

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний технічний університет  
сільського господарства імені Петра Василенка

**Волков Олег Олексійович**



УДК 620.3: 621.923.1

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ  
ДЕТАЛЕЙ ТА ІНСТРУМЕНТУ  
МЕТОДОМ ТЕРМОФРИКЦІЙНОГО ЗМІЩЕННЯ**

05.02.01 – матеріалознавство

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
**Погрібний Микола Андрійович**,  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут»,  
професор кафедри матеріалознавства.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук  
**Клочко Оксана Юрївна**  
Харківський національний технічний університет сіль-  
ського господарства імені Петра Василенка,  
доцент кафедри технології матеріалів;

кандидат технічних наук,  
**Олійник Олександр Купріянович**  
Державне підприємство «Завод імені В.О. Малишева»,  
концерн «Укроборонпром»,  
провідний інженер-технолог центральної заводської  
лабораторії.

Захист відбудеться « 06 » жовтня 2020 року о 10<sup>00</sup> годині на засі-  
данні спеціалізованої вченої ради Д 64.832.04 у Харківському національному  
технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адре-  
сою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національ-  
ного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за  
адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44

Автореферат розісланий « 05 » вересня 2020 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Є.І. Калінін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми** та її доцільність обумовлені необхідністю підвищення поверхневої міцності деталей з конструкційних та інструментальних сталей.

Розвиток сучасної промисловості неможливий без широкого використання технологій зміцнення виробів з різних матеріалів. При цьому велику зацікавленість мають підходи з використанням комплексних методів оброблення, які б дозволяли забезпечувати суттєве покращення властивостей матеріалу.

Термофрикційне оброблення (ТФО), яке є одним із ресурсозберігаючих методів саме відповідає таким вимогам. При цьому ефект зміцнення завдяки ТФО може суттєво перевищувати максимальний рівень зміцнення матеріалів, який можна отримувати за допомогою стандартних методів оброблення. Рівень властивостей та якості залежить від параметрів ТФО, хімічного складу матеріалів, їх вихідного стану та інших факторів. Однак це питання є недостатньо вивченим, тому актуальним є експериментальне та теоретичне обґрунтування технології зміцнення сталей різних класів з використанням методу термофрикційного зміцнення (ТФЗ). Важливим є оптимізація режимів ТФЗ, та виявлення факторів, які можуть мати домінуючу роль в процесі оброблення матеріалів. Саме тому робота, яка спрямована на підвищення експлуатаційної стійкості деталей та інструменту методом термофрикційного зміцнення може бути віднесена до важливих та актуальних. Такі дослідження дозволять отримати чітке уявлення про природу ефекту зміцнення при ТФО з використанням основних положень теорії структурних і фазових перетворень в матеріалах, та сформувати системний підхід до ТФЗ, як до ефективного методу, що дозволяє забезпечувати зміцнення різного типу виробів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана згідно Закону України № 2519-IV від 09.10.2010 р. «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки» за пріоритетним напрямком розвитку науки і техніки «Новітні та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі».

Робота виконана на кафедрі «Матеріалознавство» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Окремі дослідження за темою дисертаційної роботи виконані відповідно до тематики держбюджетної теми М2021 «Розробка наукових основ структурної інженерії вакуумно-плазмових багат шарових надтвердих захисних покриттів» (ДР № 0116 У 000853) у період з 01.01.2016 р. по 31.12.2018 р.; госпдоговірної роботи Договір №20616 «Дослідження кілець підшипників у частині визначення відсотка залишкового аустеніту рентгеноструктурним методом» у період з 15.08.2016 р. по 28.02.2019 р.

**Мета дослідження:** підвищення експлуатаційної стійкості деталей машин та інструменту із сталей шляхом розробки та використання технологічного комплексу термофрикційного зміцнення (ТФЗ) з можливістю одночасного формування необхідної якості поверхні, та визначення природи і закономірностей процесу зміцнення.

**Завдання дослідження:**

- розробити схеми ТФЗ для поверхонь плоского та циліндричного типу;
- визначити вплив ТФЗ на структури та властивості сталей з різним хіміч-

ним складом та у різному вихідному стані після попереднього термічного оброблення;

- дослідити теплові явища, що виникають в сталях під час ТФЗ, та провести оптимізацію режимів ТФЗ і вибрати параметри, які забезпечують максимальний ефект зміцнення;

- дослідити напружений стан, який виникає в сталях під дією ТФЗ, та оцінити його вплив на конструкційну міцність виробів;

- оцінити термічну стабільність сформованих при ТФЗ структур сталей при їх подальшому нагріванні;

- вивчити можливість зміцнення реальних деталей та інструмента на прикладі калібрувального керна, деревообробного ножа, деревообробного різця та розробити і впровадити промислову технологію ТФЗ.

**Об'єкт дослідження:** процес термофрикційного зміцнення (ТФЗ) деталей та виробів із сталей.

**Предмет дослідження:** підвищення експлуатаційної стійкості деталей та інструменту методом термофрикційного зміцнення.

**Методи досліджень.** При проведенні досліджень використані методи металографічного аналізу з використанням оптичної, електронної та растрової електронної мікроскопії, проведені дюрOMETричні дослідження. Для вивчення теплових явищ під час ТФЗ використано метод розрахунку температурних полів. При цьому окремі зразки у вигляді пластин гальванічно покривалися тонким шаром олова з метою визначення, за допомогою експериментально-розрахункового методу, глибини прогрівання при ТФЗ. Для вивчення фазового складу «білого поверхневого шару», який формується в сталях під дією ТФЗ використано метод рентгенівського фазового якісного аналізу. Оцінка залишкового напруженого стану поверхневого шару після ТФЗ проведена з використанням методу рентгеноструктурного аналізу. Якість поверхні на різних етапах оброблення досліджували за допомогою профілографа-профілометра «Taylor-Hobson». Для оцінки підвищення роботоздатності сталей після ТФЗ проведені промислові випробування на натурних зразках деревообробного та іншого інструмента. Дослідження здійснювали розрахунково-експериментальним шляхом.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в узагальненні та розвитку теорій зміцнення матеріалів з урахуванням та можливістю керування тепловими та деформаційними явищами при структуроутворенні матеріалів в момент ТФЗ, що дозволяє вирішити актуальну проблему поверхневого зміцнення конструкційних та інструментальних сталей.

*Вперше:*

- експериментально виявлено та підтверджено різними методами досліджень особливості структури та фазового складу «білого поверхневого шару» після ТФЗ;

- встановлено природу зміцнення при ТФЗ, яка полягає у формуванні в поверхні матеріалу нетипової структури – «дрібнозернистий деформований мартенсит» у поєднанні з  $\epsilon$ -карбідом, що формується в специфічних умовах одночасної дії термічного і деформаційного факторів;

- виконані розрахунки та побудовані температурні поля, які застосовували для аналізу та керування тепловими параметрами для керування структуроутворенням в сталях при ТФЗ;

– встановлено ефект додаткового зміцнення при перекритті «білих шарів» під час багатопрохідного ТФЗ за рахунок циклічного термодформаційного впливу в умовах підвищеної стартової твердості;

– науково обґрунтована можливість одночасного ефективного зміцнення та отримання необхідної якості поверхні виробів при ТФЗ сталей з різним вмістом вуглецю та різним ступенем легованості.

*Отримали подальший розвиток:*

– теорія аналізування теплових явищ по перерізу об'єктів при ТФЗ з побудовою температурних полів, що дозволяє прогнозувати перетворення на різних глибинах від поверхні під дією ТФО;

– теорія термодформаційного структуроутворення в умовах ТФЗ поверхні, використання якої, на відміну від існуючих, дозволяє оцінити домінуючий механізм при зміцненні поверхні деталей з різних матеріалів.

*Удосконалено:*

– спосіб, який дозволяє при багаторазовому переполіруванні з локальним дотравлюванням одночасно порівнювати та аналізувати усі шари перерізу зразків, незважаючи на різну їх здатність до травлення;

– метод ТФЗ поверхні, що на відміну від відомих додатково включає багатопрохідне оброблення з перекриттям сусідніх проходів, та дозволяє отримувати ефект вторинного термодформаційного зміцнення з більш високим комплексом механічних характеристик.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Основні результати досліджень можуть використовуватись для підвищення експлуатаційної стійкості деталей машин та інструмента шляхом їх ТФЗ, що дозволяє корегувати вибір більш дешевих марок сталей з покращенням їх властивостей при зміцненні. Розроблено удосконалений спосіб зміцнення поверхні, а також інструмент та технологію одночасного зміцнення та шліфування поверхні, що захищено патентами України на винахід, (№ 90192, № 90191).

Основні практичні результати роботи пройшли випробування:

– на ДП «КРОНО-МЕХСИСТЕМ» технології зміцнення деревообробного інструменту: отримані результати зміцнення деревообробного інструменту та його випробувань в промислових умовах підтвердили підвищення його стійкості після ТФЗ до 200 %;

– на ТОВ «АПОСТОЛОВАГРОМАШ» технології зміцнення деталей машин: показана можливість використання термофрикційного оброблення, як ефективного методу поверхневого зміцнення матеріалів з одночасним формуванням в деталях необхідних геометричних розмірів. Ефективність зміцнення при цьому обумовлена, переважно, формуванням «білого поверхневого шару» з надвисокими показниками твердості;

Згідно акту випробування результатів досліджень на підприємстві ДП «КРОНО-МЕХСИСТЕМ» та акту впровадження на підприємстві ТОВ «АПОСТОЛОВАГРОМАШ» при зміцненні інструмента, який використовувався для подрібнення та оброблення деревини, було показано, що стійкість деревообробного інструменту зросла до 200 %. При цьому, з урахуванням додаткових витрат на зміцнення, витрати на інструмент зменшилися на 6 грн. на 1 м<sup>2</sup> поверхні, що оброблюється. На основі таких випробувань очікуваний економічний ефект, станом на 2020 р., при зміцненні та використанні 100 000 шт. деревообробних ножів

та різців може дорівнювати 480 000 грн.

Розробки, виконані в дисертаційній роботі використовуються і в навчальному процесі: при викладанні лекційних курсів з дисциплін для студентів бакалаврів та магістрів зі спеціальності 132 «Матеріалознавство»: «Основи наукових досліджень нових функціональних матеріалів», «Основи наукових досліджень», «Зносостійкі та антифрикційні матеріали».

**Особистий внесок здобувача.** Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що винесені на захист, отримані автором самостійно та викладені у роботах [1–27]. У наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, здобувачу належать: експериментальне дослідження мікроструктури та властивостей сталей різних марок після ТФО за різними схемами зміцнення [1, 4]; експериментальні дослідження впливу режимів ТФО, а також попереднього стану сталей на ефективність їх зміцнення та вибір оптимального режиму ТФО [5, 15, 16]; експериментальні дослідження впливу хімічного складу сталей на ефективність зміцнення при ТФО [8, 14, 23]; експериментальні дослідження фазових та структурних перетворень в поверхневих шарах сталей при зміцненні за допомогою однопрохідного та багатопохідного ТФО [9, 11]; дослідження впливу теплових явищ при поверхневому зміцненні сталі при ТФО [2, 12, 20, 22]; дослідження стабільності структур, отриманих за допомогою ТФЗ, при їх подальшому нагріванні [20, 22]; встановлення зв'язку між структурними та фазовими перетвореннями, напруженим станом, нагріванням, які виникають під час поверхневого зміцнення сталей при ТФО та обумовлюють ефективність зміцнення поверхонь [9]; ТФЗ деревообробного та іншого інструмента та його промислові випробування для оцінки ефективності зміцнення [3, 7, 17, 21]; розробка технології та дослідження ефективності фінішного чистового оброблення після зміцнення ТФО. Дослідження якості поверхні після зміцнення ТФО та фінішного чистового оброблення [10, 27]; розробка інструмента та технології одночасного зміцнення та шліфування поверхні [25].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивні відгуки на міжнародних науково-практичних та науково-технічних конференціях : «Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве» (м. Харків, ДП ХМЗ «ФЕД», 27-28 травня 2003 р.), «Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» MicroCAD Секція 6. Новые материалы и технологии в процессах горячей обработки металлов (м. Харків, НТУ «ХПИ», 4-6 червня 2008 р., 5-17 травня 2012 р., 29-31 травня 2013 р., 15-17 травня 2019 р.), 7-th International Conference «Research and Development in Mechanical Industry» RaDMI (Belgrade (Serbia), 16-20 Sept. 2007).

В повному обсязі дисертаційна робота обговорювалась та схвалена на розширених засіданнях кафедри матеріалознавства Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 27 наукових працях, у тому числі: 14 статей у спеціалізованих наукових виданнях України і 1 стаття у міжнародних виданнях (у виданні, що включено до міжнародної наукометричної бази Scopus – [13]); 10 тез у збірниках доповідей наукових конференцій. Отримано 2 патенти України на винаходи.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, 6 розділів, висновків, списку вико-ристаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 209 сторінок, у тому числі 12 додатків на 19 сторінках, обсяг основного тексту дисертації становить 190 сторінок, містить 88 рисунків, 16 таблиць. Список використаних джерел нараховує 139 найменувань на 17 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

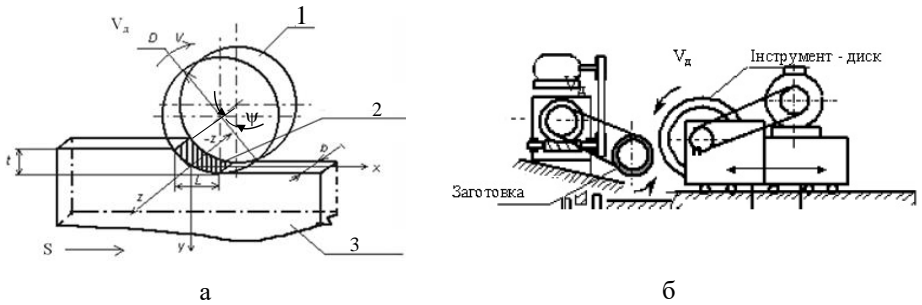
**У вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, дана загальна характеристика поверхневого зміцнення матеріалів термофрикційними методами оброблення, сформульовані мета і завдання дослідження, визначені об'єкт і предмет дослідження, наведені основні наукові результати, що отримані автором, викладені основні положення наукової новизни і практичної цінності, апробація результатів дисертації.

**У першому розділі** «Стан питання та перспективи і завдання поверхневого зміцнення для умов тертя та зношування» проведено огляд літературних джерел, присвячених проблемі поверхневого зміцнення за допомогою різних термодеформаційних методів. Показано, що досягнення зміцнення при таких методах оброблення обумовлено саме формуванням поверхневого «білого шару». Однак, відзначено, що природа і особливості формування та ідентифікація його структури, фаз, визначення впливу хімічного складу сталей на ефективність зміцнення при ТФО, визначення підвищення роботоздатності виробів в умовах експлуатації (експлуатаційної стійкості виробів) не визначені повною мірою. Це не дає можливості прогнозування та управління характеристиками «білого шару». Також залишаються актуальними питання, щодо механічного оброблення та якості поверхонь зміцнення. Зазначено, що успішне вирішення проблеми полягає у детальному комплексному дослідженні особливостей формування структури та властивостей сталей при зміцненні ТФО з визначенням фаз «білого шару», та розкриттям особливостей його формування залежно від хімічного складу матеріалу. На цій підставі сформульовано мету та завдання дослідження.

**У другому розділі** «Методика досліджень» наведено відомості про матеріали, що були використані в роботі, та методологію досліджень, яка включає використання комплексу експериментів з досліджень впливу ТФО, яка зміцнює (ТФЗ) на особливості формування структури та властивостей сталей.

Експерименти щодо ТФЗ проводилися на плоских та циліндричних зразках та деталях із сталей марок: сталь 20, 45, 50, У7, У12, У8А, 65Г, Х12М, 15Х11МФ у двох попередніх станах: після відпалювання, та після гартування і відпускання. Такий вибір сталей пояснюється необхідністю охопити основний діапазон щодо вмісту вуглецю – від 0,2 до 1,5 % С та такі матеріали широко використовується в промисловості. ТФЗ проводили за двома принциповими схемами: для зміцнення плоских та циліндричних поверхонь відповідно, (рис. 1) на адаптованому для цього плоско- та круглошліфувальному обладнанні.

Головними параметрами є швидкість подачі  $S$ , мм/с, яка змінювалась від 30 до 100 мм/с та глибина оброблення  $t$ , яка змінювалась від 0,2 до 0,7 мм, а також частота обертання деталі (для циліндричного зразка)  $n$ , об/с у сукупності з використанням зміцнювального диска постійного діаметру та товщини, що спеціально розраховані для ефективного використання стандартних плоско- та круглошліфувального верстатів при ТФЗ без будь якої їх переробки.



а – плоска поверхня; б – циліндрична поверхня  
Рисунок 1 – Схеми ТФЗ плоских та циліндричних поверхонь

Вивчення структур проводили з використанням методів металографічної оптичної, електронної та растрової електронної мікроскопії. Контроль якості зміцнення визначали вимірюванням мікротвердості поверхневих шарів та її змінами по перерізу зразків після ТФЗ за спеціальною методикою з використанням мікротвердоміра «ПМТ-3». Фазовий склад поверхневого «білого шару» сталей при ТФЗ визначали з використанням рентгенівського фазового аналізу. Визначення температури розігрівання матеріалів в зоні ТФЗ та швидкості охолодження проводили з використанням методики розрахунку температурних полів. При аналізі розподілу температури по глибині від поверхні зразків із сталей з різним ступенем легування і вмістом вуглецю при ТФЗ вирішували завдання теплопровідності з використанням методу джерел. Для оптимізації режимів ТФЗ сталей та отримання необхідного співвідношення мікротвердості та глибини зміцнення, проводили математичне планування експерименту. Для цього обрана математична модель у вигляді неповного поліному другого ступеню

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_{12} \quad (1)$$

де  $b_0, b_1, b_2$  – коефіцієнти регресії;  $x_1, x_2$  – кодовані значення фактору (швидкості подачі  $S$  і глибини оброблення  $t$ ).

Для визначення напруженого стану після ТФЗ використовували метод рентгеноструктурного аналізу, який проводили пошарово від поверхні в глибину, що дозволило отримати інформацію про напружений стан в усіх важливих шарах перерізу зразка. Для покращення якості поверхні після ТФЗ розроблена методика фінішного чистового оброблення. Шорсткість поверхні після ТФЗ та ТФЗ з наступним чистовим обробленням досліджували за допомогою профілографа-профілометра «Taylor-Hobson», та після порівняння отриманих результатів оцінювали якість поверхні та, за необхідністю, корегували параметри оброблення.

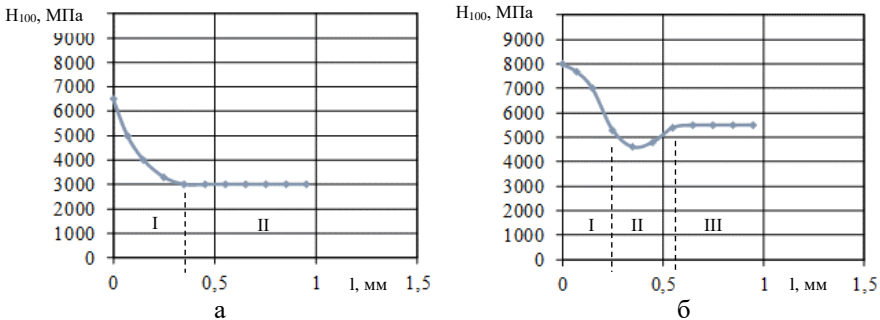
Запропоновано технологічний комплексний процес одночасного ТФЗ та чистового шліфувального оброблення спеціальним комбінованим диском. Дослідно-промислові випробування проводили на базі ДП «КРОНО-МЕХСИСТЕМ» на натурних зміцнених виробках.

**У третьому розділі** «Визначення структурних і фазових перетворень, викликаних ТФО, що зміцнює (ТФЗ), та їх вплив на властивості матеріалів» було проведено дослідження впливу різних режимів ТФЗ на структуру і властивості сталей у поверхневих шарах виробів. Розглянуто вплив вмісту вуглецю при ТФЗ



сталей та їх вихідного стану.

ДюрOMETричні та металOграфічні дослідження, що проводили по перерізу зразків із сталей з різним вмістом вуглецю та легувальних елементів на прикладі сталей 65Г та 15Х11МФ у протилежних вихідних станах дозволили виділити два типу розподілення мікротвердості від поверхні вглиб зразків. Так, зразки після ТФЗ у вихідному загартованому стані мають в приповерхневому шарі зони зміцнення та знеміцнення, а зразки у вихідному відпаленому стані – тільки зону зміцнення, яка плавно переходить в основний метал (рис. 2). Це пов'язано з тим, що відпалений стан забезпечує рівноважну структуру, переважно перлітного типу, залишкове нагрівання якої не завдає фазових змін, а вихідний загартований стан відповідає нерівноважній структурі мартенситного типу, залишкове нагрівання якої призводить до часткового розвитку процесів відпускання. Зразки більш складної – циліндричної форми із сталі 65Г досліджувалися після ТФЗ також в різних вихідних станах, розглянутих вище. ТФЗ проводили за відсутності змащування та зі змащуванням (рис. 3). Щодо зміцнення плоских поверхонь – максимальна мікротвердість зміцненого шару  $H_{100} \sim 18\ 200$  МПа та максимальна глибина зміцнення  $l \sim 650$  мкм досягнуті в комбінації ТФЗ без змащування після попереднього гартування і низькотемпературного відпускання в сталі 65Г. При зміцненні циліндричних поверхонь в подібних технологічних умовах рівень поверхневої твердості в сталі 65Г є ідентичним, однак слід зауважити, що глибина зміцнення дещо нижча порівняно із ТФЗ плоских поверхонь. Так, порівняно проста схема ТФЗ дає можливість досягти значного рівня зміцнення поверхні, а найбільш результативними, з точки зору досягнутого ефекту, є сталі 65Г та У8А.

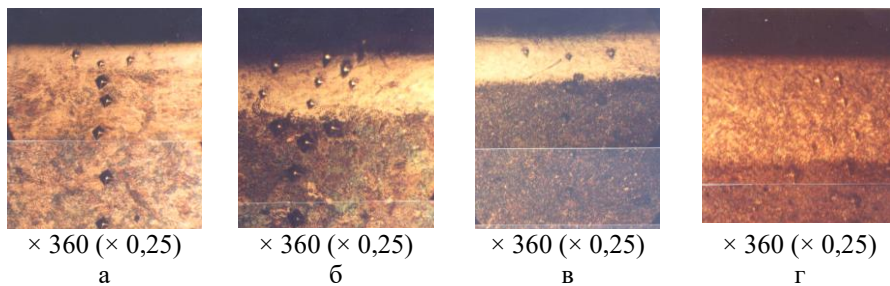


а – після попереднього відпалювання; б – після попереднього гартування;  
(I – зона зміцнення; II – зона знеміцнення, III – зона основного металу)

Рисунок 2 – Вплив попереднього стану на властивості сталі 15Х11МФ після ТФЗ за режимом  $S = 30$  мм/с;  $t = 0,7$  мм

В результаті вивчення фазового складу «білого шару» за допомогою рентгеноструктурного аналізу в сталях марок 65Г та У8А у стані після відпалювання визначено  $\alpha$ -Fe (ферит, як складова перліту). Після ТФЗ з'являється фаза  $\alpha$ -Fe (мартенсит) та має місце поява  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>C і незначної кількості  $\gamma$ -Fe (аустеніт) та оксидів, (табл. 1). Тобто, структура переважно складається з мартенситу, незначної кількості аустеніту, оксидів заліза, та  $\epsilon$ -карбіду ( $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>C) поява якого може бути одним з чинників забезпечення такої високої твердості «білого шару».

Аналіз мікроструктур зразків із сталі 65Г після багатопрохідного ТФЗ підтверджує, що поверхневий «білий шар» має більш дрібне зерно круглястої форми та рівень твердості, що суттєво вищий такого показника для стандартної структури мартенситу. Окрім того, при повторному обробленні по «білому шару» (на ділянці перекриття двох сусідніх проходів зміцнювального диска) має місце його додаткове зміцнення з подальшим зменшенням розміру зерна рис. 4.



а – ТФЗ зі змашуванням після попереднього відпалювання; б – ТФЗ без змашування після попереднього відпалювання; в – ТФЗ зі змашуванням після попереднього гартування і низькотемпературного відпускання; г – ТФЗ без змашування після попереднього гартування і низькотемпературного відпускання;

Рисунок 3 – Мікроструктура циліндричних зразків із сталі 65Г після ТФЗ у різних вихідних станах

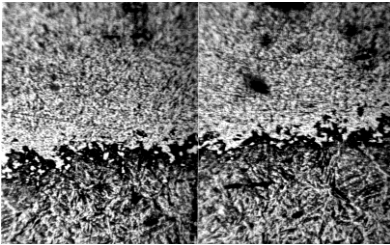
Таблиця 1 – Фазовий склад поверхневого шару сталей 65Г та У8А, отриманий під дією ТФЗ

Режим оброблення зразків із сталі 65Г	$\theta_{\lambda, Cr}$ , кут відбиття, °	Фази	Режим оброблення зразків із сталі У8А	$\theta_{\lambda, Cr}$ , кут відбиття, °	Фази
Сталь 65Г після гартування, низькотемпературного відпускання та ТФЗ	29,2	$\gamma\text{-Fe}_\beta$ , $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{C}$	Сталь У8А після гартування, низькотемпературного відпускання та ТФЗ	23	$\text{Fe}_3\text{O}_4$
	30,5	$\alpha\text{-Fe}_\beta$		24,5	$\text{FeO}$
	32	$\text{FeO}$ , $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{C}$		27	$\text{FeO}$ , $\text{Fe}_3\text{O}_4$
	33,6	$\gamma\text{-Fe}_\alpha$		29	$\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{C}$
	34	$\alpha\text{-Fe}_\alpha$		32	$\text{FeO}$ , $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{C}$
	39,5	$\gamma\text{-Fe}_\alpha$		39,5	$\gamma\text{-Fe}_\alpha$
	44	$\alpha\text{-Fe}_\beta$		42	$\text{Fe}_3\text{O}_4$
	48,5	$\text{FeO}$		48	$\text{FeO}$
	53	$\alpha\text{-Fe}_\alpha$		55	$\gamma\text{-Fe}_\beta$
63	$\alpha\text{-Fe}_\beta$	63	$\alpha\text{-Fe}_\beta$		

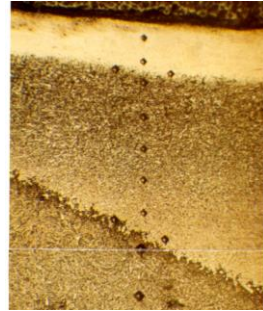
Більш детальне вивчення мікроструктури сталі 65Г після ТФЗ за допомогою електронної мікроскопії показало, що структури «білого шару» та основного металу суттєво відрізняються як за формою зерен так і за їх розмірами.

На рис. 5 показано саме місце переходу від основного металу до «білого

шару», який утворився під дією ТФЗ. Так, структура «білого шару» (рис. 5) складається із довгастих зерен, та включень правильної геометричної форми, які розташовані по поверхні зерен і зустрічаються тільки в цьому шарі. Ці зерна значно менші за голки мартенситу та є більш круглястими, з розмірами 1–2 мкм, внаслідок чого ми називаємо цю структуру «мартенсит зернистий» (рис. 5, а). А поява на поверхні цих зерен структурних одиниць правильної геометричної форми з розмірами, приблизно, 100–300 нм, які можуть бути ідентифіковані як  $\epsilon$ -карбід, може частково сприяти зміцненню. При переміщенні у бік основного металу має місце поява дрібних зерен, що об'єднані в так звані лінії з різним направленням. Така структура відповідає перехідній зоні знеміцнення. При досягненні зони основного металу має місце поява зерен витягнутої форми (рис. 5, б), що схожі на голки, які відповідають мартенситній структурі.



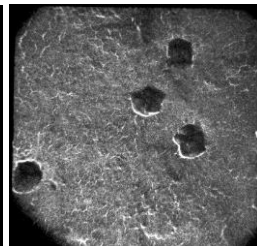
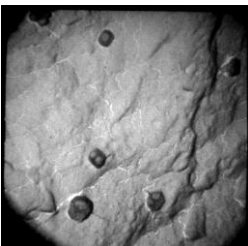
а



б

а – після первинного ТФЗ,  $\times 1000$ ; б – після повторного ТФЗ,  $\times 250$   
Рисунок 4 – Мікроструктура перерізу сталі 65Г після гартування та ТФЗ

При оцінюванні чистового оброблення після ТФЗ було підтверджено суттєве покращення якості поверхні. Основні показники шорсткості поверхні після ТФЗ були:  $R_a = 1,82$ ,  $R_q = 2,38$ ,  $R_z = 7$ , а після чистового оброблення – знизилися:  $R_a = 0,22$ ,  $R_q = 0,42$ ,  $R_z = 0,7$  (до рівня якості поверхні у вихідному стані).



а

б

а – «білий поверхневий шар» сталі; б – зона основного металу  
Рисунок 5 – Мікроструктура сталі 65Г,  $\times 20000$

У четвертому розділі «Дослідження теплових явищ при зміцненні поверхні деталей» розглядали та аналізували зв'язок між параметрами процесу ТФЗ та тепловими явищами в поверхні об'єктів, які оброблюються.

Для опису процесу використовували найбільш високолеговану з досліджуваних – сталь 15X11МФ. Температурне поле, яке виникає в зразку при ТФЗ, представлено у вигляді ізотерм у координатах  $y = f(x)$ , де  $x$  – вісь декартової системи координат, у протилежному напрямку якої рухається теплове джерело. В даному випадку це координата руху теплового джерела по поверхні, або відстань від переднього фронту джерела тепла (рис. 6). При цьому координата  $x$  є паралельною до напрямку подачі при ТФЗ (див. рис. 6),  $y$  – вісь координат, що показує глибину перерізу зразка, тобто відстань від поверхні контакту до протилежної нижньої поверхні зразка. Ця вісь демонструє на яку глибину та до якої температури прогрівається зразок при ТФЗ. Задача теплопровідності вирішувалася в системі координат, яка рухається разом з тепловим джерелом (з поверхнею контакту). В результаті розрахунків отримано рівняння:

$$T(x, y, z, t) = \int_0^L \int_0^\tau \frac{Q}{\lambda 2\pi(\tau-t)} \exp\left[-\frac{y^2 + [(x-x_u)^2 + V(\tau-t)^2 + (z-z_u)^2]}{4a(\tau-t)}\right] dt dx \quad (2)$$

де  $T(x, y, z, t)$  – температура будь-якої точки тіла з координатами  $x, y, z$  через  $t$  секунд після того, як в точці з координатами  $x_u, y_u, z_u$  має місце тепловий імпульс;  $Q$  – кількість теплоти, внесена точковим джерелом в нескінченний однорідний простір, кал;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу – сталі зразка, кал/(см·с·°C);  $a$  – коефіцієнт температуропровідності, см<sup>2</sup>/с.

Результат розв'язання рівняння (2) представлений графічно у вигляді кривої охолодження зразка після нагрівання при ТФЗ на конкретній глибині від поверхні (рис. 7). З використанням отриманої кривої охолодження, швидкість охолодження за відрізки часу, що взяті послідовно, тобто при малих значеннях температурних інтервалів, розраховували згідно формули (2) за допомогою диференціювання температури за часом:

$$V_{\text{охол}} = \frac{dT}{dt} = \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{\tau_{\text{max}} - \tau_{\text{min}}} \quad (\text{град/с}) \quad (3)$$



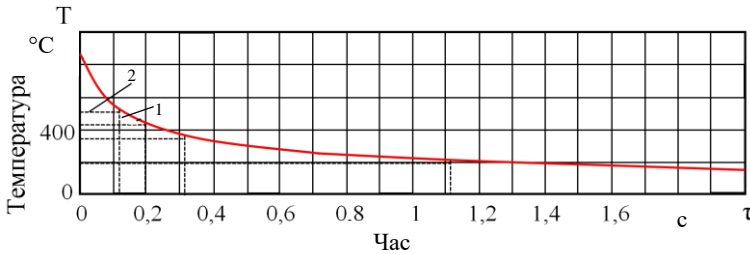
1,2,3...n – ізотерми поширення тепла на різну глибину в зразку  
Рисунок 6 – Схематичний вид зміни температурного поля в зразку зі сталі 15X11МФ при його ТФЗ

Так, наприклад, за період 1,1 с температура з 854 °С знизилася до 200 °С. Таким чином, швидкість охолодження складає  $(854-200)/1,1 = 594,55$  °С/с на глибині 0,035 см (рис. 7). Результати розрахунків представлені в табл. 2

Математичне планування експерименту з побудовою математичної моделі дозволило оцінити вплив параметрів ТФЗ на рівень мікротвердості та глибину зміцнення. Це видно з рівнянь (4), (5), які розглянуті в якості прикладу для зразка із сталі 15Х11МФ. В даному випадку, ТФЗ проводили згідно оптимального режиму (див. табл. 2) у вихідному стані після гартуванням з низькотемпературним відпусканням. Ці рівняння характеризують залежність характеристик зміцнення від параметрів ТФЗ.

$$y_1 = 255 + 45x_1 + 40x_2 - 40x_1x_2 \quad (4)$$

$$y_2 = 148 - 3x_1 + 83x_2 - 68x_1x_2 \quad (5)$$



1 – зміна температури  $dT$ ; 2 – зміна часу  $dt$

Рисунок 7 – Крива охолодження зразка після нагрівання при ТФЗ за режимом  $S = 100$  мм/с,  $t = 0,7$  мм на глибині від поверхні 0,35 мм зразка із сталі 15Х11МФ

Таблиця 2 – Зміни температури на плоскій поверхні зразків при ТФЗ та швидкості охолодження сталей, які досліджувалися: 15Х11МФ, 65Г, У8А, Х12М

Марка сталі	Режим ТФЗ		$A_{c1}$ , °С	Температура на поверхні зразків, °С	Реальна швидкість $V_{\text{охол}}$ металу зразків після ТФЗ, °С /с	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·град)	
	S, мм/с	t, мм				при 20 °С	при ТФЗ
15Х11МФ	30	0,7	810	1050	260	~ 21	28
65Г			721	560	680	37	30
У8А			730	650	690	52	30
Х12М			815	670	720	24	~ 20

Так, оцінка коефіцієнтів, які отримані в даних рівняннях показала, що на мікротвердість поверхневого зміцненого шару параметри ТФЗ: швидкість подачі S, яка позначена ( $x_1$ ) і глибина оброблення t, яка позначена ( $x_2$ ), впливають майже однаково, а на глибину зміцнення ( $y_2$ ) більш впливає глибина оброблення t. Відповідно, для збільшення мікротвердості зміцненого шару необхідно збільшувати і швидкість подачі S, і глибину оброблення t. Однак, для збільшення глиби-

ни зміцнення поверхневого шару необхідно також збільшувати глибину оброблення  $t$ , але зменшувати швидкість подачі  $S$ .

У п'ятому розділі «Оцінка напруженого стану, викликаного ТФЗ, та структурна стабільність зміцнених шарів при подальшому нагріванні» досліджували характер розподілу напружень та знак напружень по перерізу зразків з легованої сталі 15X11МФ після ТФЗ та визначали рівень мікродеформацій і розмір блоків, що отримані під дією ТФЗ в зразках. З рис. 8, 9 видно, що в поверхні зразка присутні стискаючі залишкові напруження.

Виявлено, що на поверхні зразка рівень мікродеформацій більший, а розмір блоків менший, ніж у його серцевині (рис. 10, 11).

На основі досліджень встановлено, що ТФЗ позитивно впливає на зміцнення поверхні зразка. Про це свідчить: знак отриманих стискаючих напружень, максимальний рівень напружень, мінімальний розмір блоків, максимальне значення рівня мікродеформацій у поверхневому шарі зразка.

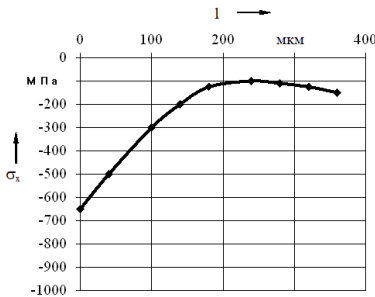


Рисунок 8 – Напруження  $\sigma_x$  у зразку із сталі 15X11МФ

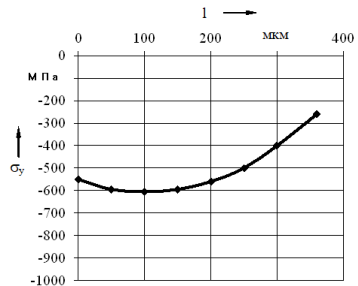


Рисунок 9 – Напруження  $\sigma_y$  у зразку із сталі 15X11МФ

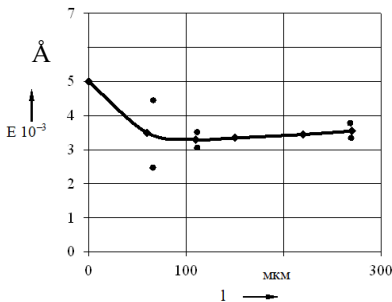


Рисунок 10 – Рівень мікродеформації у зразку із сталі 15X11МФ

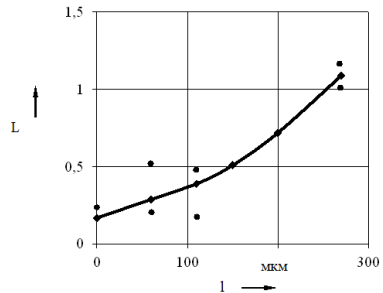


Рисунок 11 – Розмір блоків у зразку із сталі 15X11МФ

У шостому розділі «Промислове застосування ТФЗ та оцінка ефективності використання розробленої технології зміцнення» показано особливості використання в промислових умовах розробленої технології зміцнення інструменту двох різних типів (з циліндричною та плоскою поверхнею). Для промислового дослідження були обрані деталі зі сталей в яких традиційними методами зміц-

нення важко забезпечити досягнення необхідних експлуатаційних властивостей.

В якості об'єкта з циліндричною поверхнею був обраний прототип виробу «керна», виготовлений із сталі 65Г, який використовується для формування отворів в абразивних кругах, що працює в умовах інтенсивного тертя та зношування його поверхні (рис. 12).

Об'єктами з плоскою поверхнею для промислового використання були обрані деревообробний ніж зі сталі 65Г та деревообробний різець – У8А. Структурний стан цих об'єктів дослідження перед ТФЗ був після попереднього гартування та низькотемпературного відпускання. При дослідженні стану робочої поверхні керна після повного циклу роботи відмічено, що вона зазнає суттєвого зношення у зв'язку з інтенсивним абразивним впливом. Це достатньо швидко змінює геометрію інструмента та розміри, після чого його подальша експлуатація стає неможливою. При проведенні макроскопічного аналізу деревообробних різців та ножів, що не зазнавали ТФЗ та експлуатувалися в стандартних умовах, встановлено, що зношення різальної кромки відбувається, переважно, за рахунок викрашування з наступною втратою металу робочої зони (рис. 13, а, б). Це можна пояснити складними умовами експлуатації даного інструмента та його контактуванням зі сторонніми тілами (металеві уламки, каміння, що примерзло до дерев'яних стовбурів, шматки зв'язувального дроту). Такий інструмент має невисоку експлуатаційну стійкість.

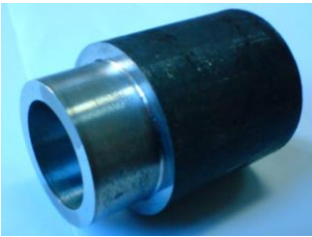
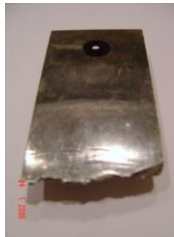


Рисунок 12 – Виріб із сталі 65Г типу «керна»



а



б

Рисунок 13 – Деревообробний різець зі сталі У8А після експлуатації протягом 3 годин (а) та деревообробний ніж із сталі 65Г після експлуатації протягом 8 годин (б)

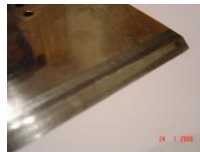


Рисунок 14 – Деревообробний різець із сталі У8А після ТФЗ та експлуатації протягом 3 годин

Рисунок 15 – Деревообробний ніж із сталі 65Г після ТФЗ та експлуатації протягом 8 годин



Керн і деревообробний інструмент після ТФЗ при експлуатації не зазнають суттєвого зносу. Спостерігаються лише деякі зони тертя робочої поверхні керна та затуплення з появою дрібних нерівностей різальної кромки деревообробного інструменту (рис. 14, 15). Вимірюваннями встановлено, що ресурс деревообробного інструмента підвищився втричі, а ресурс керна, до моменту його виведення з експлуатації по причині зношення, підвищився, приблизно, в 2 рази. На основі таких випробувань, з урахуванням об'єму використання інструмента, тільки по цьому підприємству річний економічний ефект досягає

$$E = K \times D \times B \quad (6)$$

де  $K$  – кількість виробів, що оброблюються впродовж року, шт.;  $D$  – середній розмір виробу,  $m^2$ ;  $B$  – економія витрат на  $m^2$ , грн.

$$E = 100\,000 \times 0,1 \times 6 = 60\,000 \text{ грн. (у цінах березня 2008 р.)}$$

Очікуваний економічний ефект, станом на 2020 р., при зміцненні та використанні 100 000 шт. деревообробних ножів та різців може досягти 480 000 грн.

Саме тому, ТФЗ рекомендовано для промислового використання та впровадження при зміцненні такого або подібного інструменту та деталей.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання з підвищення експлуатаційної стійкості деталей машин та інструменту із сталей шляхом розробки та використання технологічного комплексу ТФЗ з можливістю одночасного формування необхідної якості поверхні, та визначення природи і закономірностей процесу такого зміцнення. Результати досліджень дозволили сформулювати основні теоретичні та науково-практичні висновки:

1. Розроблені схеми і режими для ТФЗ деталей та інструменту з плоскою та циліндричною поверхнями, що передбачає використання стандартних плоско- та круглошліфувальних верстатів та зміцнювального диска, який встановлюється на штатне місце, та розроблений з урахуванням кінематичних можливостей такого обладнання. Використання такого інструмента не потребує додаткових витрат на модернізацію стандартного шліфувального обладнання. Доведено, що найбільш доцільно проводити ТФЗ сталей в умовах без змашування зони контакту між інструментом та об'єктом зміцнення, оскільки це забезпечує досягнення більшого ефекту зміцнення. Рекомендовано проводити ТФЗ попередньо загартованих сталей, оскільки стартовий, а потім і фінішний рівень їх твердості буде вищим ніж після ТФЗ попередньо відпалених сталей приблизно на 35 %.

2. Експериментально досліджений зв'язок між структуроутворенням та властивостями сталей при ТФЗ та їх вихідним станом, вмістом вуглецю, хімічним складом, умовами та режимами ТФЗ, що дозволяє обрати оптимальні комбінації даних факторів та отримати максимальний ефект зміцнення сталей. Експериментально досліджено і доведено формування в сталях у процесі ТФЗ поверхневого «білого шару», що має нетипову структуру, а саме «дрібнозернистий деформований мартенсит» у комбінації з частками  $\epsilon$ -карбїду. Це пояснює природу досягнення більш ефективного зміцнення при ТФЗ.

3. Встановлено, що температури нагрівання зразків з різним ступенем легування, на прикладі сталей марок 65Г, У8А, Х12М, при ТФЗ поверхні за оптимальним режимом нижчі за критичну точку  $A_{c1}$  і не перевищують температури



670 °С, а поверхня сталі 15Х11МФ розігрівається до температури, яка вища її, та дорівнює 1050 °С, що викликано різницею в теплопровідності. Відзначено, що нагрівання поверхні зразків при ТФЗ до температур нижчих за критичні не може призводити до появи структури аустеніту, а малий час протікання процесу не забезпечує розпад вихідної структури мартенситу, але створює умови для її деформування. При нагріванні сталей до температур вищих за критичні при ТФЗ, структура аустеніту, якщо остання встигає сформуватися, миттєво перетворюється в мартенситну за рахунок швидкого охолодження з критичною швидкістю. Одночасно з цим реалізується деформування поверхні, що оброблюється. При цьому, проведена оптимізація режимів з використанням математичного планування експерименту дозволила визначити найбільш оптимальний режим для вищезазначених умов ТФЗ, який передбачає використання швидкості подачі  $S = 30$  мм/с та глибини оброблення  $t = 0,7$  мм при постійному обґрунтовано обраному діаметрі зміцнювального диска.

4. Доведено, що під дією ТФЗ в поверхні сталей, які оброблюються, формуються стискаючі залишкові напруження, які досягають рівня 650 МПа та зафіксовано зменшення розміру блоків в поверхневих шарах. Це є позитивним з точки зору підвищення експлуатаційної стійкості об'єктів після ТФЗ.

5. Показана висока термічна стабільність структур сталей після ТФЗ при їх подальшому нагріванні. Сталі після ТФЗ при нагріванні в усьому діапазоні температур відпускань зберігають дрібне зерно та вищі показники твердості порівняно зі зразками, до яких ТФЗ не застосовувалось, тобто процеси розпаду структури «білого поверхневого зміцненого шару» в них проходять повільніше.

6. Проведено комплексне дослідження дії вищезазначених факторів, у результаті якого доведено, що зміцнення сталей при ТФЗ має, переважно, деформаційну природу з елементами дисперсійного зміцнення (при випадінні в мартенситній матриці  $\epsilon$ -карбідів) в умовах короткочасного нагрівання при ТФЗ. Розмір таких карбідів не перевищує 300 нм.

7. Експериментально доведено ефективність технології фінішного чистового оброблення після ТФЗ зі збереженням отриманого рівня зміцнення сталей, що дозволяє рекомендувати технологічний комплекс розробок у вигляді ТФЗ з наступним чистовим обробленням для використання на виробництві.

8. Досліджено можливості використання ТФЗ для деталей та інструментів з плоскою та циліндричною поверхнями на прикладі реальних виробів: керн, деревообробний ніж, деревообробний різець. У всіх випадках отримано стійкий ефект зміцнення та доведена ефективність ТФЗ при випробуваннях на виробництві, які довели підвищення їх стійкості в 2–3 рази. Згідно промислових випробувань очікуваний економічний ефект, станом на 2020 р., при зміцненні та використанні 100 000 шт. деревообробного інструменту може досягти 480 000 грн.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Сизый Ю.А., Погребной Н.А., Волков О.А. Упрочение поверхности из стали 15Х11МФ при помощи термофрикционной обработки. *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства «Підвищен-*

ня надійності відновлюємих деталей машин. *Фізичні та комп'ютерні технології*». Харків, 2002. Вип. 10. С. 44–48.

2. Сизый Ю.А., Погребной Н.А., Волков О.А. Температурное поле на входе и выходе с поверхности упрочняемой трением. *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства «Підвищення надійності відновлюємих деталей машин»*. Харків, 2003. Вип. 18. С. 84–93.

3. Сизый Ю.А., Погребной Н.А., Гуцаленко Ю.Г., Волков О.А. Упрочнение деревообрабатывающих ножей из стали 65Г методом термофрикционной обработки. *Резание и инструмент в технологических системах* : междунар. науч.-техн. сб. / НТУ «ХПИ». Вип. 67. Харьков : НТУ «ХПИ», 2004. С. 37–41.

4. Сизый Ю.А., Погребной Н.А., Гуцаленко Ю.Г., Волков О.А. Упрочнение методом термофрикционной обработки материалов. *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства «Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні»*. Харків, 2004. Вип. 26. С. 150–156.

5. Сизый Ю.А., Погребной Н.А., Волков О.А. Упрочнение цилиндрических деталей из стали 65Г методом ТФО. *Високі технології в машинобудуванні* : Зб. наук. праць НТУ «ХПІ». Вип. 1(10). Харків : НТУ «ХПІ», 2005. С. 142–146.

6. Волков О.А. Исследование влияния ТФО на напряженное состояние в стали 15Х11МФ. *Вестник национального технического университета «ХПИ»* : сб. науч. тр. : темат. вып. / Харьковский политехнический ин-т, нац. техн. ун-т. Вип. 12 : Технологии в машиностроении / Харьков : НТУ «ХПИ», 2005. С. 84–88.

7. Сизый Ю.А., Погребной М.А., Волков О.О. Дослідження зносостійкості деревообробного інструмента зміцненого методом ТФО в промислових умовах. *Вестник национального технического университета «ХПИ»* : сб. науч. тр. : темат. вып. / «Харьковский политехнический ин-т», нац. техн. ун-т. Вип. 27 : Новые решения в современных технологиях / Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. С. 93–95.

8. Погребной М.А., Волков О.О., Сизый Ю.А., Гуцаленко Ю.Г., Кулик Г.Г. Дослідження фазового складу сталей 65Г та У8А після зміцнення шляхом термофрикційної обробки. *Високі технології в машинобудуванні* : зб. наук. пр. НТУ «ХПІ». Вип. 2 (13) / Харківський політехнічний ін-т, нац. техн. ун-т. Харків : НТУ «ХПІ», 2006. С. 95–98.

9. Погребной Н.А., Волков О.О., Савицкий Б.А., Гуцаленко Ю.Г., Кулик Г.Г. Исследование влияния многопроходной термофрикционной обработки на формирование белого слоя в стали 65Г. *Резание и инструмент в технологических системах* : междунар. науч.-техн. сб. / НТУ «ХПИ». Вип. 71. Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. С. 107–111.

10. Погребной М.А., Волков О.О., Гуцаленко Ю.Г., Березуцька О.В. Дослідження впливу термофрикційної та наступної чистової обробки на структуру сталі 65Г. *Високі технології в машинобудуванні* : Зб. наук. пр. НТУ «ХПІ». Харків, 2007. Вип. 1(14). 2007. № 1. С. 61–69.

11. Погребной М.А., Волков О.О., Сизый Ю.А., Гуцаленко Ю.Г. Електронно-мікроскопічне дослідження «білого шару» після термофрикційної обробки. *Резание и инструмент в технологических системах* : междунар. науч.-техн. сб. / НТУ «ХПИ». Вип. 72. Харьков : НТУ «ХПИ», 2007. С. 126–131.

12. Волков О.О., Погрібний М.А., Сизий Ю.А., Кулик Г.Г. Дослідження ролі теплових явищ у формуванні структур та властивостей сталей різних марок при зміцненні методом ТФО. *Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Харків: НТУ "ХПІ", 2010. Вип. 40. С. 17–24.

13. Volkov O.A. Study of heat deformation influence in surface strain hardening of steel by thermofriction processing. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2016. Vol. 2. № 5 (80). P. 38–44.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

14. Сизый Ю.А., Погребной Н.А., Волков О.А. Упрочение поверхности стали Х12М при помощи термофрикционной обработки. *Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. Труды 7-й Международной научно-технической конференции, 27-28 мая 2003 г.* Харьков: ХНПК «ФЭД», 2003. С. 130–133.

15. Князев С.А., Погрібний М.А., Волков О.О. Оптимізація режимів зміцнення ТФО сталей з різним хімічним складом. Тези доповідей I Університетської науково-практичної студентської конференції магістрантів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Харків: НТУ «ХПІ». Т. 1. 2007. С. 127–128.

16. Pogrebnoy N.A., Sizyi Yu.A., Gutsalenko Yu.G., Volkov O.A. Steel strengthened surface layer forming as result of thermofriction preprocessing and diamond-spark grinding. *7 th International Conference «Research and Development in Mechanical Industry» RaDMI 2007, 16-20 Sept. 2007, Belgrade, Serbia: Proceedings on CD-ROM*. P. 241–245.

17. Волков О.А., Погребной Н.А., Сизый Ю.А. Исследование эксплуатационной стойкости деревообрабатывающих ножей из стали 65Г после упрочнения методом ТФО. *«Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я»*. Матеріали XVI міжнар. наук.-прак. конф. 4-6 червня 2008 р. Харків: у 2 ч. Ч. I. Харків: НТУ «ХПІ». 2008. С. 268.

18. Волков О.А. Исследование влияния тепловых процессов на формирование структур и свойств сталей разных марок при упрочнении методом ТФО. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції, Ч. II (15-17 травня 2012 р., Харків)*. – Харків, НТУ «ХПІ». С. 11.

19. Волков О.О. Дослідження теплового впливу термофрикційної обробки на структуру та властивості сталей. *Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доповідей XXI міжнародної науково-практичної конференції, Ч. II (29-31 травня 2013 р., Харків)*. Харків, НТУ «ХПІ». С. 12.

20. Дмитрук В.Л., Волков О.О. Дослідження теплостійкості сталі, що зміцнена методом ТФО при її подальшому нагріванні до різних температур. *VIII Університетська науково-практична студентська конференція магістрантів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (22–24 квітня 2014 року : матеріали конференції: у 3-х ч. Ч. 2.* – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. С. 10.

21. Азаров М.С., Волков О.А., Погребной Н.А. Исследование особенностей термофрикционного упрочнения образцов с переменным сечением. *X Між-*

народна науково-практична студентська конференція магістрантів (05–08 квітня 2016 року): матеріали конференції: у 3-х ч. Ч. 2. Харків : НТУ «ХП», 2016. С. 4–5.

22. Єфремов А.Є., Волков О.О., Погрібний М.А. Дослідження характеру знеміцнення сталі при нагріванні після зміцнення ТФО. *XI Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів (18–21 квітня 2017 року)*: матеріали конференції: у 3-х ч. Ч. 1. Харків : НТУ «ХП», 2017. С. 152.

23. Волков О.О., Погрібний М.А. Дослідження особливостей зміцнення сталей з різним вмістом вуглецю методом ТФО. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції МісroCAD-2019, 15-17 травня 2019 р.: у 4 ч. Ч. I. / за ред. проф. Сокола Є.І. Харків : НТУ «ХП». С. 284.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

24. Спосіб зміцнення поверхні. Патент № 90192 У Україна: МПК С2 UA. Волков О.О. а200808153; заявл. 17.06.2008; опубл. 12.04.2010. Бюл. №7.

25. Спосіб зміцнення та шліфування поверхні. Патент № 90191 У Україна: МПК С2 UA. Волков О.О., Погрібний М.А., Сизий Ю.А. а200808150; заявл. 17.06.2008; опубл. 12.04.2010. Бюл. №7.

26. Волков О.А. Влияние термофрикционной обработки на структуру и свойства стали 15X11МФ. *Вісник НТУ «ХП»*. Харків: НТУ «ХП», 2002. № 6. Т. 2. С. 66–68.

27. Погрібний М.А., Сизий Ю.А., Волков О.О. Дослідження структури сталі після ТФО і чистового шліфування. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства «Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні»*. Харків, 2007. Вип. 61. С. 255–260.

## АНОТАЦІЯ

**Волков О.О.** Підвищення експлуатаційної стійкості деталей та інструменту методом термофрикційного зміцнення.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство. – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Міністерство освіти і науки України, Харків – 2020.

Метою дисертаційного дослідження є підвищення експлуатаційної стійкості деталей машин та інструменту із сталей шляхом розробки та використання технологічного комплексу термофрикційного зміцнення (ТФЗ) з можливістю одночасного формування необхідної якості поверхні, та визначення природи і закономірностей процесу зміцнення.

У дисертаційній роботі виконана науково обґрунтована розробка технологічного комплексу оброблення сталей різних марок з використанням методу термофрикційного зміцнення, що дозволило забезпечити суттєве підвищення їх поверхневої твердості та зносостійкості в 2–3 рази.

Експериментальні дослідження проводили на основі детального вивчення впливу на кінцеві характеристики сталей зовнішніх і внутрішніх факторів при їх комплексному обробленні. Для забезпечення ефективного зміцнення проводила-

ся оптимізація параметрів процесу ТФЗ (режимів ТФЗ). Обрані марки сталей охоплюють основну промислову номенклатуру для деталей машин та інструмента, згідно діапазону за вмістом вуглецю. В роботі було проведено визначення взаємозв'язку між температурою нагрівання поверхні під час ТФЗ, швидкістю охолодження, формуванням структури, напруженим станом та властивостями сталей, зміцнених ТФО. При дослідженні вирішена задача теплопровідності, що дозволило корегувати температуру нагрівання поверхні зразків сталей 15X11МФ, 65Г, У8А, Х12М при ТФЗ. Поверхнєве зміцнення досягається формуванням «білого шару», що підтверджено вимірюванням мікротвердості. Показано, що деформаційний механізм зміцнення при короткочасному нагріванні поверхні, що зміцнювали, є переважним механізмом при ТФЗ. При зміцненні утворюється структура «деформованого зернистого мартенситу» з включенням фази  $\epsilon$ -карбїду, твердість якої більш ніж удвічі перевищує твердість мартенситної структури, яка утворена при стандартному зміцненні даних сталей, і може розглядатися як тип наноструктури. Наукова новизна отриманих результатів полягає в узагальненні та розвитку теорій зміцнення матеріалів з урахуванням та можливістю керування тепловими та деформаційними явищами при структуроутворенні матеріалів в момент ТФЗ, що дозволяє вирішити актуальну проблему поверхневого зміцнення конструкційних та інструментальних сталей. Розроблено технологію зміцнення поверхні, а також комплексну технологію одночасного зміцнення та шліфування поверхні.

**Ключові слова:** термофрикційне оброблення (ТФО), термофрикційне зміцнення (ТФЗ), напружений стан, «білий шар», «деформований зернистий мартенсит»,  $\epsilon$ -карбїд, наноструктура.

## АННОТАЦИЯ

**Волков О.О.** Повышение эксплуатационной стойкости деталей и инструмента методом термофрикционного упрочнения.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение. – Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенка, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2020.

Целью диссертационного исследования является повышение эксплуатационной стойкости деталей машин и инструмента из сталей путем разработки и использования технологического комплекса термофрикционного упрочнения (ТФУ) с возможностью одновременного формирования необходимого качества поверхности, и определение природы и закономерностей процесса упрочнения.

В диссертационной работе выполнена научно обоснованная разработка технологического комплекса обработки сталей разных марок с использованием метода термофрикционного упрочнения, что позволило обеспечить существенное повышение их поверхностной твердости и износостойкости в 2–3 раза.

Экспериментальные исследования проводили на основе детального изучения влияния на конечные характеристики сталей внешних и внутренних факторов при их комплексной обработке. Выбранные марки сталей охватывают основную промышленную номенклатуру для деталей машин и инструмента, согласно диапазону по содержанию углерода.

**Ключевые слова:** термофрикционная обработка (ТФО), термофрикционное упрочнение (ТФУ), напряженное состояние, «белый слой», «деформированный зернистый мартенсит»,  $\epsilon$ -карбид, наноструктура.

## ABSTRACT

**Volkov O.O.** Improving the operational durability of parts and tools by the method of thermofriction hardening. – Manuscript.

Thesis for a candidate's degree in technical sciences in specialty 05.02.01 – materials science. – Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The purpose of the dissertation research is to increase the operational stability of machine parts and tools made of steel by developing and using the technological complex of thermofriction hardening (TFH) with the possibility of simultaneously forming the necessary surface quality, and determining the nature and laws of the hardening process.

In the dissertation, the scientifically substantiated development of the technological complex for steel processing of different grades using the method of thermofriction hardening was performed, which made it possible to significantly increase their surface hardness and wear resistance by 2–3 times.

Experimental studies were carried out on the basis of a detailed study of the influence on the final characteristics of steels of external and internal factors during their complex processing. In order to ensure effective hardening, TFH regimes were optimized. Selected steel grades cover the main industrial range for machine parts and tools, according to the range of carbon content. In the dissertation was to determine the relationship between the surface heating temperature during TFH, cooling rate, deformation, structure formation and properties of steels, hardened by TFP. The study solved the task thermal conductivity, which allowed determining the surface heating temperature of samples of steels 15X11MФ, 65Г, У8А, X12M at TFP. The photographs of microstructures, which show changes over the cross section of the samples are presented. The presence of surface-hardened «white layer» with increased hardness is obvious, as evidenced by the prints of micro-hardness measurements. The data showed that the deformation mechanism of hardening in a short-term heating of the hardenable surface is predominant at TFP. It is also noted that the «deformed grained martensite» and  $\epsilon$ -carbide structure is formed, the hardness of which is more than twice the hardness of the martensite structure obtained in hardening of the proposed steels and can be considered as a type of nanostructure. Graphs of temperature fields are shown on the surface area adjacent to the edge. The data on the stress state and the phase composition of the surface after the TFP are given. The scientific novelty of the obtained results consists in the generalization and development of the theories of hardening and structure formation of materials, as well as the management by thermal phenomena and deformation, which allow to solve the actual problem of surface hardening of structural and tool steels.

The technologies of surface hardening, as well as the technology of simultaneous hardening and grinding are developed.

**Keywords:** thermofriction processing (TFP), thermofriction hardening (TFH), stress state, «white layer», «deformed granular martensite»,  $\epsilon$ -carbide, nanostructure.