

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію **Князєва Сергія Анатолійовича** на тему: «Підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин боруванням із швидкісним нагрівом СВЧ», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – «Матеріалознавство»

Актуальність обраної теми дисертації

Тема дисертаційної роботи Князєва С.А. присвячена підвищенню поверхневої міцності деталей з конструкційних сталей для забезпечення в них необхідної експлуатаційної стійкості.

Актуальними в наш час є підходи з використанням комплексних методів оброблення, які б дозволяли забезпечувати суттєве покращення властивостей матеріалу. Поєднання хіміко-термічної обробки, а саме борування, з швидкісним нагрівом струмами високої частоти (СВЧ) дозволяє добитись місцевого зміцнення поверхонь, які цього потребують а також досягти суттєвої інтенсифікації дифузійних процесів і, як наслідок суттєво скоротити час оброблення. При цьому ефект зміцнення завдяки такому поєднанню може суттєво підвищувати зносостійкість матеріалів, не погіршуючи характеристик серцевини виробу, чого неможливо досягти за допомогою стандартних методів хіміко-термічної обробки. Рівень властивостей залежить від параметрів нагріву та насичення, 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 зміцнення боруванням з швидкісним нагрівом СВЧ. Важливим є оптимізація режимів нагріву, та виявлення факторів, які можуть мати домінуючу роль в процесі оброблення матеріалів. Тому робота, що спрямована на підвищення експлуатаційної стійкості деталей зміцнення може бути віднесена до важливих та актуальних. Такі дослідження дозволять отримати чітке уявлення про природу ефекту зміцнення при використанні основних положень теорії структурних і фазових перетворень в матеріалах, та сформуванню системний підхід до насичення поверхні бором при швидкісному нагріві СВЧ, як до ефективного методу, що дозволяє забезпечувати зміцнення різного типу виробів.

Зазначені обставини були підґрунтям для формування дисертантом Князєвим С. А. обґрунтованого науково-технічного завдання, вирішення якого відкрило шляхи для розкриття природи зміцнення сталей при боруванні з швидкісним нагрівом СВЧ та підвищення експлуатаційної стійкості виробів.

Вищезазначене, характеризує тему рецензованої дисертації як *актуальну*, та підтверджують її відповідність вимогам за ознакою «актуальність обраної теми дисертації».

Оцінка обґрунтованості наукових положень дисертації, висновків і рекомендацій, їх достовірність і новизна

Обґрунтованість наукових положень дисертації відповідає встановленим критеріям. У дисертаційній роботі виконано наукові розробки у галузі матеріалознавства, які забезпечують вирішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення працездатності деталей машин, які експлуатуються в умовах інтенсивного поверхневого зносу, та розробка ефективної для промислового використання технології зміцнення, основаної на поєднанні локальної хіміко-термічної обробки і швидкісного нагріву струмами високої частоти.

Дисертант запропонував загальний комплексний підхід до теоретичних та експериментальних досліджень з оцінкою впливу різних факторів оброблення на структуроутворення та властивості сталей різного структурного класу та різним ступенем легованості.

Теоретичні дослідження розробляли на основі фундаментальних положень матеріалознавства, хіміко-термічного оброблення матеріалів та математичного планування експерименту.

Лабораторні та промислові дослідження виконано на сучасному устаткуванні та вимірювальному обладнанні. Використовували сучасні методи досліджень: оптичну та растрову електронну мікроскопію, рентгенівський елементний та рентгеноструктурний аналіз, оцінку твердості, мікротвердості та рівня мікрокрихкості. Для оцінки стійкості до зношування проводились відповідні досліди під дією потоку часток під різними кутами атаки відносно поверхні. Для виміру температури та швидкість нагріву при короткочасних процесах використано спеціально створений пристрій та програму.

Для вивчення дифузійних явищ при реалізації умов зернограничної дифузії використано метод розрахунку концентраційних полів. При цьому результати комп'ютерного порівняні з експериментальними металографічними даними, які засвідчили правильність підходу до теоретичних розрахунків.

З метою оптимізації режимів борування сталей при швидкісному нагріві СВЧ для отримання необхідного співвідношення мікротвердості та глибини зміцнення проводилося математичне планування експерименту та обрана математична модель.

При проведенні досліджень для визначення структурного стану по перерізу зразків використані методи металографічного аналізу з використанням оптичної, растрової електронної мікроскопії, проведені дюрOMETричні дослідження.

Для вивчення фазового складу борованих шарів, який формується в сталях під дією пічного та швидкісного нагріву СВЧ використано метод рентгенівського фазового якісного аналізу.

Для оцінки мікрокрихкості поверхневого шару після різних видів борування проведено використано прилад ПМТ-3 та прилад для вимірювання твердості за Роквеллом (шкала А) з метою визначення сколювання краю поверхні при різних видах навантаження (мікро- та макроконттактних навантаженнях).

Елементний склад визначався низкою спеціальних приладів рентгенофлуоресцентного аналізу, який дозволив визначити перерозподіл елементів що дифундують у сталі.

Для визначення механічних характеристик окрім виміру мікротвердості проводились дослідження на ударний згин та дослідження на супротив поверхні матеріалів зношуванню шляхом високошвидкісної дії абразивних часток під тиском та різними кутами атаки сопла, яке здійснює подачу ероденту.

Обґрунтовані положення і висновки рецензованої роботи не вступають у протиріччя з фундаментальними основами матеріалознавства.

Вирішення поставленої науково-технічної проблеми дозволило автору одержати низку нових результатів, що складають наукову новизну дисертації. Вважаю за необхідне наголосити на найважливіших положеннях:

Вперше:

– на основі теоретичних і експериментальних досліджень виявлено особливості дифузійних процесів в поверхневих шарах сталі при боруванні в умовах високих швидкостей нагріву.

– встановлено природу впливу швидкісного нагріву на розвиток дифузії при боруванні, яка полягає в інтенсифікації процесів насичення за рахунок збільшення кількості границь розділу при фазовій перекристалізації, що разом з горофільною природою бору визначає зернограничний механізм дифузії в якості домінуючого і більш динамічного.

– на основі досліджень зв'язків між швидкістю нагріву і особливостями структуро- та фазоутворення запропонована фізико-математична модель отримання ефективного дифузійного борованого шару при збільшенні швидкості нагріву до 1000 °С/с і більше.

Отримало подальший розвиток:

– технологія вимірювання і швидкісного збору даних у швидкоплинних процесах нагріву струмами високої частоти, які створюють електромагнітні перешкоди.

Удосконалено:

– процес пічного борування шляхом дослідження режимів і складу паст з метою скорочення його тривалості і усунення негативного впливу на матричну структуру матеріалу, поверхня якого обробляється.

– процес формування однофазного борованого шару з метою зменшення крихкості і тріщинотворення.

– технологію борування з метою зменшення кількості карбідної фази у матричній структурі сталі мартенситного класу з підвищеним вмістом вуглецю.

Слід зазначити, що всі вказані пункти в цілому відображені у дисертаційній роботі і повністю розкриті.

Значимість результатів дисертаційної роботи для науки і практики

Основні результати досліджень можуть використовуватись для підвищення експлуатаційної стійкості деталей машин, як удосконаленим пічним боруванням так і боруванням з швидкісним нагрівом СВЧ, що дозволяє корегувати структуру і властивості, а також вибір марок сталей з покращенням їх властивостей при зміцненні. Основні практичні результати роботи пройшли випробування на підприємствах державної та приватної форми власності: АТ «Турбоатом», ТОВ «Науково-технічна і фінансово-промислова компанія «ВГК»», ТОВ «ГА Проект», ТОВ Науково-технічний та виробничий комплекс «ЕНЕРГОСТАЛЬ».

Згідно актів випробувань, впровадження та апробацій досліджень на вищезгаданих підприємствах при зміцненні різноманітних деталей машин експлуатаційна стійкість зростає до 2,5 – 5 разів, твердість до 900 – 950 HV при цьому у ряді випадків відмічено відсутність деформування деталей. У ряді випадків отримано позитивний економічний ефект, як , наприклад при обробці дробеметних лопаток.

Розробки, виконані в дисертаційній роботі, використовуються і в навчальному процесі при викладанні лекційних та практичних курсів з дисциплін «Автоматизація виробничих процесів», «Хіміко-термічна обробка матеріалів», «Структури та функціональні властивості матеріалів», для студентів зі спеціальності 132 «Матеріалознавство» у НТУ «ХПІ» де автор проводив роботу та у Сумському державному університеті при викладанні дисциплін «Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство», «Металознавство та основи термічної обробки», «Технологія виробництва та обробки матеріалів» Основи наукових досліджень нових функціональних матеріалів», «Основи наукових досліджень та організація НДР», «Зносостійкі та антифрикційні матеріали».

Повнота викладу основних результатів дисертації

Результати дисертаційної роботи Князева С. А. опубліковані в 25 наукових працях, у тому числі: 7 статей у спеціалізованих наукових виданнях України і 3 статті у міжнародних виданнях (у виданні, що включено до міжнародної наукометричної бази Scopus), 1 стаття у закордонному виданні; 17 тез у збірниках доповідей наукових конференцій. Тому слід вважати, що вимоги стосовно публікацій та апробації результатів дисертації Князева С. А. виконано у повному обсязі.

Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертація Князева С. А. структурована і складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 226 сторінок, у

тому числі 2 додатків на 11 сторінках, обсяг основного тексту дисертації становить 214 сторінок, містить 109 рисунків, 27 таблиць. Список використаних джерел нараховує 128 найменувань на 11 сторінках.

Вступ дисертації обґрунтовує актуальність обраної теми, дана загальна характеристика поверхневого зміцнення матеріалів методами хіміко-термічної обробки, 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 пошукач наукового ступеню докладно висвітлив сучасний стан питання, провів огляд літературних джерел, присвячених проблемі поверхневого зміцнення за допомогою різних хіміко-термічних методів. Показано, що досягнення зміцнення при таких методах оброблення обумовлено саме формуванням твердого поверхневого дифузійного шару. Однак, відзначено, що природа і особливості формування структури призводить до збільшення крихкості шарів, для формування яких необхідно витратити багато часу. Все це не дає можливості прогнозувати та керувати ефективним формуванням зміцненого 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 боруванням з інтенсифікуючою дією швидкісного нагріву, та розкриттям особливостей формування борованого шару залежно від хімічного складу матеріалу.

У другому розділі дисертант висвітлює методологію експериментів та досліджень дисертаційної роботи. Наведено відомості про матеріали, що були використані в роботі, та методологію досліджень, яка включає використання комплексу експериментів з досліджень впливу борування на структуру та властивості.

Експерименти щодо борування проводилися на плоских зразках та деталях із сталей марок сталь 40, 40X, 15X11МФ, X46Cr13, AISI 304 після відпалювання. Такий вибір сталей пояснюється необхідністю охопити основний діапазон, щодо вмісту вуглецю - від 0,12 до 0,6 % C, ступеня легування, структурних класів та широтою застосування в промисловості.

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 з використанням мікротвердоміра «ПМТ-3». Фазовий склад поверхневого шару сталей визначався з використанням рентгенівського фазового аналізу. Визначення температури розігрівання матеріалів в зоні борування та швидкості охолодження проводили з використанням термопар та пристрою швидкісного збору даних у цифровому форматі. При аналізі розподілу бору по глибині від поверхні зразків із сталей з різним швидкостями нагріву вирішували завдання концентраційного розподілу на основі отриманого з розрахунків коефіцієнту зернограничної дифузії. Для оптимізації режимів борування з швидкісним нагрівом та отримання необхідного співвідношення мікротвердості та глибини зміцнення автор роботи проводив математичне планування експерименту. Для визначення механічних характеристик матеріалів після обробки проводились випробування на ударний згин. Для визначення перерозподілу елементів у дифузійному шарі після борування використовували метод РФА, який проводили пошарово від поверхні в глибину, що дозволило отримати інформацію про стан на всіх глибинах по перерізу зразка.

Представлена дисертантом методика проведення досліджень, що викладена у розділі 2, забезпечила одержання достовірних та коректних результатів.

Третій розділ приведені результати дослідження впливу традиційного пічного борування на структуру та властивості борованих шарів в залежності від режимів борування. Технологію пічного борування досліджено з метою вибору основних реагентів для здійснення ефективного насичення та отримання базових зразків, що використовувались при порівнянні структур та властивостей зразків після технології борування зі швидкісним

нагрівом СВЧ.

За даними мікротвердості, металографічного та рентгеноструктурного аналізів можна зробити висновок, що боровані шари на сталі 40X складаються, головним чином, з бориду Fe_2B . На сталі 15X11МФ у поверхні виявлено зону бориду Fe_2B , що щільно зчеплена з основним металом. Мікротвердість цієї ділянки вища, ніж на сталях 40 та 40X. З результатів дослідження Князев С. А. робить висновок, що карбід бору є ефективнішим джерелом атомів бору у складі паст, що діє в умовах окисного середовища і по насичуючій здатності переважає аморфний бор. Борування високолегованої сталі X46Cr13 з підвищеним складом вуглецю (до 0,5 %), на відміну від 40 та 40X, призводить до формування двофазного стану з утворенням боридів FeB та Fe_2B . Шар FeB схильний до сколювання і є небажаним, однак його присутність показує високий потенціал насичення при дисоціації борскладової речовини.

Як виявили досліди з короткочасним високотемпературним боруванням, найефективнішою є паста з підвищеним вмістом активатора на основі 60% карбиду бору та 40% NaF . В цілому, дослідження по пічному боруванню показали потенційну можливість скорочення процесу борування. Крім того, як показали дослідження, суцільна морфологія боридів, особливо при формуванні бориду FeB , неприйнятна для умов контактного навантаження та кавітаційної дії технологічного середовища на поверхні деталей внаслідок значної крихкості.

Четвертий розділ приведені результати дослідження особливостей фазового складу, структури та властивостей борованих шарів, отриманих в умовах швидкісного нагрівання СВЧ.

Борований шар, отриманий на сталі мартенситного класу з пасти, має високі значення товщини дифузійного шару, і переважає по товщині борований шар отриманий за традиційною пічною технологією нагріву. Як показав у порівнянні дисертант Князев С. А., борований шар, отриманий при швидкісному нагріві СВЧ, хоча і поступається за мікротвердістю борованому шару, отриманому при пічному нагріві, однак має більш плавний характер зміни мікротвердості по глибині, що призводить до зменшення крихкості поверхневих зміцнених шарів.

Як показали результати досліджень на вуглецевих конструкційних сталях, при високій температурі (1300 °C і вище), часто формується структура евтектики і боридів з заокругленими гранями, які при порівняно низьких швидкостях нагрівання (100 – 350 °C/c) утворюють дендритний скелет. При більш нерівноважних умовах (500 – 1000 °C/c) формування борованого шару, на високолегованих сталях мартенситного класу, утворюється структура ізольованих боридів з правильними прямолінійними гранями типу Fe_2B , високодисперсними карбоборидами та твердим розчином бору у залізі в якості матриці. Збільшення швидкості нагріву з 150 °C/c до 1000 °C/c призводить до зміни морфології структури, яка полягає в усуненні структури регулярної евтектики, що як правило, має понижено мікротвердість.

Шляхом рентгеноструктурного аналізу борованих шарів, автором роботи отримано при швидкісному нагріві СВЧ, виявлено твердий розчин на основі заліза, борид типу Fe_2B , карбоборид $\text{Fe}_{23}(\text{C},\text{B})_6$.

Дисертантом встановлено, що при великих швидкостях нагрівання (1000 °C/c), зустрічної дифузії хрому не відбувається внаслідок короткочасності процесу і його концентрація локально не збільшується, як це спостерігалось у випадках з пічним нагрівом.

Для виявлення механізму дифузії бору, при різних швидкостях нагріву, автором роботи було проведено експерименти по боруванню аустенітної сталі 12X18N10T. Дифузійне проникнення бору відбувається по границям зерен. Боровані шари, отримані на аустенітній сталі, є добрим демонстратором прояву механізму дифузії бору. Бор є горофільним елементом і намагається виділитись та дифундувати по границям зерен. При швидкісному нагріві СВЧ, коли реалізується подрібнення зерен та збільшення границь поділу, складаються сприятливі умови до зернограничної дифузії бору у сталі, що і проявляється у

значній дифузії бору.

Окремий інтерес представляє використання дифузійного борованого шару у якості проміжного між нітридом хрому, нанесеного вакуумно-дуговим осадженням, та м'якою аустенітною сталлю. Досягнуте в результаті такої обробки дифузійне проникнення бору по границям зерен, у вигляді «проростів» боридної фази, збільшує зчеплювання поверхневих шарів з матричним металом і, таким чином, призводить до збільшення адгезійної міцності покриття.

Для оцінки впливу швидкості нагріву на ударну в'язкість проведено випробування на ударний згин після різних варіантів борування. Порівняння даних по ударній в'язкості сталі 15X11МФ після пічного та швидкісного борування засвідчили, що після швидкісного борування СВЧ ударна в'язкість збільшується на 16 - 30 %, ніж при пічному боруванні.

Математичне планування експерименту з побудовою математичної моделі дозволило оцінити вплив параметрів процесу швидкісного борування на рівень мікротвердості та глибину зміцненого шару. Отримані рівняння характеризують залежність показників зміцнення від параметрів швидкісного борування. Автором роботи були встановлені оптимальні параметри обробки. Для сталі 15X11МФ температура формування шарів повинна знаходитись у межах 1150 – 1250 °С зі швидкістю нагріву у межах 1000 – 1100 °С/с.

П'ятий розділ присвячений практичному використанню борування зі швидкісним нагрівом СВЧ для поверхневого зміцнення виробів, які експлуатуються в умовах інтенсивного зношування. Для дослідження були обрані деталі, в яких традиційними методами зміцнення важко забезпечити досягнення необхідної зносостійкості, а саме, робочі лопатки парових турбін та дробеметні лопатки. При заміні існуючої технології обробки кромки лопаток парової турбіни з гартування на борування з нагрівом СВЧ, економічний ефект досягає 25 тис. грн. на одній лопатці внаслідок подовження строку експлуатації.

Проведено апробацію технології борування з нагрівом СВЧ на дробеметних лопатках. Показано, що заміна вже існуючих технологій зміцнення на борування з швидкісним нагрівом СВЧ, дозволяє отримати значний економічний ефект внаслідок підвищення експлуатаційних властивостей. Суттєве подовження строку активної експлуатації призводить до економічного ефекту у 500 тис. грн. при виготовленні 120 лопаток.

У **додатках** до дисертації, що рецензується, представлено програму для пристрою швидкісного збору даних та документи, що засвідчують про апробацію технології борування на різних підприємствах та організаціях.

Зауваження по дисертаційній роботі

Окрім викладених вище позитивних положень рецензованої дисертації Князєва С. А. слід зробити наступні зауваження по роботі:

1. У роботі зазначено, що головним інтенсифікуючим фактором є швидкість нагріву яка через нерівномірність процесів рекристалізації та значних напружень призводить до подрібнення структури і збільшення кількості шляхів для дифузії бору. Чи не розглядалися альтернативні теорії інтенсифікації? Чи можуть декілька факторів інтенсифікації ще більше прискорювати процеси дифузії?

2. У роботі було застосовано ламповий генератор. Зостається відкритим питання, чи можуть сучасні тиристорні генератори бути використані для успішної реалізації борування з нагрівом СВЧ?

3. Незрозумілим є сфери практичного застосування комбінованої обробки з застосуванням борування, що приведена у четвертому розділі.

Загальні висновки по дисертації

Дисертація Князєва О.О. є завершеною науковою працею, при виконанні якої були одержані нові науково-практичні результати, що у сукупності вирішують актуальну науково-технічну проблему – підвищення працездатності деталей машин, які експлуатуються в умовах інтенсивного поверхневого зносу, та розробка ефективної для промислового

використання технології зміцнення, ґснованої на поєднанні локальної хіміко-термічної обробки і швидкісного нагріву струмами високої частоти.

Основні положення дисертаційної роботи опубліковані у наукових фахових і міжнародних виданнях та широко апробовані на міжнародних науково-технічних конференціях.

Автореферат дисертаційної роботи Князева С. А. відповідає змісту і дає повне представлення з об'єму, суті виконаних досліджень.

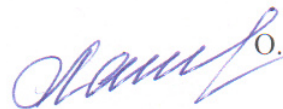
Оцінюючи дисертаційну роботу «Підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин боруванням із швидкісним нагрівом СВЧ» у цілому слід відмітити, що вона повністю відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – «Матеріалознавство» та вимогам п. 9, 11, 12, «Порядку присудження наукових ступенів», що затверджений постановою КМУ № 567 від 24.07.13, а її автор, а її автор – **Князев Сергій Анатолійович** заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство.

Офіційний опонент,
кандидат технічних наук,
провідний інженер-технолог центральної
заводської лабораторії.
Державного підприємства «Завод імені В.О. Малишева»,
концерн «Укроборонпром»,

 О.К. Олійник

Підпис К. Т. Н. О.К. Олійника засвідчую:
Начальник відділу кадрів Державного підприємства
«Завод імені В.О. Малишева»,
концерн «Укроборонпром»



 О.А. Латанська