu bmax}}{\Delta H_{\mu x}}}; \quad (Д.20)$$

$$W_p = \frac{E_{b\Delta Ra}}{\ln \frac{\Delta Ra_{bmax}}{\Delta Ra_x}}; W_p = \frac{E_{b\Delta S}}{\ln \frac{\Delta S_{bmax}}{\Delta S_x}}.$$

Відповідно до рівняння (Д.16) між логарифмом значень товщини зміцненого шару і величиною зворотної енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta h_b$ від (W_p^{-1}) .

Як впливає з графіку (рис. Д.21), залежність $\ln \Delta h_b$ від W_p^{-1} прагне до прямої лінії. Значення тангенсів кутів нахилу прямих до осі абсцис на ділянці експоненціально зростаючої залежності занесені до табл. Д.16.



1 – сталь 20; 2 – сталь 40

Рисунок Д.21 – Залежність $\ln \Delta h_b$ від $(W_p)^{-1}$ при формуванні покриттів системи Al-C-B методом ЕІЛ

Таблиця Д.16 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{b\Delta h}$) і константи рівняння прогнозування товщини зміцненого шару Δh_{bmax} при формуванні покриттів системи Al-C-V методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40

Основа	$E_{b\Delta h} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{b\Delta h} = W_p$, Дж	%	Δh_{bmax} , МКМ
Сталь 20	0,176	0,177	0,6	78
Сталь 40	0,185	0,184	0,5	62

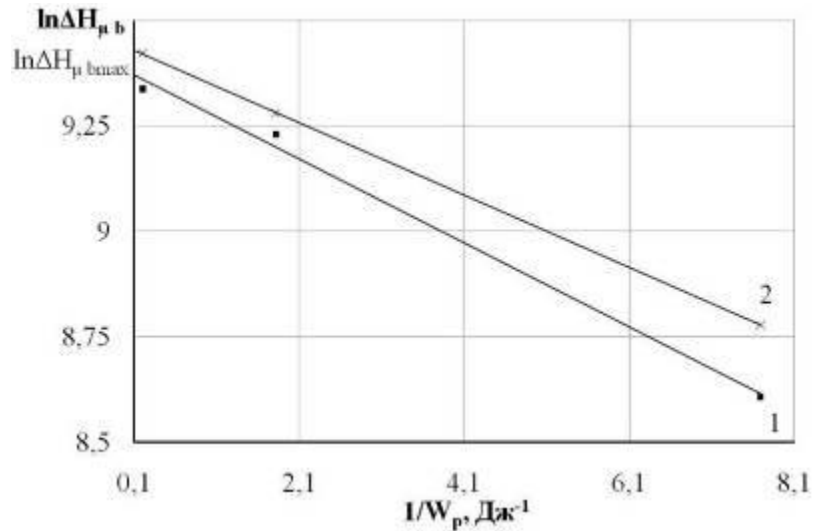
Предекспоненціальний фактор (табл. Д.16) знаходимо за відрізком, який відсікається на осі ординат прямої експоненціально спадної залежності $\ln \Delta h_b$ від W_p^{-1} (рис. Д.21), продовженої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta h_b = \ln \Delta h_{bmax}$ при $W_p^{-1} \rightarrow 0$). Результати розрахунку енергії активації $E_{b\Delta h}$ константи рівняння (Д.16) прогнозування товщини зміцненого шару, визначену двома способами, перший, коли $E_{b\Delta h} = W_p$, другий – при $E_{b\Delta h} = |tg\alpha|$, занесені до табл. Д.16.

Деяку несумісність значень константи ЕІЛ $E_{b\Delta h}$ (до 0,6 %), визначену різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівняння (Д.17) між логарифмом значень мікротвердості і величиною зворотної енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta H_{\mu b}$ від W_p^{-1} (рис. Д.22).

Як впливає з графіка (рис. Д.22), залежності $\ln \Delta H_{\mu b}$ від $(W_p)^{-1}$ прагнуть до прямої лінії. Значення тангенсів кутів нахилу прямих до осі абсцис на ділянці експоненціально спадної залежності занесені до табл. Д.17. Предекспоненціальні фактори знаходимо за відрізками, які відсікаються на осі ординат прямих експоненціально спадних залежностей $\ln \Delta H_{\mu b}$ від $(W_p)^{-1}$ (рис.

Д.22), продовжені до значення абсциси $(W_p)^{-1} = 0$ ($\ln \Delta H_{\mu b} = \ln \Delta H_{\mu b \max}$ при $(W_p)^{-1} \rightarrow 0$).



1 – сталь 20; 2 – сталь 40

Рисунок Д.22 – Залежність $\ln \Delta H_{\mu b}$ від $(W_p)^{-1}$ зміцненого шару при формуванні покриттів системи Al-C-B методом ЕІЛ

Таблиця Д.17 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{b\Delta H_{\mu}}$) і константи рівняння прогнозування мікротвердості зміцненого шару при формуванні покриттів системи Al-C-B методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40

Основа	$E_{b\Delta H_{\mu}} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{b\Delta H_{\mu}} = W_p$, Дж	%	$\Delta H_{\mu b \max}$, МПа
Сталь 20	0,097	0,099	2	11849
Сталь 40	0,086	0,085	1	12544

Результати розрахунку енергії активації $E_{b\Delta H_{\mu}}$ константи рівняння (Д.17) прогнозування мікротвердості зміцненого шару, визначені двома способами, перший, коли $E_{b\Delta H_{\mu}} = W_p$, другий – при $E_{b\Delta H_{\mu}} = |tg\alpha|$, занесені до табл. Д.17. Деяку несумісність значень константи ЕІЛ $E_{b\Delta H_{\mu}}$ (до 2 %), визначених різними

способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівняння шорсткості (Д.18) між логарифмом значень шорсткості і величиною зворотною енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta Ra_b$ від W_p^{-1} при формуванні покриттів системи Al-C-V методом ЕІЛ сталі 20 та 40 (рис. Д.23).

Результати розрахунку константи $\Delta Ra_{b,max}$ та енергії активації $E_{b\Delta Ra}$ (константи рівняння (Д.18) прогнозування шорсткості поверхні), визначені двома способами, перший, коли $E_{b\Delta Ra} = W_p$, другий – при $E_{b\Delta Ra} = |tg \alpha|$ занесені до табл. Д.18.

Деяку несумісність (біля 1 %) значень константи ЕІЛ ($E_{b\Delta Ra}$), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

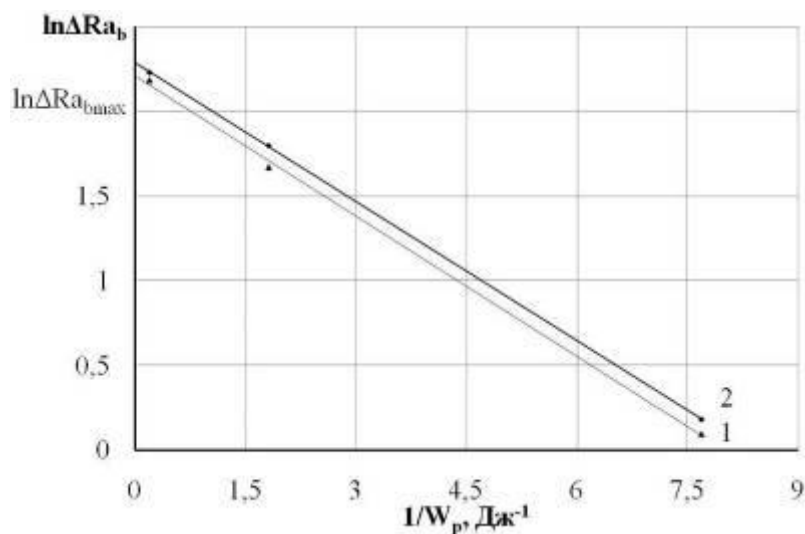
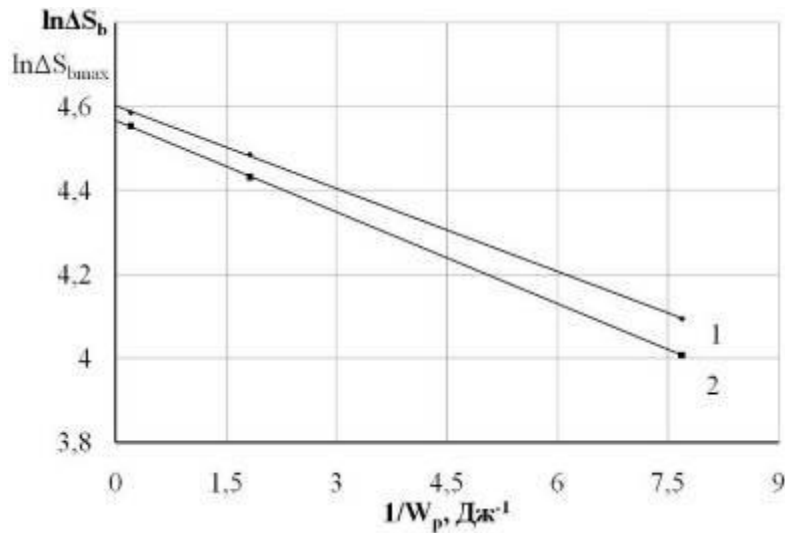


Рисунок Д.23 – Залежність $\ln \Delta Ra$ від W_p^{-1} при формуванні покриттів системи Al-C-V методом ЕІЛ: 1 – сталь 20; 2 – сталь 40

Таблиця Д.18 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{b\Delta Ra}$) і константи рівняння прогнозування шорсткості поверхні при формуванні покриттів системи АІ-С-В методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40

Основа	$E_{b\Delta Ra} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{b\Delta Ra} = W_p$, Дж	%	ΔRa_{bmax} , мкм
Сталь 20	0,279	0,276	1	9,12
Сталь 40	0,273	0,274	0,4	9,88

Відповідно до рівняння суцільності зміцненого шару (Д.19) між логарифмом значень суцільності і зворотною величиною енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta S_b$ від W_p^{-1} (рис. Д.24).



1 – сталь 20; 2 – сталь 40

Рисунок Д.24 – Залежність $\ln \Delta S_b$ від W_p^{-1} при формуванні покриттів системи АІ-С-В методом ЕІЛ із застосуванням СТС

Результати розрахунку константи ΔS_{bmax} , енергії активації $E_{b\Delta S}$ (констант рівняння (Д.19) прогнозування суцільності зміцненого шару), визначені двома

способами, перший, коли $E_{b\Delta S} = W_p$, другий – при $E_{b\Delta S} = |tg\alpha|$, занесені до табл. Д.18.

Таблиця Д.18 – Розрахунок константи ЕІЛ ($E_{b\Delta S}$) і константи суцільності зміцненого шару при формуванні покриттів системи АІ-С-В методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40

Основа	$E_{b\Delta S} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{b\Delta S} = W_p$, Дж	%	ΔS_{bmax} , %
Сталь 20	0,073	0,072	1,4	97
Сталь 40	0,065	0,065	1,5	100

Деяку несумісність (до 1,5 %) значень константи ЕІЛ $E_{b\Delta S}$, визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Зведені дані констант ЕІЛ, необхідні для розрахунку параметрів якості поверхневого шару, наведені в табл. Д.19.

Таблиця Д.19 – Зведені дані констант ЕІЛ при формуванні покриттів системи АІ-С-В методом ЕІЛ сталей 20 та 40

Основа	$E_{b\Delta h} = |tg\alpha|$, Дж	Δh_{bmax} , МКМ	$E_{b\Delta H_\mu} = |tg\alpha|$, Дж	$\Delta H_{\mu bmax}$, МПа	$E_{b\Delta S} = |tg\alpha|$, Дж	ΔS_{bmax} , %	$E_{b\Delta Ra} = |tg\alpha|$, Дж	ΔRa_{bmax} , МКМ
Сталь 20	0,176	78	0,097	11849	0,073	97	0,279	9,12
Сталь 40	0,185	62	0,086	12544	0,065	100	0,273	9,88

На підставі вище запропонованої математичної моделі (рівняння Д.16-Д.20) і методики визначення констант рівнянь прогнозування товщини зміцненого шару (Δh_{bmax} та енергії активації $E_{b\Delta h}$), максимальної мікротвердості зміцненого шару ($\Delta H_{\mu bmax}$ та енергії активації $E_{b\Delta H_\mu}$), максимальної шорсткості

поверхні (ΔRa_{bmax} і енергії $E_{b\Delta Ra}$), а також рівнянь прогнозування суцільності зміцненого шару (максимальної суцільності ΔS_{bmax} та енергії $E_{b\Delta S}$) при формуванні покриттів системи Al-C-B методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40, можна скласти алгоритм, що дозволяє прогнозувати основні технологічні параметри ЕІЛ.

Сутність алгоритму полягає в наступному:

1. Експериментально вимірюється товщина і мікротвердість зміцненого шару, шорсткість поверхні і суцільність шару, відповідно, Δh_b , $\Delta H_{\mu b}$, ΔRa_b , ΔS_b при різних енергіях розряду W_p .

2. Будуються графіки залежності Δh_b , $\Delta H_{\mu b}$, ΔRa_b , ΔS_b та $\ln \Delta h_b$, $\ln \Delta H_{\mu b}$, $\ln \Delta Ra_b$, $\ln \Delta S_b$ від W_p^{-1} .

3. Визначається критичні енергії розряду (енергії активації) $E_{b\Delta h}$, $E_{b\Delta H_{\mu}}$, $E_{b\Delta Ra}$, $E_{b\Delta S}$, як $|\operatorname{tg}\alpha|$, де α – кут нахилу прямих залежностей $\ln \Delta h_b$, $\ln \Delta H_{\mu b}$, $\ln \Delta Ra_b$ і $\ln \Delta S_b$ від W_p^{-1} .

4. За відрізком, який відсікається на осі ординат прямої, екстрапольованої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta h_b = \ln \Delta h_{bmax}$, $\ln \Delta H_{\mu b} = \ln \Delta H_{\mu bmax}$, $\ln \Delta Ra_b = \ln \Delta Ra_{bmax}$ і $\ln \Delta S_b = \ln \Delta S_{bmax}$).

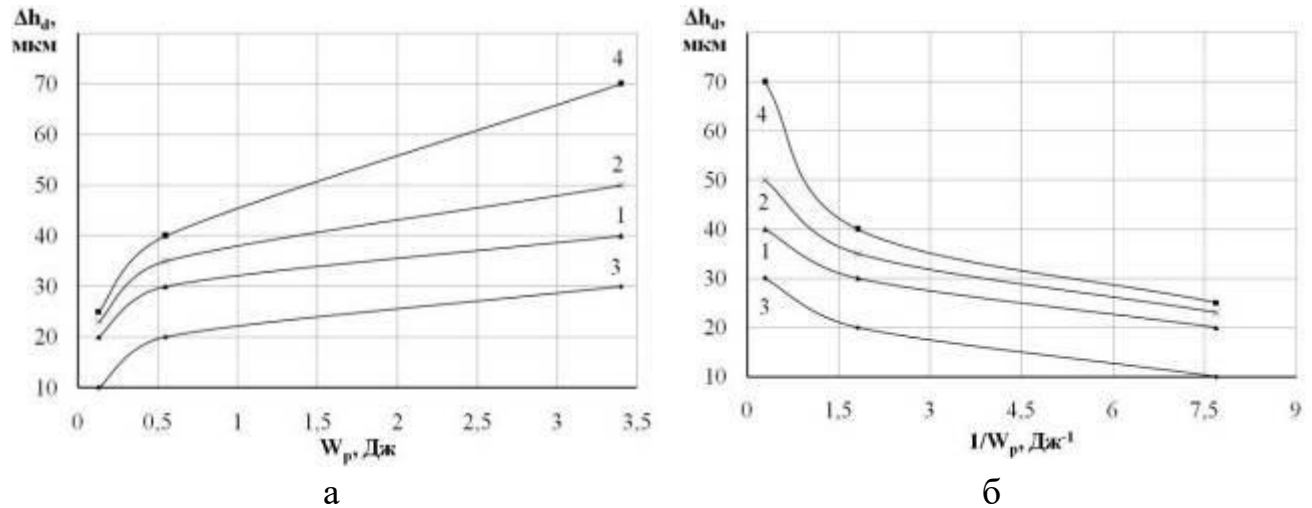
5. Згідно (Д.20) визначається режим ЕІЛ, необхідний для отримання заданої товщини шарів, твердості, шорсткості та суцільності при формуванні покриттів системи Al-C-B методом ЕІЛ із застосуванням СТС.

Д.4 Математична модель прогнозування якості сульфомолібденових поверхневих шарів

На підставі експериментальних досліджень встановлено, що при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40 (рис. Д.25) зі збільшенням

енергії розряду збільшується товщина шару зниженої мікротвердості (h_{dm}) і товщина зміцненого шару (h_{d3}). Між величинами h_{dm} , h_{d3} і зворотною енергією розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta h_{dm} = \Delta h_{dmax}$ та $\Delta h_{d3} = \Delta h_{dmax}$, існує експоненціальна залежність (рис. Д.25, б).

З ростом енергії розряду товщини шару зниженої мікротвердості і зміцненого шару збільшуються і досягають максимальної величини (Δh_{dmmax} і Δh_{d3max} відповідно). Крім того, збільшення h_{dm} і h_{d3} тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування шару ($E_{d\Delta h}$).



1 – сталь 20, шар зниженої мікротвердості; 2 – сталь 20, зміцнений шар;
3 – сталь 40, шар зниженої мікротвердості; 4 – сталь 40, зміцнений шар

Рисунок Д.25 – Залежність товщини шару зниженої мікротвердості та зміцненого шарів при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ: а – від енергії розряду W_p ; б – від зворотної величини енергії розряду $1/W_p$

$$\Delta h_{dm} = \Delta h_{dmmax} \cdot e^{\frac{-E_{d\Delta h}}{W_p}}. \quad (\text{Д.21})$$

Залежність (Д.21) – рівняння прогнозування товщини шару зниженої мікротвердості при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ.

Аналогічно для зміцненого шару рівняння (Д.21) приймає вигляд:

$$\Delta h_{d3} = \Delta h_{d3max} \cdot e^{\frac{-E_{d\Delta h}}{W_p}}. \quad (Д.22)$$

На рис. Д.26 показана залежність величини твердості шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40 від енергії розряду: зі збільшенням енергії розряду мікротвердість обох шарів збільшується. Між мікротвердістю $H_{\mu d}$ і величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta H_{\mu dm} = \Delta H_{\mu dmmax}$ і $\Delta H_{\mu d3} = \Delta H_{\mu d3max}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. Д.26, б).

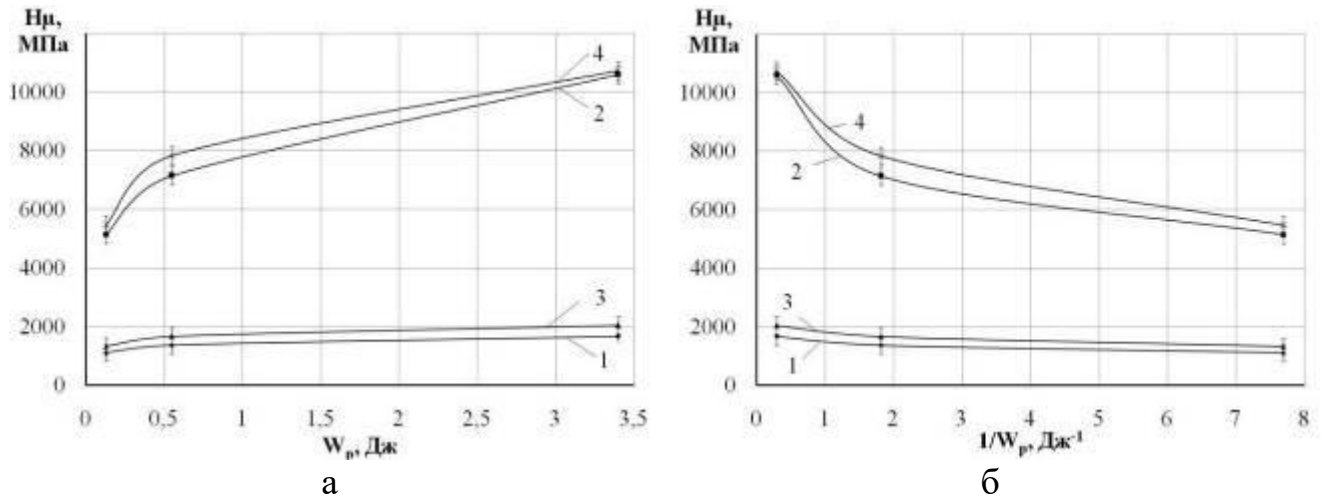
З ростом енергії розряду мікротвердість шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару, у період до досягнення максимальної мікротвердості ($\Delta H_{\mu dmmax}$ і $\Delta H_{\mu d3max}$, відповідно), збільшується тим сильніше, чим більше енергія розряду, витрачена на формування відповідного шару. Крім того, мікротвердість зростає тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування шару при сульфомолібденуванні ($E_{d\Delta H_{\mu}}$).

$$\Delta H_{\mu dm} = \Delta H_{\mu dmmax} \cdot e^{\frac{-E_{d\Delta H_{\mu}}}{W_p}}. \quad (Д.23)$$

Залежність (Д.23) – рівняння прогнозування мікротвердості шару зниженої мікротвердості при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ.

Аналогічно для зміцненого шару рівняння (Д.23) приймає вигляд:

$$\Delta H_{\mu d3} = \Delta H_{\mu d3 \max} \cdot e^{\frac{-E_d \Delta H_{\mu}}{W_p}} \quad (D.24)$$



а – від енергії розряду W_p ; б – від зворотної величини енергії розряду $1/W_p$;

1 – сталь 20, шар зниженої мікротвердості; 2 – сталь 20, зміцнений шар;

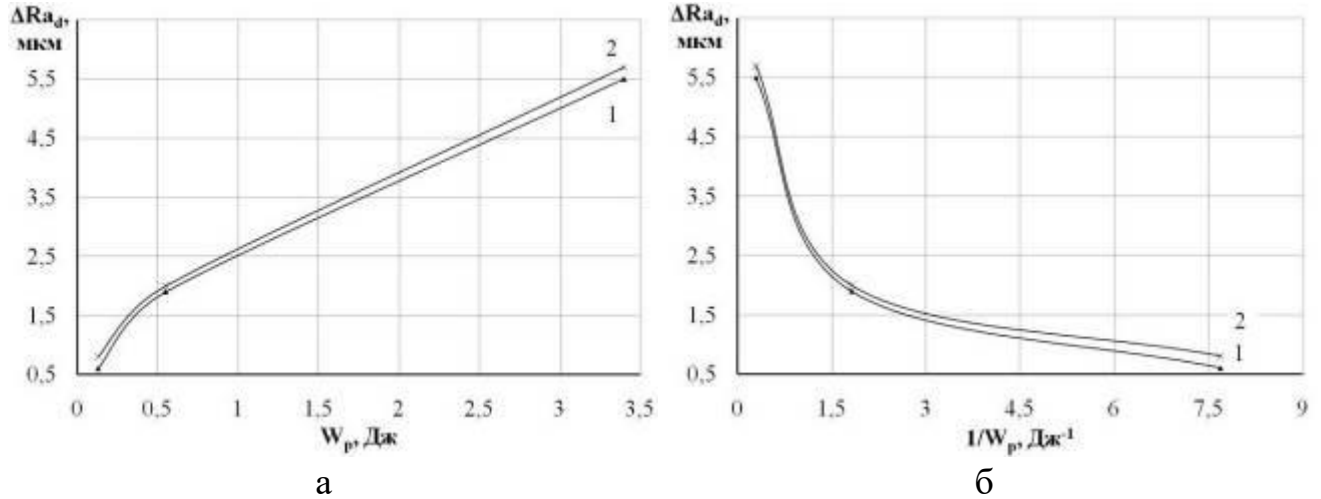
3 – сталь 40, шар зниженої мікротвердості; 4 – сталь 40, зміцнений шар

Рисунок Д.26 – Залежність мікротвердості шару зниженої мікротвердості та зміцненого шарів при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ

Між шорсткістю поверхні Ra_d і величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ до періоду, коли $\Delta Ra_d = \Delta Ra_{d \max}$, існує експоненціальна убутна залежність (див. рис. Д.27). З ростом енергії розряду шорсткість поверхні збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації, витрачена на формування шорсткості поверхні $E_{d \Delta Ra}$.

$$\Delta Ra_d = \Delta Ra_{d \max} \cdot e^{\frac{-E_d \Delta Ra}{W_p}} \quad (D.25)$$

Залежність (Д.25) – рівняння прогнозування шорсткості поверхні при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ.



а – від розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок Д.27 – Залежність шорсткості поверхні при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2)

Між суцільністю шару зниженої мікротвердості S_{dM} та зміцненого шару S_{d3} й величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta S_{dM} = \Delta S_{dMmax}$ та $\Delta S_{d3} = \Delta S_{d3max}$ існує експоненціальна убутна залежність (див. рис. Д.28, б).

$$\Delta S_{dM} = \Delta S_{dMmax} \cdot e^{\frac{-E_{d\Delta S}}{W_p}} \quad (\text{Д.26})$$

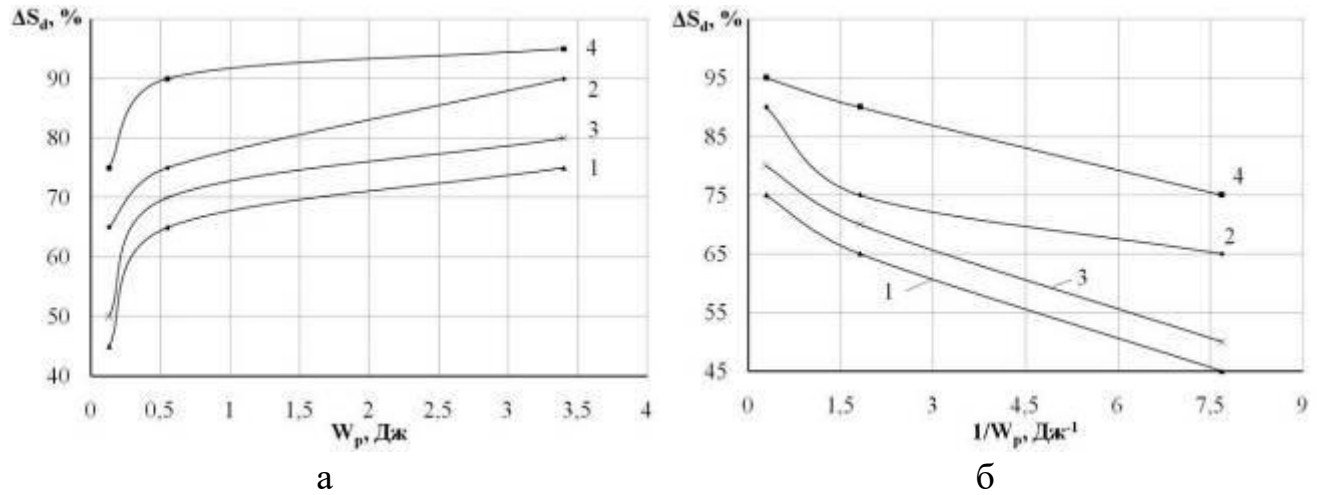
Залежність (Д.26) – рівняння прогнозування суцільності шару зниженої мікротвердості при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ.

Аналогічно для зміцненого шару рівняння (Д.26) набуває вигляд:

$$\Delta S_{d3} = \Delta S_{d3max} \cdot e^{\frac{-E_{d\Delta S}}{W_p}} \quad (\text{Д.27})$$

Режим ЕІЛ, необхідний для отримання потрібної товщини, мікротвердості та суцільності шару зниженої мікротвердості та зміцненого

шару, шорсткості поверхні при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ, можна визначити відповідно до рівнянь (Д.21-Д.27).



а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$;

1 – сталь 20, шар зниженої мікротвердості; 2 – сталь 20, зміцнений шар;

3 – сталь 40, шар зниженої мікротвердості; 4 – сталь 40, зміцнений шар

Рисунок Д.28 – Залежність суцільності шарів при сульфомолібденуванні

методом ЕІЛ сталі 20 та 40

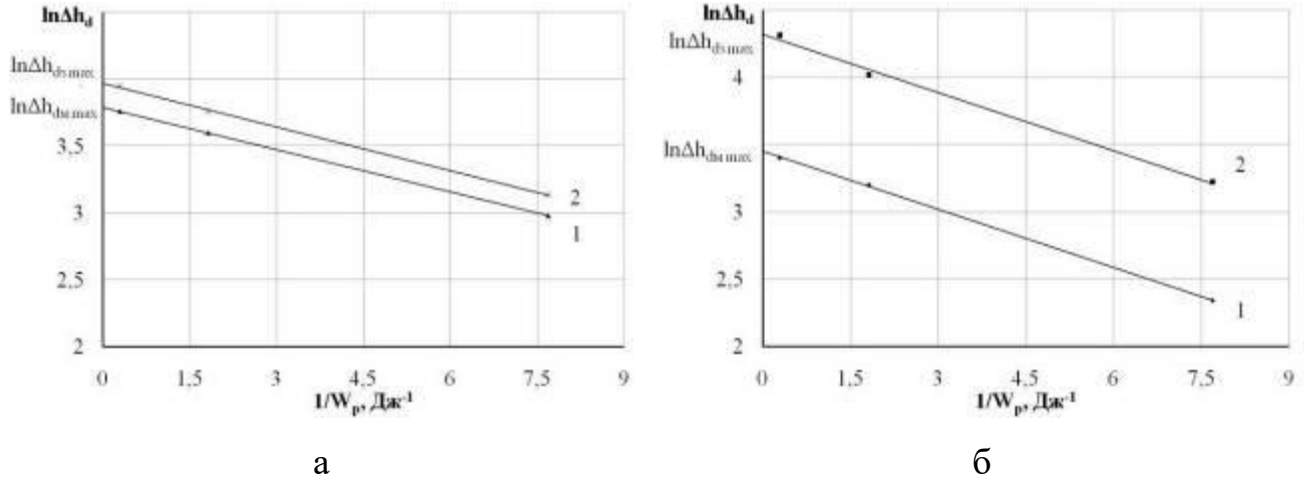
Тоді

$$\begin{aligned}
 W_p &= \frac{E_{d\Delta h}}{\ln \frac{\Delta h_{dMmax}}{\Delta h_x}}; & W_p &= \frac{E_{d\Delta h}}{\ln \frac{\Delta h_{d3max}}{\Delta h_x}}; \\
 W_p &= \frac{E_{d\Delta H_\mu}}{\ln \frac{\Delta H_{\mu dMmax}}{\Delta H_{\mu x}}}; & W_p &= \frac{E_{d\Delta H_\mu}}{\ln \frac{\Delta H_{\mu d3max}}{\Delta H_{\mu x}}}; \\
 W_p &= \frac{E_{d\Delta Ra}}{\ln \frac{\Delta Ra_{dmax}}{\Delta Ra_x}}; \\
 W_p &= \frac{E_{d\Delta S}}{\ln \frac{\Delta S_{dMmax}}{\Delta S_x}}; & W_p &= \frac{E_{d\Delta S}}{\ln \frac{\Delta S_{d3max}}{\Delta S_x}}.
 \end{aligned} \tag{Д.28}$$

Відповідно до рівнянь (Д.21) та (Д.22) між логарифмом значень товщини шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару і величиною зворотної енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta h_d$ від (W_p^{-1}) .

Як впливає з графіку (рис. Д.29), залежність $\ln \Delta h_{dm}$ від W_p^{-1} прагне до прямої лінії. Значення тангенсів кутів нахилу прямих до осі абсцис на ділянці експоненціально зростаючої залежності занесені до табл. Д.20 та Д.21.

Предекспоненціальний фактор (табл. Д.20 та Д.21) знаходимо за відрізком, який відсікається на осі ординат прямої експоненціально спадної залежності $\ln \Delta h_d$ від W_p^{-1} (рис. Д.29), продовженої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ (при $W_p^{-1} \rightarrow 0 \ln \Delta h_{dm} = \ln \Delta h_{dm \max}$ та $\ln \Delta h_{d3} = \ln \Delta h_{d3 \max}$).



а – сталь 20; б – сталь 40: 1 – шар зниженої мікротвердості; 2 – зміцнений шар

Рисунок Д.29 – Залежність $\ln \Delta h_d$ від $(W_p)^{-1}$ при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС

Таблиця Д.20 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{d\Delta h}$), константи рівняння прогнозування товщини шару зниженої мікротвердості $\Delta h_{dm\ max}$ та константи рівняння прогнозування товщини зміцненого шару $\Delta h_{d3\ max}$ при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20

$E_{d\Delta h} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{d\Delta h} = W_p$, Дж	%	$\Delta h_{dm\ max}$, МКМ	$\Delta h_{d3\ max}$, МКМ
0,105*	0,106*	4	44	53
0,109**	0,108**			

* – для шару зниженої мікротвердості; ** – для зміцненого шару

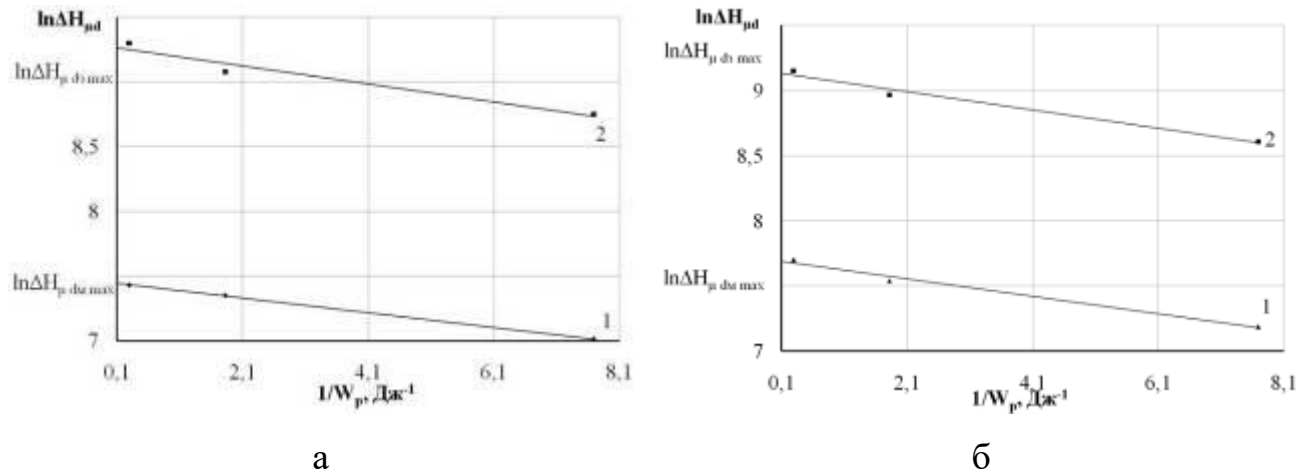
Таблиця Д.21 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{d\Delta h}$), константи рівняння прогнозування товщини шару зниженої мікротвердості $\Delta h_{dm\ max}$ та константи рівняння прогнозування товщини зміцненого шару $\Delta h_{d3\ max}$ при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 40

$E_{d\Delta h} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{d\Delta h} = W_p$, Дж	%	$\Delta h_{dm\ max}$, МКМ	$\Delta h_{d3\ max}$, МКМ
0,143*	0,144*	2	32	75
0,146**	0,144**			

* – для шару зниженої мікротвердості; ** – для зміцненого шару

Результати розрахунку енергії активації $E_{d\Delta h}$ (константи рівнянь (Д.21) та (Д.22) прогнозування товщини шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару, відповідно), визначені двома способами, перший, коли $E_{d\Delta h} = W_p$, другий – при $E_{d\Delta h} = |tg\alpha|$, занесені до табл. Д.20 і Д.21. Деяку несумісність значень констант ЕІЛ $E_{d\Delta h}$ (до 4 %), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівнянь (Д.23) і (Д.24) між логарифмом значень мікротвердості і величиною зворотної енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta H_{\mu dM}$ і $\ln \Delta H_{\mu d3}$ від W_p^{-1} (рис. Д.30).



а – сталь 20; б – сталь 40: 1 – шар зниженої мікротвердості; 2 – зміцнений шар

Рисунок Д.30 – Залежність $\ln \Delta H_{\mu d}$ від $(W_p)^{-1}$ шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ

Як впливає з графіка (рис. Д.30), залежності $\ln \Delta H_{\mu d}$ від $(W_p)^{-1}$ прагнуть до прямої лінії. Значення тангенсів кутів нахилу прямих до осі абсцис на ділянці експоненціально спадної залежності занесені до табл. Д.22 і Д.23.

Предекспоненціальні фактори знаходимо за відрізками, які відсікаються на осі ординат прямих експоненціально спадних залежностей $\ln \Delta H_{\mu d}$ від $(W_p)^{-1}$ (рис. Д.30), продовжені до значення абсциси $(W_p)^{-1} = 0$ ($\ln \Delta H_{\mu d} = \ln \Delta H_{\mu d \max}$ при $(W_p)^{-1} \rightarrow 0$).

Результати розрахунку енергії активації $E_{\Delta H_{\mu d}}$ (константи рівняння (Д.23) та (Д.24), відповідно, прогнозування мікротвердості шару зниженої

мікротвердості та зміцненого шару), визначені двома способами, перший, коли $E_{\Delta H_{\mu d}} = W_p$, другий – при $E_{\Delta H_{\mu d}} = |tg \alpha|$, занесені до табл. Д.22 і Д.23.

Таблиця Д.22 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{\Delta H_{\mu d}}$), константи рівняння прогнозування мікротвердості шару зниженої мікротвердості $\Delta H_{\mu dm max}$ та константи рівняння прогнозування мікротвердості зміцненого шару $\Delta H_{\mu d3 max}$ при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20

$E_{\Delta H_{\mu d}} = |tg \alpha|$, Дж	$E_{\Delta H_{\mu d}} = W_p$, Дж	%	$\Delta H_{\mu dm max}$, МКМ	$\Delta H_{\mu d3 max}$, МКМ
0,058*	0,060*	5	1718	10604
0,061**	0,058**			

* – для шару зниженої мікротвердості; ** – для зміцненого шару

Таблиця Д.23 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{\Delta H_{\mu d}}$), константи рівняння прогнозування мікротвердості шару зниженої мікротвердості $\Delta H_{\mu dm max}$ та константи рівняння прогнозування мікротвердості зміцненого шару $\Delta H_{\mu d3 max}$ при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 40

$E_{\Delta H_{\mu d}} = |tg \alpha|$, Дж	$E_{\Delta H_{\mu d}} = W_p$, Дж	%	$\Delta H_{\mu dm max}$, МКМ	$\Delta H_{\mu d3 max}$, МКМ
0,069*	0,067*	4	2195	11083
0,070**	0,069**			

* – для шару зниженої мікротвердості; ** – для зміцненого шару

Деяку несумісність значень констант ЕІЛ $E_{\Delta H_{\mu d}}$ (до 5 %), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівняння шорсткості (Д.25) між логарифмом значень шорсткості і величиною зворотною енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta Ra_d$ від W_p^{-1} при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ (рис. Д.31).

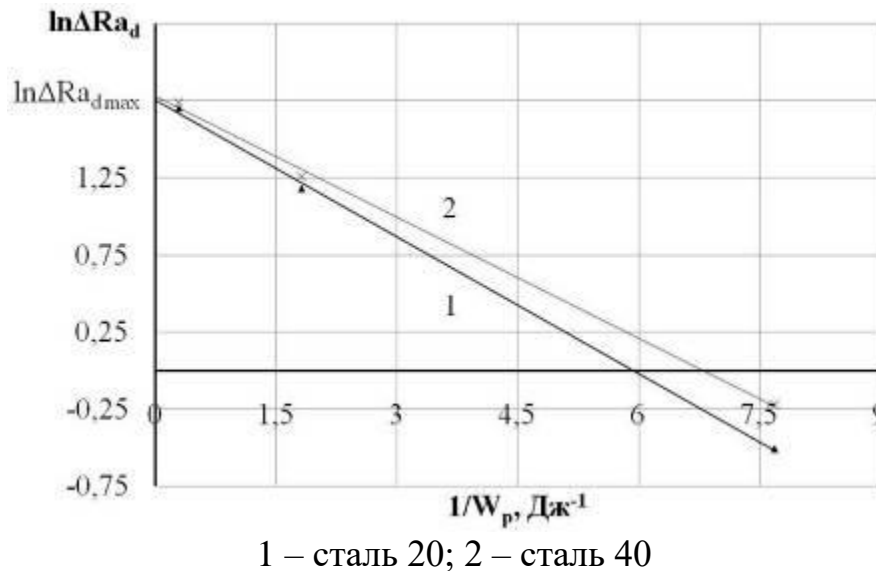


Рисунок Д.31 – Залежність $\ln \Delta Ra_d$ від W_p^{-1} при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС

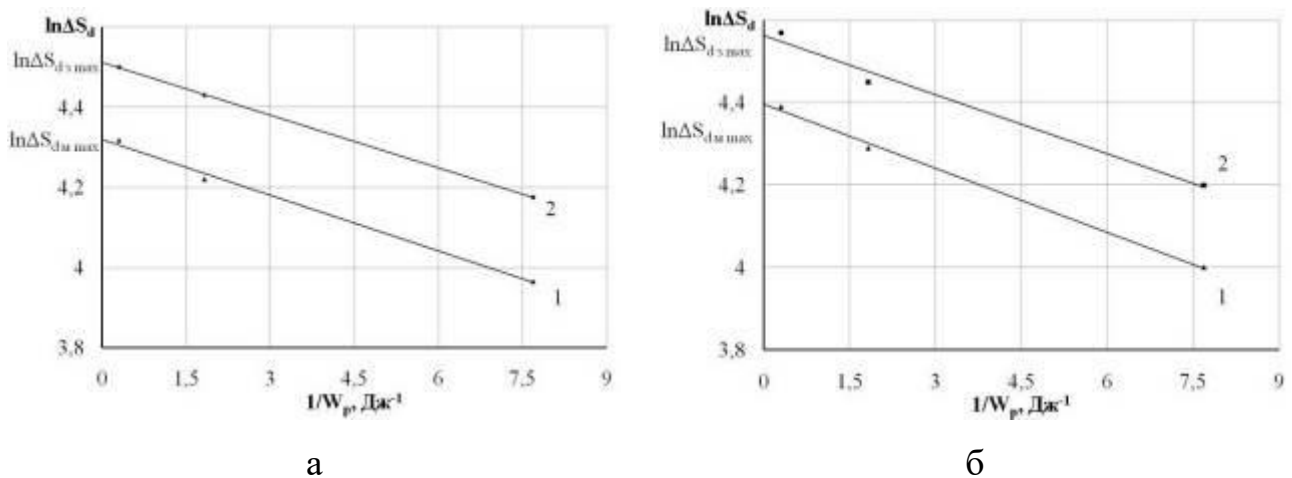
Результати розрахунку константи ΔRa_{dmax} та енергії активації $E_{d\Delta Ra}$ (константи рівняння (Д.25) прогнозування шорсткості поверхні), визначені двома способами, перший, коли $E_{d\Delta Ra} = W_p$, другий – при $E_{d\Delta Ra} = |tg \alpha|$ занесені до табл. Д.24.

Деяку несумісність (біля 1,5 %) значень констант ЕІЛ ($E_{d\Delta Ra}$), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Таблиця Д.24 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{\Delta Ra}$) і константи рівняння прогнозування шорсткості поверхні при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40

Основа	$E_{d\Delta Ra} = |tg \alpha|$, Дж	$E_{d\Delta Ra} = W_p$, Дж	%	ΔRa_{dmax} , мкм
Сталь 20	0,299	0,296	1,0	5,81
Сталь 40	0,265	0,261	1,5	5,94

Відповідно до рівнянь суцільності шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару, (Д.26) та (Д.27) відповідно, між логарифмом значень суцільності і зворотною величиною енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta S_d$ від W_p^{-1} (рис. Д.32).



а – сталь 20; б – сталь 40: 1 – шар зниженої мікротвердості; 2 – зміцнений шар

Рисунок Д.32 – Залежність $\ln \Delta S_d$ від (W_p^{-1}) шару зниженої мікротвердості

та зміцненого шару при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ

із застосуванням СТС

Результати розрахунку константи ΔS_{dmax} та ΔS_{d3max} , енергії активації $E_{d\Delta S}$ (констант рівняння (Д.26) прогнозування суцільності шару зниженої мікротвердості та рівняння (Д.27) прогнозування суцільності зміцненого шару,

відповідно), визначені двома способами, перший, коли $E_{d\Delta S} = W_p$, другий – при $E_{d\Delta S} = |tg\alpha|$, занесені до табл. Д.25 та Д.26. Деяку несумісність (до 4 %) значень констант ЕІЛ ($E_{d\Delta S}$), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Таблиця Д.25 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{d\Delta S}$), константи рівняння прогнозування суцільності шару зниженої мікротвердості $\Delta S_{d_{max}}$ та константи рівняння прогнозування суцільності зміцненого шару ΔS_{d_3max} при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20

$E_{d\Delta S} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{d\Delta S} = W_p$, Дж	%	$\Delta S_{d_{max}}$, мкм	ΔS_{d_3max} , мкм
0,045*	0,046*	4	77	92
0,044**	0,044**			

* – для шару зниженої мікротвердості; ** – для зміцненого шару

Таблиця Д.26 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{d\Delta S}$), константи рівняння прогнозування суцільності шару зниженої мікротвердості $\Delta S_{d_{max}}$ та константи рівняння прогнозування суцільності зміцненого шару ΔS_{d_3max} при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 40

$E_{d\Delta S} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{d\Delta S} = W_p$, Дж	%	$\Delta S_{d_{max}}$, мкм	ΔS_{d_3max} , мкм
0,050*	0,050*	4	82	97
0,051**	0,052**			

* – для шару зниженої мікротвердості; ** – для зміцненого шару

Зведені дані констант ЕІЛ, необхідні для розрахунку параметрів якості поверхневого шару, наведені в табл. Д.27.

Таблиця Д.27 – Зведені дані констант ЕІЛ при сульфомолібденуванні сталей 20 та 40

Основа	Шар зниженої мікротвердості			Зміцнений шар			$E_{d\Delta h} =$ $= |\operatorname{tg} \alpha|$,	$E_{\Delta H_{\mu d}} =$ $= |\operatorname{tg} \alpha|$,	$E_{d\Delta Ra} =$ $= |\operatorname{tg} \alpha|$,	ΔRa_{\max} ,	$E_{d\Delta S} =$ $= |\operatorname{tg} \alpha|$,
	$\Delta h_{dm \max}$, МКМ	$\Delta H_{\mu dm \max}$, МПа	$\Delta S_{dm \max}$, %	$\Delta h_{d3 \max}$, МКМ	$\Delta H_{\mu d3 \max}$, МПа	$\Delta S_{d3 \max}$, %	Дж	Дж	Дж	МКМ	Дж
Сталь 20	44	1718	77	53	10604	92	0,106	0,060	0,299	5,81	0,045
Сталь 40	32	2195	82	75	11083	97	0,145	0,069	0,265	5,94	0,050

На підставі вище запропонованої математичної моделі (рівняння Д.21-Д.28) і методики визначення констант рівнянь прогнозування товщини шару зниженої мікротвердості ($\Delta h_{d_m \max}$), товщини зміцненого шару ($\Delta h_{d_3 \max}$) та енергії активації $E_{d\Delta h}$, максимальної мікротвердості шару зниженої мікротвердості ($\Delta H_{\mu d_m \max}$), максимальної мікротвердості зміцненого шару ($\Delta H_{\mu d_3 \max}$) та енергії активації ($E_{\Delta H_{\mu d}}$), максимальної шорсткості поверхні ($\Delta Ra_{d \max}$) і енергії ($E_{d\Delta Ra}$), а також рівнянь прогнозування суцільності шару зниженої мікротвердості (максимальної суцільності $\Delta S_{d_m \max}$) і зміцненого шару (максимальної суцільності $\Delta S_{d_3 \max}$ та енергії ($E_{d\Delta S}$) при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40, можна скласти алгоритм, що дозволяє прогнозувати основні технологічні параметри ЕІЛ шару при сульфомолібденуванні.

Сутність алгоритму полягає в наступному:

1. Експериментально вимірюється товщина і мікротвердість, суцільність шару зниженої мікротвердості і зміцненого шару, шорсткість поверхні, відповідно Δh_{d_m} і Δh_{d_3} , $\Delta H_{\mu d_m}$ і $\Delta H_{\mu d_3}$, ΔS_{d_m} і ΔS_{d_3} , ΔRa_d , при різних енергіях розряду W_p .

2. Будується графіки залежності Δh_{d_m} і Δh_{d_3} , $\Delta H_{\mu d_m}$ і $\Delta H_{\mu d_3}$, ΔS_{d_m} і ΔS_{d_3} , ΔRa_d , при $\ln \Delta h_{d_m}$ і $\ln \Delta h_{d_3}$, $\ln \Delta H_{\mu d_m}$ і $\ln \Delta H_{\mu d_3}$, $\ln \Delta S_{d_m}$ і $\ln \Delta S_{d_3}$, $\ln \Delta Ra_d$ від W_p^{-1} .

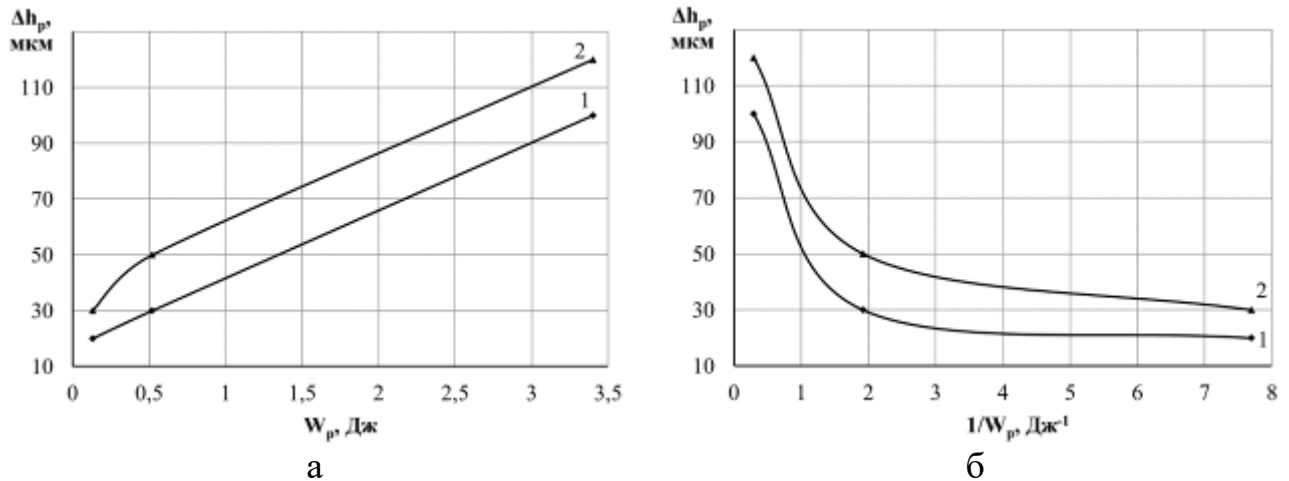
3. Визначається критичні енергії розряду (енергії активації) $E_{d\Delta h}$, $E_{d\Delta H_{\mu}}$, $E_{d\Delta S}$, $E_{d\Delta Ra}$, як $|\operatorname{tg}\alpha|$, де α – кут нахилу прямих залежностей $\ln \Delta h_d$, $\ln \Delta H_{\mu d}$, $\ln \Delta S_d$ і $\ln \Delta Ra_d$ від W_p^{-1} .

4. За відрізком, який відсікається на осі ординат прямої, екстрапольованої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta h_d = \ln \Delta h_{d \max}$, $\ln \Delta H_{\mu d} = \ln \Delta H_{\mu d \max}$, $\ln \Delta Ra_d = \ln \Delta Ra_{d \max}$ і $\ln \Delta S_d = \ln \Delta S_{d \max}$).

5. Згідно (Д.28) визначається режим ЕІЛ, необхідний для отримання заданої товщини шарів, твердості, шорсткості та суцільності при сульфомолібденуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС.

Д.5 Математична модель прогнозування якості карбонітрованих поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ

На підставі експериментальних досліджень встановлено, що при карбонітруванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40 (рис. Д.33) зі збільшенням енергії розряду збільшується товщина зміцненого шару (h_p , мкм). Між величинами h_p і зворотною енергією розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta h_p = \Delta h_{p \max}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. Д.33, б).



а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок Д.33 – Залежність величини товщини зміцненого шару при карбонітруванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20 (1) та 40 (2)

З ростом енергії розряду товщина зміцненого шару при цементації зростає і досягає максимальної величини (Δh_{pmax}). Крім того, збільшення h_p зміцненого шару зростає тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування зміцненого шару ($E_{p\Delta h}$).

$$\Delta h_p = \Delta h_{pmax} \cdot e^{\frac{-E_{p\Delta h}}{W_p}} . \quad (Д.29)$$

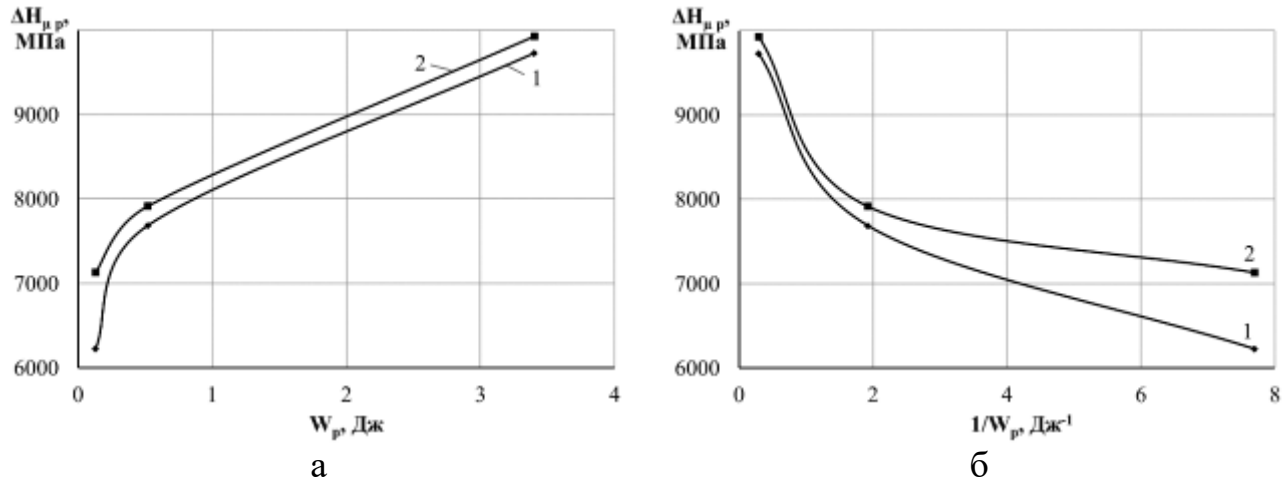
Залежність (Д.29) – рівняння прогнозування товщини зміцненого шару при карбонітруванні методом ЕІЛ.

На рис. Д.34 показана залежність величини мікротвердості зміцненого шару при карбонітруванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40 від енергії розряду: зі збільшенням енергії розряду мікротвердість збільшується. Між мікротвердістю зміцненого шару $H_{\mu p}$ і величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta H_{\mu p} = \Delta H_{\mu pmax}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. Д.34, б). З ростом енергії розряду мікротвердість зміцненого шару, у період до досягнення максимальної мікротвердості ($\Delta H_{\mu pmax}$), збільшується тим сильніше, чим більше енергія розряду, витрачена на формування зміцненого шару. Крім того, збільшення $H_{\mu p}$ зміцненого шару зростає тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування зміцненого шару ($E_{p\Delta H_\mu}$).

$$\Delta H_{\mu p} = \Delta H_{\mu pmax} \cdot e^{\frac{-E_{p\Delta H_\mu}}{W_p}} . \quad (Д.30)$$

Залежність (Д.30) – рівняння прогнозування мікротвердості зміцненого шару при карбонітруванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС.

Режими ЕІЛ при карбонітуванні впливають не тільки на товщину і мікротвердість зміцненого шару, а також на шорсткість сформованого поверхневого шару і його суцільність.



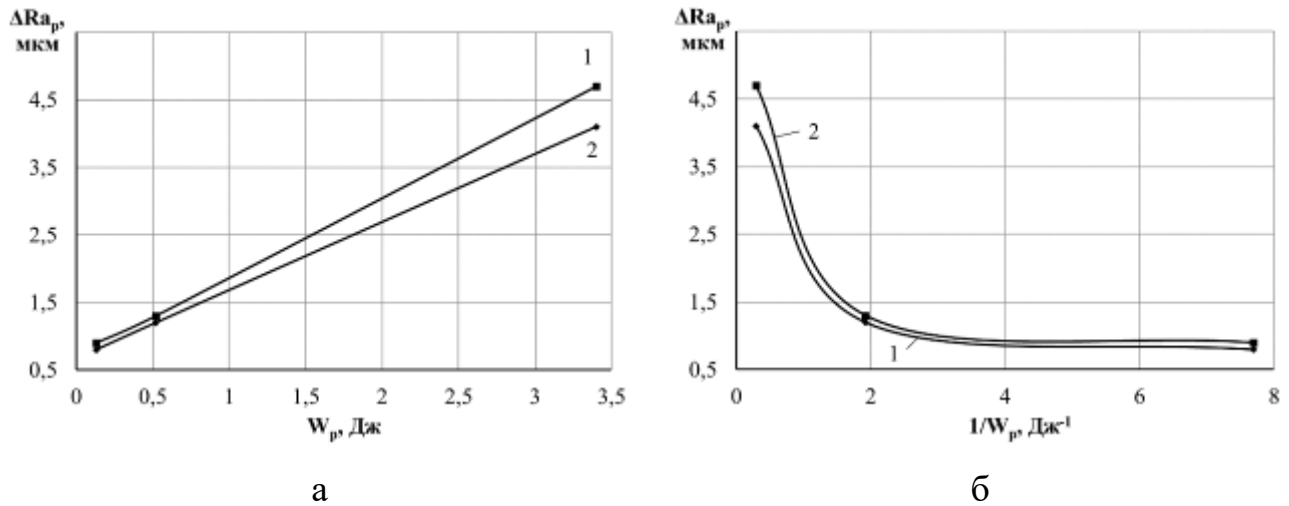
а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$

Рисунок Д.34 – Залежність мікротвердості зміцненого шару при карбонітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20 (1) та 40 (2)

Між шорсткістю поверхневого шару Ra_p і величиною зворотної енергії розряду (W_p^{-1}) при карбонітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС до періоду, коли $\Delta Ra_p = \Delta Ra_{pmax}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. Д.35). З ростом енергії розряду шорсткість поверхні збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації, витрачена на формування шорсткості поверхні $E_{p\Delta Ra}$.

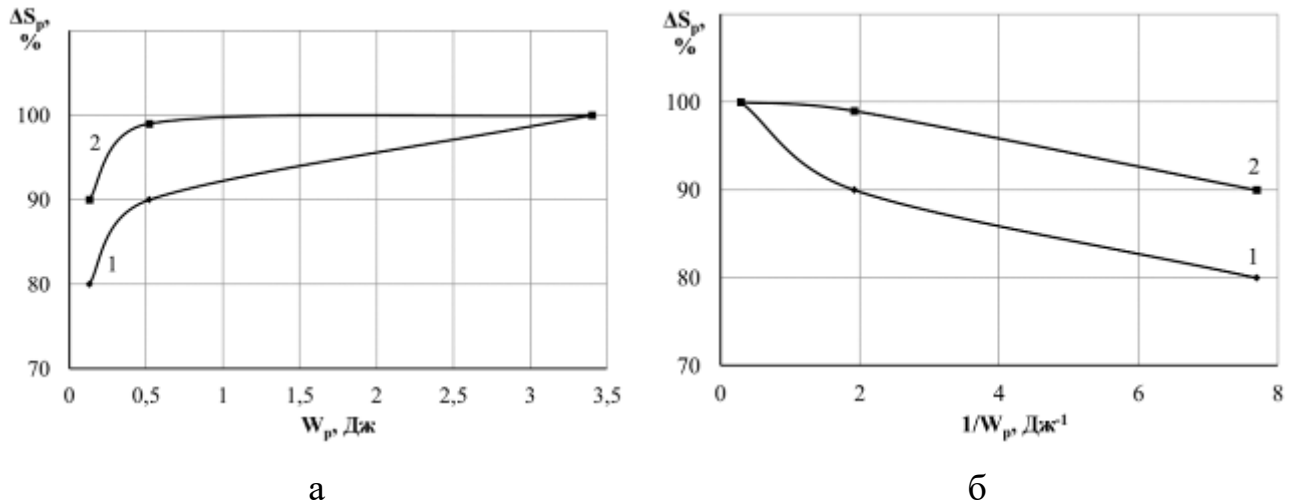
$$\Delta Ra_p = \Delta Ra_{pmax} \cdot e^{\frac{-E_{p\Delta Ra}}{W_p}} \quad (Д.31)$$

Залежність (Д.31) – рівняння прогнозування шорсткості поверхні при карбонітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС.



а – від розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$
 Рисунок Д.35 – Залежність шорсткості поверхні при карбонітуванні методом ЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2)

Між суцільністю шару S_p й величиною зворотною енергії розряду (W_p^{-1}) до періоду, коли $\Delta S_p = \Delta S_{pmax}$, існує експоненціальна убутна залежність (див. рис. Д.36).



а – від енергії розряду W_p ; б – від величини зворотної енергії розряду $1/W_p$
 Рисунок Д.36 – Залежність суцільності шару при карбонітуванні методом ЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2)

$$\Delta S_p = \Delta S_{p \max} \cdot e^{\frac{-E_{p\Delta S}}{W_p}}. \quad (\text{Д.32})$$

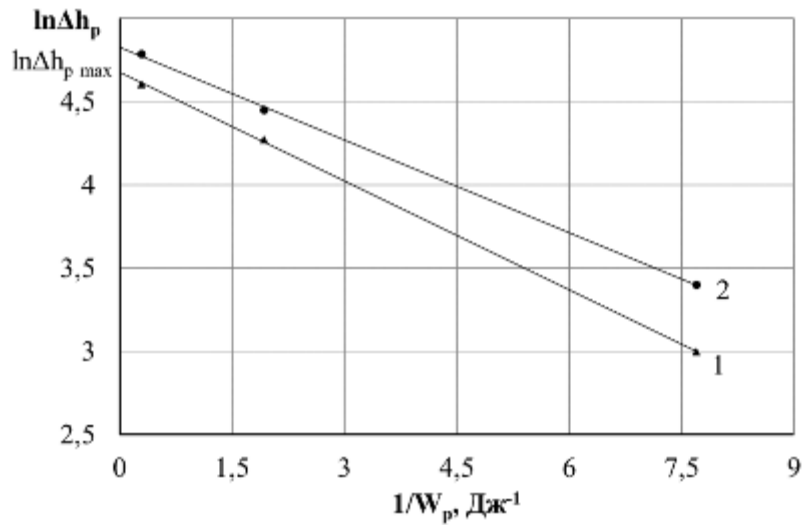
Залежність (Д.32) – рівняння прогнозування суцільності шару при карбонітруванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС.

Режим ЕІЛ, необхідний для отримання потрібної товщини та мікротвердості зміцненого шару, шорсткості та суцільності поверхневого шару при карбонітруванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС, можна визначити відповідно до рівнянь (Д.29-Д.32). Тоді, відповідно:

$$\begin{aligned} N_p &= \frac{E_{p\Delta h}}{\ln \frac{\Delta h_{p \max}}{\Delta h_x}}; & N_p &= \frac{E_{p\Delta H_\mu}}{\ln \frac{\Delta H_{\mu p \max}}{\Delta H_{\mu x}}}; \\ N_p &= \frac{E_{p\Delta Ra}}{\ln \frac{\Delta Ra_{p \max}}{\Delta Ra_x}}; & N_p &= \frac{E_{p\Delta S}}{\ln \frac{\Delta S_{p \max}}{\Delta S_x}}. \end{aligned} \quad (\text{Д.33})$$

Відповідно до рівняння (Д.29) між логарифмом значень товщини зміцненого шару і величиною зворотної енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta h_p$ від (W_p^{-1}) . Як впливає з графіків (рис. Д.37), залежність $\ln \Delta h_p$ від W_p^{-1} при карбонітруванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40 прагне до прямої лінії. Значення тангенсів кутів нахилу прямих до осі абсцис на ділянці експоненціально спадної залежності занесені до табл. Д.28.

Предекспоненціальний фактор (табл. Д.28) знаходимо по відрізьку, який відсікається на осі ординат прямої експоненціально спадної залежності $\ln \Delta h_p$ від W_p^{-1} (рис. 5), продовженої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta h_p = \ln \Delta h_{p \max}$ при $W_p^{-1} \rightarrow 0$).



1 – сталь 20; 2 – сталь 40

Рисунок Д.37 – Залежність $\ln \Delta h_p$ від W_p^{-1} при карбонітуванні методом ЕІЛ

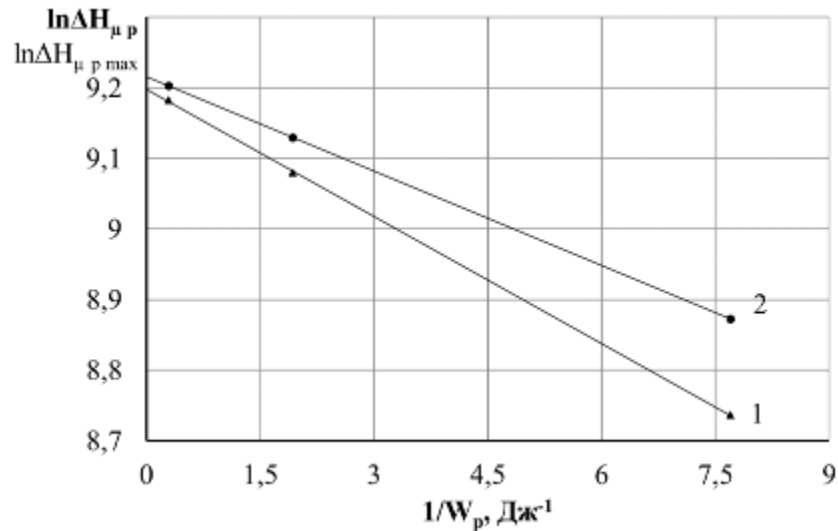
Таблиця Д.28 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{p\Delta h}$) і константи рівняння прогнозування товщини зміцненого шару при карбонітуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40

Основа	$E_{p\Delta h} = |tg \alpha|$, Дж	$E_{p\Delta h} = W_p$, Дж	%	$\Delta h_{p\max}$, МКМ
Сталь 20	0,221	0,218	1	108
Сталь 40	0,189	0,186	2	125

Результати розрахунку енергії активації $E_{p\Delta h}$ (константи рівняння (Д.29) прогнозування товщини зміцненого шару при карбонітуванні методом ЕІЛ), визначені двома способами, перший, коли $E_{p\Delta h} = W_p$, другий – при $E_{p\Delta h} = |tg \alpha|$, занесені до табл. Д.28.

Деяку несумісність значень констант ЕІЛ $E_{p\Delta h}$ (до 2 %), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівняння (Д.30) між логарифмом значень мікротвердості і величиною зворотної енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta H_{\mu p}$ від W_p^{-1} (рис. Д.38).



1 – сталь 20; 2 – сталь 40

Рисунок Д.38 – Залежність $\ln \Delta H_{\mu p}$ від W_p^{-1} при карбонітруванні методом ЕІЛ

Як впливає з графіка (рис. Д.38), залежність $\ln \Delta H_{\mu p}$ від W_p^{-1} при карбонітруванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40 прагне до прямої лінії. Значення тангенсів кутів нахилу прямих до осі абсцис на ділянці експоненціально спадної залежності занесені до табл. Д.29. Предекспоненціальний фактор (табл. Д.29) знаходимо по відрізку, який відсікається на осі ординат прямої експоненціально спадної залежності $\ln \Delta H_{\mu p}$ від W_p^{-1} (рис. Д.38), продовженої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta H_{\mu p} = \ln \Delta H_{\mu p \max}$ при $W_p^{-1} \rightarrow 0$).

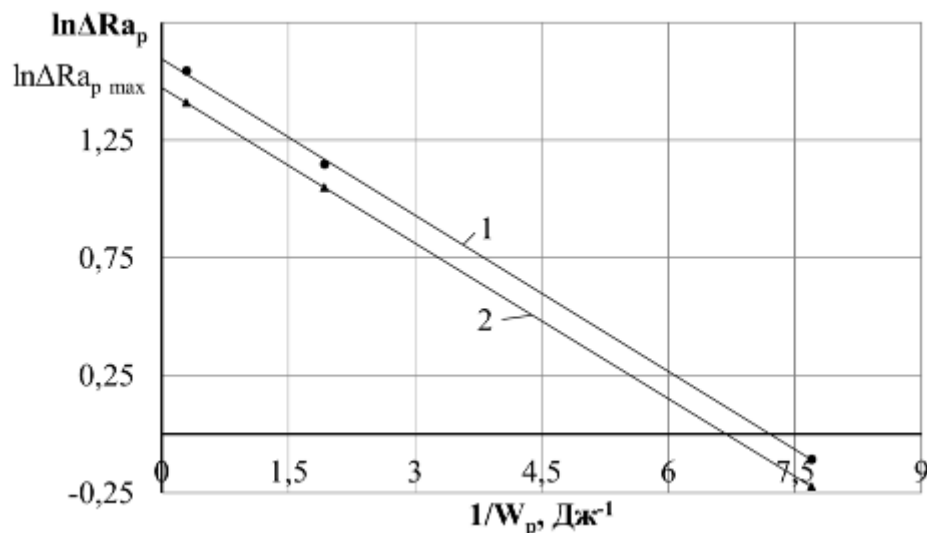
Результати розрахунку енергії активації $E_{p\Delta H_{\mu}}$ (константи рівняння (Д.30) прогнозування мікротвердості зміцненого шару при карбонітруванні методом ЕІЛ), визначені двома способами, перший, коли $E_{p\Delta H_{\mu}} = W_p$, другий – при $E_{p\Delta H_{\mu}} = |tg\alpha|$, занесені до табл. Д.29.

Таблиця Д.29 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{p\Delta H_\mu}$) і константи рівняння прогнозування мікротвердості зміцненого шару при карбонітруванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40

Основа	$E_{p\Delta H_\mu} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{p\Delta H_\mu} = W_p$, Дж	%	$\Delta H_{\mu p \max}$, МПа
Сталь 20	0,061	0,060	2	9882
Сталь 40	0,045	0,044	2	10060

Деяку несумісність значень констант ЕІЛ $E_{p\Delta H_\mu}$ (до 2 %), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівняння шорсткості (Д.31) між логарифмом значень шорсткості і величиною зворотною енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta Ra_p$ від W_p^{-1} при карбонітруванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20 та 40 (рис. Д.39).



1 – сталь 20; 2 – сталь 40

Рисунок Д.39 – Залежність $\ln \Delta Ra_p$ від W_p^{-1} при карбонітруванні методом ЕІЛ

Результати розрахунку константи ΔRa_{pmax} та енергії активації $E_{p\Delta Ra}$ (константи рівняння (Д.31) прогнозування шорсткості поверхні при карбонітруванні методом ЕІЛ), визначені двома способами, перший, коли $E_{p\Delta Ra} = W_p$, другий – при $E_{p\Delta Ra} = |tg\alpha|$ занесені до табл. Д.30.

Деяку несумісність (до 3 %) значень констант ЕІЛ ($E_{p\Delta Ra}$), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Таблиця Д.30 – Розрахунок константи енергії активації ($E_{p\Delta Ra}$) і константи рівняння прогнозування шорсткості поверхні при карбонітруванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40

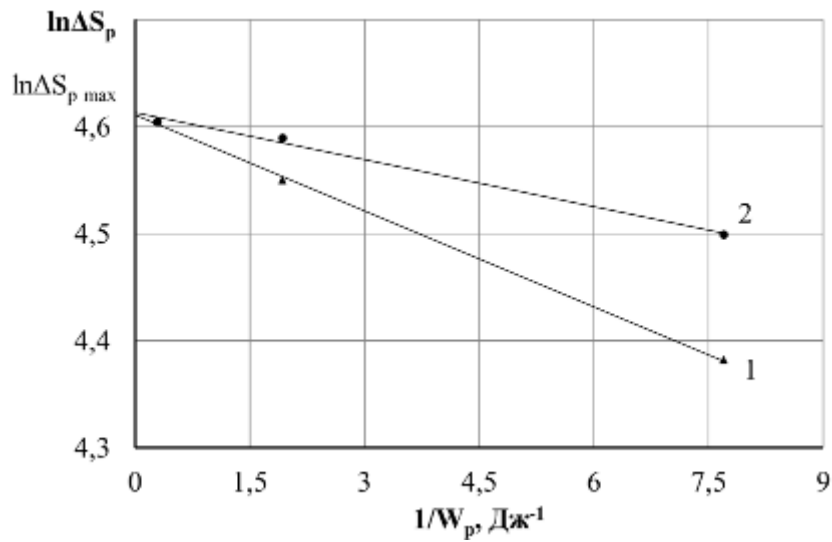
Основа	$E_{p\Delta Ra} = |tg\alpha|$, Дж	$E_{p\Delta Ra} = W_p$	%	ΔRa_{pmax} , мкм
Сталь 20	0,225	0,221	2	4,94
Сталь 40	0,227	0,220	3	4,37

Відповідно до рівняння суцільності (Д.32) між логарифмом значень суцільності і зворотною величиною енергії розряду повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta S_p$ від W_p^{-1} при карбонітруванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталі 20 та 40 (рис. Д.40).

Результати розрахунку константи ΔS_{pmax} та енергії активації $E_{p\Delta S}$ (константи рівняння (Д.32) прогнозування суцільності шару при карбонітруванні методом ЕІЛ), визначені двома способами, перший, коли $E_{p\Delta S} = W_p$, другий – при $E_{p\Delta S} = |tg\alpha|$ занесені до табл. Д.31.

Деяку несумісність (до 5 %) значень констант ЕІЛ ($E_{p\Delta S}$), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Зведені дані констант ЕІЛ, необхідні для розрахунку параметрів якості поверхневого шару, наведені в табл. Д.32.



1 – сталь 20; 2 – сталь 40

Рисунок Д.40 – Залежність $\ln \Delta S_p$ від W_p^{-1} при ЕІЛ карбонітуванні

Таблиця Д.31 – Розрахунок константи ЕІЛ ($E_{p\Delta S}$) і константи суцільності шару при карбонітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40

Основа	$E_{p\Delta S} = |tg \alpha|$, Дж	$E_{p\Delta S} = W_p$, Дж	%	ΔS_{pmax} , %
Сталь 20	0,014	0,015	5	100
Сталь 40	0,030	0,029	3	100

Таблиця Д.32 – Зведені дані констант ЕІЛ при карбонітуванні сталей 20 та 40

Підклад-ка	$E_{p\Delta h} = |tg \alpha|$, Дж	Δh_{pmax} , МКМ	$E_{p\Delta H_\mu} = |tg \alpha|$, Дж	$\Delta H_{\mu pmax}$, МПа	$E_{p\Delta Ra} = |tg \alpha|$, Дж	ΔRa_{pmax} , МКМ	$E_{p\Delta S} = |tg \alpha|$, Дж	ΔS_{pmax} , %
Сталь 20	0,221	108	0,061	9882	0,225	4,94	0,014	100
Сталь 40	0,189	125	0,045	10060	0,227	4,37	0,030	100

На підставі вище запропонованої математичної моделі (рівняння Д.29-Д.32) і методики визначення констант рівнянь прогнозування товщини карбонітрованого шару (Δh_{pmax} та енергії активації $E_{p\Delta h}$ при карбонітуванні методом ЕІЛ), максимальної мікротвердості поверхневого шару ($\Delta H_{\mu pmax}$ та енергії активації $E_{p\Delta H_{\mu}}$), максимальної шорсткості поверхні (ΔRa_{pmax} і енергії $E_{p\Delta Ra}$) та максимальної суцільності шару (ΔS_{pmax} і енергії $E_{p\Delta S}$) при карбонітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС сталей 20 та 40, можна скласти алгоритм, що дозволяє прогнозувати основні технологічні параметри ЕІЛ шару для будь-яких матеріалів катоду.

Сутність алгоритму полягає в наступному:

1. Експериментально вимірюється товщина, мікротвердість зміцненого шару, його шорсткість і суцільність, відповідно Δh_p , $\Delta H_{\mu p}$, ΔRa_p і ΔS_p при різних енергіях розряду W_p .

2. Будуються графіки залежності $\ln \Delta h_p$, $\ln \Delta H_{\mu p}$, $\ln \Delta Ra_p$, $\ln \Delta S_p$ від W_p^{-1} .

3. Визначається критичні енергії розряду (енергії активації) $E_{p\Delta h}$, $E_{p\Delta H_{\mu}}$, $E_{p\Delta Ra}$, $E_{p\Delta S}$ як $|\operatorname{tg}\alpha|$, де α – кут нахилу прямих залежностей $\ln \Delta h_p$, $\ln \Delta H_{\mu p}$, $\ln \Delta Ra_p$, $\ln \Delta S_p$ від W_p^{-1} .

4. За відрізком, який відсікається на осі ординат прямої, екстрапольованої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta h_p = \ln \Delta h_{pmax}$, $\ln \Delta H_{\mu p} = \ln \Delta H_{\mu pmax}$, $\ln \Delta Ra_p = \ln \Delta Ra_{pmax}$, $\ln \Delta S_p = \ln \Delta S_{pmax}$).

5. Згідно рівняння (Д.33) визначається режим ЕІЛ, необхідний для отримання заданої товщини зміцненого шару, його твердості, шорсткості поверхні та суцільності при карбонітуванні методом ЕІЛ із застосуванням СТС.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Гапоної Оксани Петрівни на АТ «Сумський завод «Насосенергомаш»

Цим актом підтверджуємо, що результати наукових досліджень та практичні рекомендації к.т.н. Гапоної Оксани Петрівни, що викладені в її публікаціях, патентах та монографіях по створенню функціональних покриттів, отриманих методом електроіскрового легування із застосуванням спеціального технологічного середовища (цементация, нітроцементация, сульфоалітування, сульфоцементация, покриття систем Al-S-C, Mo-S) рекомендовані до впровадження при розробленні технологічної документації на насоси конденсатної групи (типу КсВ). Розроблені покриття характеризуються високою зносостійкістю і припрацьовуваністю, що обумовлено утворенням на поверхні покриття, що складається із приповерхневого шару з підвищеним вмістом сірки (сульфоалітування, сульфоцементация, покриття систем Al-S-C, Mo-S) і зміцненого шару.

Розрахунковий економічний ефект від впровадження нової технології оброблення поверхонь складас 150 000 (сто п'ятдесят тисяч) грн. Акт впровадження не є підставою для взаємних фінансових розрахунків.

Головний технолог

П. В. Лизогуб

Головний зварник

О. А. Клименко



ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор ТОВ «ТРІЗ ЛТД»

В.Т.н. Марцинковський В.С.

«18» 11 2020 р.

АКТ

**про дослідно-виробничу апробацію результатів
 дисертаційної роботи Гапонової Оксани Петрівни**

Ми, що нижче підписалися, представник ТОВ «ТРІЗ» в особі провідного інженера Піддубного А.І. та представника Сумського національного аграрного університету Гапонової О.П. склали цей акт в тому, що у виробничих умовах підприємства ТОВ «ТРІЗ» було відпрацьовано технологічний процес зміцнення робочих поверхонь шийок валів роторів насоса HDO-11st. Flowserve зі сталі 40X під підшипники ковзання (ПК). Проведені дослідження структури та властивостей деталей, робочі поверхні яких оброблені згідно запропонованої технології: електроіскровим легуванням (ЕІЛ) із застосуванням спеціального технологічного середовища (СТС). Шийки валу обробляли наступним чином: спочатку здійснювали цементацію методом ЕІЛ (ЦЕІЛ) поверхонь компактним електродом-інструментом з графіту при енергії розряду $W_p = 4,6$ Дж і з продуктивністю $1 \text{ см}^2 / \text{хв}$; на оброблювану поверхню деталі наносили СТС, що складалося з порошку графіту і вазеліну, у співвідношенні відповідно 4:1; не чекаючи висихання СТС, проводили ЦЕІЛ компактним електродом-інструментом, на тому ж режимі і з однаковою продуктивністю.

Дослідження показали, що товщина зміцненого шару складає $h=0,02-0,04$ мм, мікротвердість 700-1200 HV. Порівняльними випробуваннями на зносостійкість встановлено, що покриття, отримані за запропонованою технологією зміцнення, не поступаються за властивостями покриттям, отриманими хіміко-термічною обробкою (цементації, нітроцементації).

Розроблена докторантом кафедри технічного сервісу СНАУ Гапоною О.П. технологія зміцнення поверхонь шийок валів роторів насоса HDO-11st. Flowserve під ПК захищена патентом України на корисну модель, є екологічно безпечною, економічною, не потребує значного часу обробки і захисту необроблюваних поверхонь.

Таким чином, розроблена технологія зміцнення поверхонь шийок валів роторів насоса HDO-11st. Flowserve під ПК методом ЕІЛ із застосуванням СТС, рекомендована до використання в умовах ТОВ «ТРІЗ ЛТД».

Очікуваний економічний ефект від впровадження нової технології складає 210 тис. (двісті десять тисяч) грн.

Представник ТОВ «ТРІЗ»

 Піддубний А.І.

Представник СНАУ

 Гапонова О.П.

ДОДАТОК Ж



АКТ

**впровадження результатів дисертаційної роботи
докторанта СНАУ Гапонової Оксани Петрівни
на Комунальному підприємстві «Міськводоканал»
Сумської міської ради**

В умовах КП «Міськводоканал» Сумської міської ради була здійснена промислова апробація наукових результатів, отриманих докторантом СНАУ Гапоною Оксаною Петрівною. Розроблена методика та технологія підвищення якості поверхневих шарів деталей із сталі 20 і сталі 40, з яких виготовлена більшість відцентрових насосів, компресорів та іншого технологічного обладнання, що використовується на КП «Міськводоканал» Сумської міської ради, і яке працює в важких умовах і з постійним навантаженням.

Традиційно ці деталі (пальці, вісі, вали, диски, ротори, вкладиші підшипників, копіри, упори, черв'яки, черв'ячні пари, шестерні зубчаті колеса, втулки) після хіміко-термічної обробки (ХТО) набувають високої поверхневої твердості та міцності для подальшої експлуатації під тиском у температурному діапазоні від -40 до 450°C.

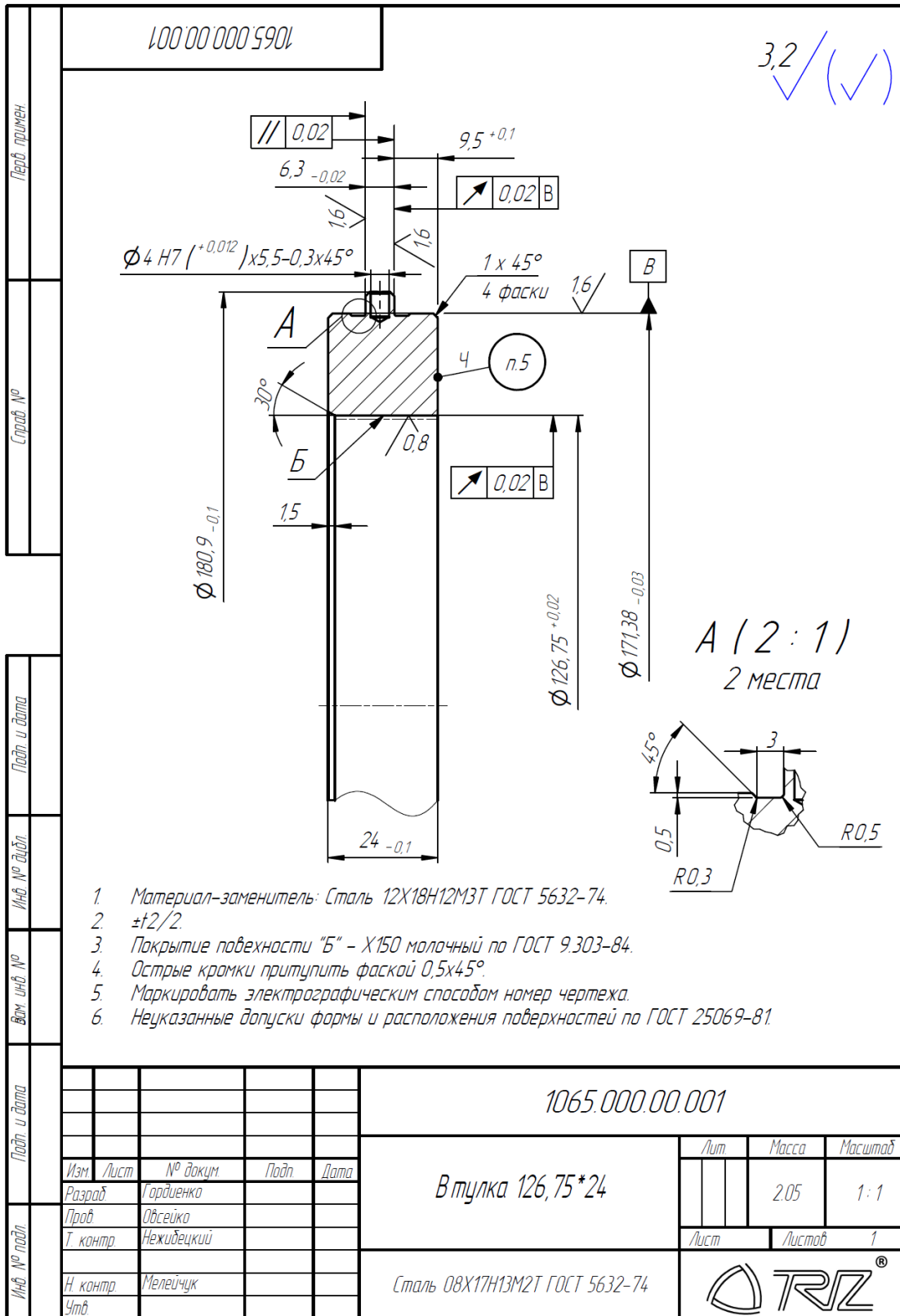
За допомогою розробленої Гапоною О.П. технології підвищення якості поверхневих шарів деталей, яка є альтернативою ХТО, можна виконувати методи: цементації, алітування, сульфидування, сульфоцементації та ін. (патенти на корисну модель: UA 119317, UA 115059, UA 119318, UA114075, RU 170 279, UA 136895, UA 131805; патенти на винахід: UA 117528, UA 117867, RU 2663799) з меншими витратами. Запропонована технологія, яка базується на методі електроіскрового легування, порівняно з ХТО, має ряд переваг: екологічно і техногенно безпечна; вимагає меншого часу проведення процесу, відсутність деформацій і жолоблень, малогабаритне й менш витратне технологічне устаткування, менші витрати на електроенергію й ін.

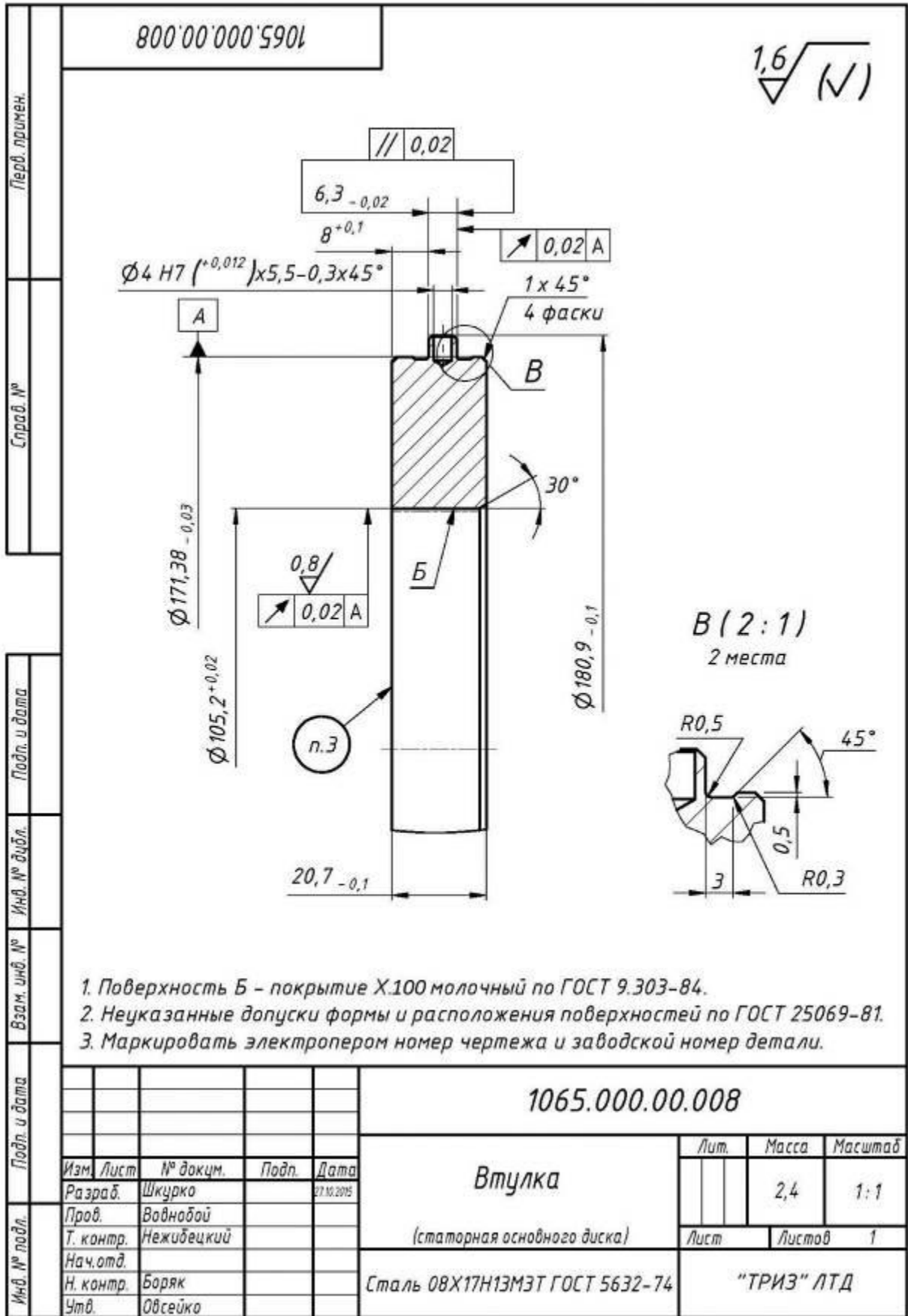
Результати Гапонової О.П. використовуються на КП «Міськводоканал» Сумської міської ради.

Очікуваний річний економічний ефект від використання, впровадженої технології підвищення якості поверхневих шарів деталей становить 139000 грн (сто тридцять дев'ять тисяч гривень).

Вказаний економічний ефект наведений з метою економічного обґрунтування отриманих наукових результатів, та не є підставою для виплати матеріального заохочення.

ДОДАТОК И





1. Поверхность Б - покрытие Х.100 молочный по ГОСТ 9.303-84.
2. Неуказанные допуски формы и расположения поверхностей по ГОСТ 25069-81.
3. Маркировать электропером номер чертежа и заводской номер детали.

					1065.000.00.008		
					Втулка		
					(статорная основного диска)		
					Сталь 08Х17Н13МЭТ ГОСТ 5632-74		
					"ТРИЗ" ЛТД		

Лит.	Масса	Масштаб
	2,4	1:1
Лист	Листов	1

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Шкурко		27.10.2015
Пров.		Воднойой		
Т. контр.		Нежибецкий		
Нач. отд.				
Н. контр.		Боряк		
Утв.		Обсейко		



ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ «ТРІЗ ЛТД»

к.т.н. Марцинковський В.С.

«10» травня 2020р.

АКТ

про дослідно-виробничу апробацію результатів дисертаційної роботи Гапонової Оксани Петрівни

Ми, що нижче підписалися, представник ТОВ «ТРІЗ» в особі провідного інженера Піддубного А.І. та представника Сумського національного аграрного університету Гапонової О.П. склали цей акт в тому, що у виробничих умовах підприємства ТОВ «ТРІЗ» було відпрацьовано технологічний процес зміцнення робочих поверхонь статорних втулок насоса 301-Д, що виготовлені зі сталі 08X17H13M2T.

Проведені дослідження структурно-фазового стану та властивостей деталей, робочі поверхні яких оброблені згідно пропонованої технології: електроіскровим легуванням (ЕІЛ) із застосуванням спеціального технологічного середовища (СТС). Внутрішню поверхню статорної втулки обробляли наступним чином. На оброблювану поверхню наносили СТС (вазелін, алюмінієва пудра 56% за масою, порошок аморфного бору близько 5% за масою). Не чекаючи висихання СТС, здійснювали ЕІЛ поверхонь графітовим електродом-інструментом. Режим легування (енергія розряду) обрано на основі розробленої математичної моделі прогнозування якості поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ.

Дослідження показали, що товщина зміцненого шару складає 60-70 мкм, твердість 1200 HV. Порівняльні випробування на зносостійкість показали, що покриття, отримані за пропонованою технологією зміцнення не поступаються за властивостями покриттям, отриманим хіміко-термічною обробкою (карбонітрацією).

Розроблена докторантом кафедри технічного сервісу СНАУ Гапоною О.П. технологія зміцнення робочих поверхонь статорних втулок насоса захищена патентом України на корисну модель, є екологічно безпечною, економічною, не потребує значного часу обробки і захисту необроблюваних поверхонь.

Таким чином, розроблена технологія оброблення статорних втулок насосів методом ЕІЛ із застосуванням СТС, рекомендована до використання в умовах ТОВ «ТРІЗ ЛТД».

Очікуваний економічний ефект від впровадження нової технології оброблення поверхонь складає 115 тис (сто п'ятнадцять тисяч).

Представник ТОВ «ТРІЗ»

 Піддубний А.І.

Представник СНАУ

 Гапонова О.П.

ДОДАТОК К

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Гапонової Оксани Петрівни в ПАТ "Сумське НВО"

Дійсним підтверджуємо, що нами прийнята до впровадження в виробництво, розроблена докторантом Сумського національного аграрного університету (СНАУ) Гапоною Оксаною Петрівною, ефективна технологія підвищення довговічності втулок масляних ущільнень відцентрового компресору, які широко застосовуються на ПАТ "Сумське НВО" і працюють при високих швидкостях, тисках, температурах, а також в умовах абразивного, корозійного й іншого видів впливу робочих середовищ.

Дві третини всіх відмов компресорів відбуваються внаслідок порушення працездатності ущільнень. Тому одним з найбільш відповідальних вузлів, що забезпечують герметичність компресорного агрегату, його надійну, безпечну і безвідмовну роботу, є вузол ущільнення.

Створення надійних ущільнювальних вузлів, що забезпечують герметичність протягом тривалого часу в широкому діапазоні зміни температур і тисків, є однією з основних проблем, що виникають при проектуванні компресорних машин і агрегатів.

Робота масляного ущільнення заснована на різниці тиску затворної рідини і робочого середовища, що дозволяє повністю виключити потрапляння агресивних газів в навколишнє середовище. Величина перепаду тиску підтримується в межах 0,035-0,05 МПа (в особливих випадках 0,08-0,25 МПа). Для протидії робочому середовищу, тиск якого на виході компресорного агрегату становить 35-40 МПа, в камеру подається масло, під тиском на 0,035-0,05 МПа вище напору робочого газу (рис. 1). Під дією тиску внутрішнього масла газове кільце 1 притискається до корпусу ущільнення 2; зовнішнє плаваюче кільце 3 входить в контакт з кришкою ущільнення 4, утворюючи герметичну замикаючу камеру. Для запобігання попадання робочого середовища між захисною втулкою (ЗВ) 5 і валом 6 передбачено гумове кільцеве ущільнення.

Сукупність факторів, таких як малі зазори, між внутрішнім кільцем 1 і захисною втулкою 5, високий тиск ущільнюючого середовища, високі частоти обертання валу 6, обумовлюють нагрівання плаваючих кілець ущільнювачів. Тому мінімальний зазор між плаваючими кільцями і ЗВ встановлюється таким, щоб забезпечити витрати рідини, необхідної для їх охолодження.

Збільшення розрахункового зазору, пов'язаного зі зносом робочої поверхні ЗВ 5, призводить до збільшеної витрати ущільнювальної рідини, що призводить до невиправданих втрат потужності.

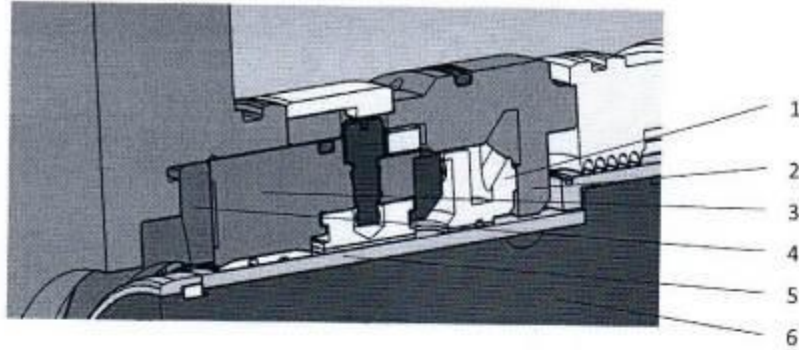


Рис. 1. Плаваюче ущільнення відцентрового компресора

При підвищених вібраціях на перехідних режимах і режимах відмінних від номінальних виникають високі навантаження на антифрикційні поверхні плаваючих кілець ущільнювачів та зовнішню поверхню ЗВ.

Таким чином, поверхня ЗВ повинна бути виконана з твердого зносостійкого матеріалу, а її основа – володіти достатньою пластичністю для забезпечення можливості напресовки на вал.

Такі вимоги обумовлюють необхідність застосування композиційних матеріалів типу «основа-покриття», що поєднують в собі захисні властивості покриттів з механічною міцністю основи.

Традиційно в плаваючих ущільненнях компресорів в якості матеріалу основи ЗВ застосовується МОНЕЛЬ (сплав на основі нікелю, що містить в якості основного легуючого елемента 27-37% міді). Цей сплав має гарну корозійну стійкість, досить високу межу міцності і хорошу пластичність в гарячому і холодному станах. Для збільшення ресурсу роботи ЗВ на робочу поверхню плазмовим напиленням або вакуумної наплавленням наноситься зносостійкий матеріал на основі нікелю – хастелой.

Аналіз технології виготовлення ЗВ показав, що це дуже трудомісткий процес, який характеризується: значними витратами на матеріали; багаторівневим контролем як матеріалу основи, так і матеріалу покриття; складною технологією нанесення покриття; низьким коефіцієнтом використання матеріалу (0,1-0,3); великим відсотком браку (близько 20%); необхідністю застосування спеціалізованої технологічної лінії. Все це викликає гостру необхідність в створенні нової, більш економічної, технології їх виготовлення.

Гапоновою О.П. запропоновано ЗВ виготовляти зі сталі аустенітного класу 12Х18Н10Т зі зміцненням робочих поверхонь карбонітруванням методом електроіскрового легування (ЕІЛ) із використанням спеціального технологічного середовища (СТС). Зовнішню поверхню втулки обробляють наступним чином. На оброблювану поверхню наносять СТС (45% сечовини + 45% жовтої кров'яної солі + 10% вазеліну). Не чекаючи висихання СТС, здійснюють ЕІЛ оброблених поверхонь графітовим електродом-інструментом. Режим легування (енергія розряду) обрано на основі розробленої математичної моделі прогнозування якості поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ.

Дослідження показали, що товщина зміцненого шару ЗВ складає $h=100$ мкм, 1050 HV. Порівняльні випробування на зносостійкість показали, що зміцнений поверхневий шар, сформований за пропонованою технологією не поступається за властивостями покриттям, отриманим традиційним способом, описаним вище. Крім того, розроблена технологія є екологічно безпечною, економічною, не потребує значного часу оброблення і захисту необроблених поверхонь.

Розроблена Гапоною О.П. технологія виготовлення ЗВ зі сталі 12X18H10T, зі зміцненням робочих поверхонь карбонітруванням методом ЕІЛ із використанням СТС, захищена патентом України на корисну модель і рекомендована до використання в умовах ПАТ "Сумське НВО".

Очікуваний економічний ефект від впровадження нової технології оброблення поверхонь складає 195 тис (сто дев'яносто п'ять тисяч) грн. Акт впровадження не є підставою для взаємних фінансових розрахунків.

Зам. Головного інженера
ПАТ "Сумське НВО"

Пирогов В.О.

« 12 » грудня 20 19 р.



ДОДАТОК Л



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор технічний

ПАТ «Сумхімпром»

В. Каршов

2020 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
докторанта СНАУ Гапонової Оксани Петрівни
на ПАТ «Сумхімпром»

Дійсним підтверджуємо, що нами прийняті до впровадження в виробництві, розроблені докторантом Сумського національного аграрного університету (СНАУ) Гапоною Оксаною Петрівною, ефективні технологічні процеси підвищення довговічності відповідальних деталей вузлів тертя – компресорів, насосів та іншого динамічного обладнання (ДО), які широко застосовуються на ПАТ «Сумхімпром» та працюють при високих швидкостях, тисках, температурах, а також в умовах абразивного, корозійного й іншого видів впливу робочих середовищ.

Запропоновані технології включають нові екологічно чисті, енергоєфективні методи (алітування, цементация, нітроцементация, силіціювання та ін.), створені на базі методу електроіскрового легування (ЕІЛ).

ЕІЛ є одним з найбільш ефективних методів нанесення захисних покриттів на металеві поверхні. Основними перевагами методу є: висока міцність зчеплення нанесеного матеріалу з основою; можливість проведення процесу в локальному місці; підвищення твердості, корозійної стійкості, зносо- та жаростійкості поверхонь, що труться, та ін.

Формування поверхневих шарів деталей вище зазначеними методами та їх комбінаціями дозволить підвищити зносостійкість та працездатність вузлів тертя більш економічними методами.

Аналіз практичних результатів впроваджених технологій показав, що за допомогою них можна здійснити комплексну модернізацію компресорного встаткування, що дозволяє значно підвищити надійність і економічність ДО й домогтися істотного скорочення енергоспоживання при стислих строках окупності.

Застосовувані технології дозволяють:

- у 1,5 рази збільшити міжремонтний пробіг ДО;
- на 5-15% скоротити споживання паливного газу;
- істотно знизити витрати на ремонт і обслуговування.

Застосовувані технології захищені патентами й багаторазово перевірені в експлуатації в складі компресорів, що працюють безпечно й без резерву у виробництвах аміаку, карбаміду, нафтопереробки. Комплексне застосування запропонованих технологій дозволять вивести ефективність ДО на найвищий рівень.

Очікуваний річний економічний ефект від використання впроваджених технологій підвищення якості поверхневих шарів деталей становить 195 000 грн (сто дев'яносто п'ять тисяч гривень). Економічний ефект поданий з метою економічного обґрунтування отриманих наукових результатів, та не є підставою для виплати матеріального заохочення.

Головний механік ПАТ «Сумхімпром»

А. Г. Ковнер

ДОДАТОК М



Директор ТОВ «ТРІЗ» ЛТД

В. С. Марцинковський

« 13 » _____ 2019 р.

Результати впровадження закінченої розробки

Згідно договору № 55 – 03 від 01.10.2018 р. «Розробка технології формування припрацювальних покриттів бронзових підшипників ковзання» представниками кафедри технічного сервісу проводились науково-технічні дослідження направлені на підвищення якості поверхонь вкладишів бронзових підшипників ковзання (ПК), які використовують для виготовлення підшипників турбін, електродвигунів, відцентрових насосів, компресорів, що працюють в важких умовах із постійним навантаженням.

Аналіз роботи бронзових ПК показав, що їхня пошкоджуваність проявляється у вигляді утрудненої припрацьовуваності, підвищеного зношування й великої ймовірності утворення задиру, що викликає необхідність формування на вкладишах підшипників (ВП) спеціальних покриттів, що поліпшують умови припрацювання.

При проведенні робіт, спрямованих на запобігання схоплювання контактуючих поверхонь ВП і цапфи при терті ковзання, був розроблений екологічно безпечний спосіб сульфидування (патент на корисну модель UA 119318, патенти на винахід UA 117867, RU 2 663799), здійснюваний методом електроіскрового легування, що є частиною дисертаційної роботи к.т.н., доцента Гапонової О.П. Розроблений метод, альтернативний методу хіміко-термічної обробки, і порівняно з ним має ряд переваг: відсутність деформацій і жолоблень, малогабаритне та менш витратне технологічне встаткування, у рази менші тривалість процесу й витрати на електроенергію й ін.

Очікуваний економічний ефект від нової технології виготовлення бронзових ПК становить 117000 грн.

ДОДАТОК Н

НАУКОВО-ВПРОВАДНИЦЬКЕ ПІДПРИЄМСТВО
СУМИПЛАСТПОЛІМЕР у формі ТОВ
 Юридична адреса: Україна 40020, м. Суми, пр-т Курський, 26
 Ідентифікаційний код 39242958
 Поточний рахунок 26002055016724
 ПАТ КБ ПриватБанк МФО 337546
 Тел. 0503008966

28.12.2020 № 104
 на № _____

А К Т

впровадження результатів дисертаційної роботи
Гапонової Оксани Петрівни,
що виносяться нею на захист дисертації
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Актуальним питанням науки та промисловості є розробка та використання енергозберігаючих та екологічно чистих методів поверхневої обробки матеріалів, які дозволяють отримувати високі характеристики зміцнення, що впливає на підвищення ресурсу виробів та інструменту. Таким методом є електроіскрове легування (ЕІЛ).

За допомогою ЕІЛ із застосуванням спеціального технологічного середовища (СТС) проводилася обробка робочих поверхонь штампового інструменту, а саме прес-форм зі сталі У10А (покриття систем Al-S-C, Mo-S, Al-C-B) для формування виробів з полімерних композиційних матеріалів на основі політетрафторетилену. Порівняльні дослідження обробленого за пропонованою технологією і без оброблення інструменту показали, що отримані покриття забезпечують збільшення ресурсу роботи інструменту у 1,5-2 рази.

Таким чином, пропонована технологія ЕІЛ із застосуванням СТС є ефективним методом зміцнення штампового інструменту, який суттєво збільшує ресурс роботи інструменту та дозволяє скоротити витрати, що пов'язані з особливостями даного виробництва та підвищувати його продуктивність.

Очікуваний економічний ефект від впровадження нової технології оброблення поверхонь складає 50 000 (п'ятдесят тисяч). Акт впровадження не є підставою для взаємних фінансових розрахунків.

Директор



Дудник О. В.

ДОДАТОК П

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з наукової роботи
Сумського національного
аграрного університету

Юрій ДАНЬКО

2021 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Гапонової Оксани Петрівни
на тему: «Керування властивостями поверхонь сталених деталей
електроіскровим легуванням у спеціальних технологічних середовищах»
Спеціальність 05.02.01 «Матеріалознавство»

Комісія у складі: завідувача кафедри технічного сервісу, д.т.н., проф. Тарельника В. Б. (голова комісії), доцента кафедри технічного сервісу к.т.н. Коноплянченка С. В., доцента кафедри технічного сервісу к.т.н. Бондарева С. Г., склала цей акт про те, що результати науково-дослідної дисертаційної роботи Гапонової О.П. на тему: «Керування властивостями поверхонь сталених деталей електроіскровим легуванням у спеціальних технологічних середовищах» впроваджені в навчальний процес кафедри технічного сервісу Сумського національного аграрного університету і використовуються при викладанні дисциплін «Матеріалознавство та ТКМ», «Технологія машинобудування в галузі», «Механіка матеріалів та конструкцій», «Триботехнологія», а також при виконанні курсових та кваліфікаційних робіт.

Голова комісії

В'ячеслав ТАРЕЛЬНИК

Члени комісії:

Євген КОНОПЛЯНЧЕНКО

Сергій БОНДАРЕВ



АКТ

**впровадження результатів дисертаційної роботи
Гапонової Оксани Петрівни
«Керування властивостями поверхонь сталених деталей
електроіскровим легуванням у спеціальних технологічних середовищах»
у навчальний процес кафедри прикладного матеріалознавства і технології
конструкційних матеріалів
Сумського державного університету**

Комісія у складі:

Голова комісії: заступник завідувача кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів, к.т.н., доц. Дегула А.І.

Члени комісії: доцент кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів, к.т.н., доц. Марченко С.В.
доцент кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів, к.ф.-м.н., доц. Говорун Т.П.

Встановлено, що за результатами виконання дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – «Матеріалознавство», к.т.н., доц. Гапоною О.П. у навчальний процес впроваджено наступне:

- нова технологія отримання функціональних комплексно-легованих покриттів, заснована на методі електроіскрового легування (ЕІЛ) на сталевих поверхнях з використанням спеціального технологічного середовища (СТС);
- математичні моделі (рівняння прогнозування товщини, шорсткості, суцільності та мікротвердості поверхневого шару), що дозволяють за енергетичними параметрами ЕІЛ, визначати основні показники якості сформованого шару: товщину, шорсткість, суцільність і мікротвердість;
- наукові підходи до обґрунтування доцільності застосування азотування та нітроцементації, що застосовуються в практиці поверхневого зміцнення деталей хіміко-термічною обробкою, альтернативними, екологічно безпечними й енергоефективними методами ЕІЛ з використанням СТС;

– нова методологія вибору оптимальних умов обробки при ЕІЛ, а також алгоритм його реалізації, що враховує енергетичні режими процесу ЕІЛ, матеріали електродних матеріалів і склад СТС.

Результати дисертаційної роботи використано в навчальних дисциплінах з підготовки здобувачів вищої освіти за освітніми ступенями бакалавр, магістр та доктор філософії за спеціальністю «Матеріалознавство»: «Технологія виробництва та обробки матеріалів», «Функціональні сплави», «Дизайн нових матеріалів», «Сплави з особливими властивостями», «Наукові основи вибору матеріалу і прогресивних зміцнюючих технологій», «Сучасні тенденції в матеріалознавстві», а також при виконанні курсових та кваліфікаційних робіт.

Голова комісії:



Андрій ДЕГУЛА

Члени комісії:



Станіслав МАРЧЕНКО



Тетяна ГОВОРУН