

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Князева Сергія Анатолійовича** на тему:
«Підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин боруванням із швидкісним нагрівом СВЧ», яка подається до захисту на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 –Матеріалознавство (13 Механічна інженерія)

Актуальність обраної теми дисертації

Актуальність дисертаційної роботи Князева Сергія Анатолійовича обумовлена необхідністю підвищення поверхневої міцності деталей з конструкційних вуглецевих та легованих сталей. Розвиток сучасної промисловості неможливий без широкого використання технологій зміцнення виробів з різних матеріалів. При цьому неабиякий інтерес у всьому світі визивають підходи з використанням комплексних методів оброблення, які б дозволяли забезпечувати суттєве покращення властивостей матеріалу.

Хіміко-термічна обробка (ХТО) в поєднанні з швидкісним нагрівом струмами високої частоти (СВЧ) є одним із ефективних методів локального зміцнення. Незважаючи на те, що в результаті ХТО значно підвищується зносостійкість виробів, традиційні методи такої обробки мають ряд недоліків, головними із яких є значна тривалість процесу та неможливість в разі потреби локалізувати нагрівання. Інтенсифікація процесів ХТО, які направлені скорочення часу протікання дифузійних процесів може значно скоротити тривалість ХТО та покращити властивості зміцнюваної поверхні. Таким інтенсифікатором може бути висока швидкість нагрівання, для досягнення якої можливе використання індукційного нагріву, замість традиційного, тривалого пічного нагріву. При цьому, використання нагріву СВЧ представляє значну цікавість і новизну з точки зору виявлення та детального дослідження особливостей формування структури та властивостей матеріалу при поверхневому дифузійному насиченню елементами, що зміцнюють, в умовах високих швидкостей нагріву. Автор дисертації узагальнив, що важливим є оптимізація режимів обробки, та виявлення факторів, що мають пріоритетну роль в процесі борування з паст. Саме тому робота, яка спрямована на підвищення експлуатаційної стійкості деталей методом борування з швидкісним нагрівом СВЧ може бути віднесена до важливих та актуальних.

Наведені факти, характеризують тему рецензованої дисертаційної роботи Князева С.А. 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

Науковий рівень дисертаційного дослідження Князева С.А. відповідає встановленим критеріям. У дисертаційній роботі виконано науково обґрунтовані 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.

Дисертантом проведено широкий спектр теоретичних та експериментальних досліджень з оцінкою впливу різних факторів оброблення на структуроутворення та властивості сталей.

Теоретичні дослідження були розроблені автором на основі фундаментальних положень матеріалознавства, ХТО, та математичного планування експерименту.

Лабораторні та промислові дослідження виконано на сучасному устаткуванні та

вимірювальному обладнанні. Використовували сучасні методи досліджень: оптичну, растрову електронну мікроскопію з можливістю мікроаналізу елементів, рентгенівську дифрактометрію, рентгенівський спектральний аналіз, оцінку мікротвердості, ударної в'язкості, виміру температури та швидкості нагріву з застосуванням сучасної цифрової системи збору даних.

Автор постійно співставляє технологічні параметри отримання дифузійних шарів при швидкісному нагріві, морфологію структури та властивості, що забезпечені отриманою мікроструктурою поверхневого шару. Окрім вивчення поверхневого шару у роботі значну увагу приділено стану основного матеріалу та його властивостям. Використовуючи фізичну модель і перевірявши її експериментально, отримано важливі значення показника зернограничної дифузії бору у структуру сталі, який дає можливість прогнозувати концентраційний розподіл бору і структурне формування шару.

Висновки рецензованої роботи, що ґрунтуються на широкому фактичному матеріалі повністю співвідносяться з ключовими 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 борованні в умовах високих швидкостей нагріву.

- встановлено природу впливу швидкісного нагріву на розвиток дифузії при борованні, 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 °C/c 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 боровання 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 боровання з метою зменшення кількості карбідної фази у матричній структурі сталі мартенситного класу з підвищеним вмістом вуглецю.

Значимість результатів дисертаційної роботи для науки і практики

При виконанні дисертаційної роботи пошукач наукового ступеню кандидата технічних наук Князев Сергій Анатолійович провів фундаментальні дослідження в напрямі підвищення працездатності деталей машин, які експлуатуються в умовах інтенсивного поверхневого зносу, та розробки ефективної для промислового використання технології зміцнення, основаної на поєднанні локальної хіміко-термічної обробки і швидкісного нагріву струмами високої частоти.

Важливим для забезпечення необхідних властивостей деталей є формування в них нетипової структури борованого шару, який складається з ізольованих боридів, дисперсних карбоборидів, які розміщені у порівняно пластичному твердому розчині бору у залізі.

Основні практичні результати роботи пройшли випробування:

- на АТ "Турбоатом" та рекомендовано в якості нової технології зміцнення кромки лопаток парових турбін на базі існуючого обладнання.

- технологію боровання з швидкісним нагрівом СВЧ апробовано для зміцнення дробеметних лопаток. Порівняно строк експлуатації лопаток, борованих за новою технологією і лопаток, зміцнених за звичайною технологією термічної обробки. За результатами порівняння

технології буровання з швидкісним нагрівом СВЧ рекомендовано до впровадження на підприємстві ТОВ «Науково-технічна і фінансово-промислова компанія «ВГІК»».

Експериментальні випробування показали, що зносостійкість матеріалу лопаток зі сталі 15X11МФ, після поверхневого зміцнення та застосування розробленої технології, зростає у 1,5 рази. При заміні існуючої технології обробки кромки лопаток парової турбіни з гартування на буровання з нагрівом СВЧ, економічний ефект досягає 25 тис. грн. на одній лопатці внаслідок подовження строку експлуатації. Проведено апробацію технології буровання з нагрівом СВЧ на дробеметних лопатках. Показано, що заміна вже існуючих технологій зміцнення на буровання 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.

Прикладний характер результатів дисертації також полягає в їх використанні у навчальному процесі НТУ «ХПІ» на кафедрі «Матеріалознавство» при викладенні дисциплін «Автоматизація виробничих процесів», «Хіміко-термічна обробка матеріалів», «Структури та функціональні властивості матеріалів», а також у навчальному процесі на кафедрі матеріалознавства і технології конструкційних матеріалів Сумського державного університету при викладенні дисциплін «Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство», «Металознавство та основи термічної обробки», «Технологія виробництва та обробки матеріалів».

Все це свідчить про достатню практичну значимість даного дисертаційного дослідження. Глибина наукових та практичних результатів, представлених Князевим С. А. у дисертаційній роботі, підкреслює системність, коректність та обґрунтованість накопиченого експериментального досвіду, що отриманий на основі застосування сучасних методів досліджень і підтверджених практичною реалізацією в умовах промислового виробництва.

Повнота викладу основних результатів дисертації

Основні результати дисертаційної роботи Князева С. А. опубліковані в 25 наукових працях, у тому числі: 7 статей у спеціалізованих наукових виданнях України з них 3 статті у міжнародному виданні (що індексується міжнародною наукометричною базою Scopus), 1 стаття у закордонному спеціалізованому виданні; 17 публікацій за матеріалами доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Загалом вимоги стосовно повноти публікацій та апробації результатів дисертації Князева С. А. виконано у повному обсязі.

Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертація Князева С. А. 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.

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми, дана загальна характеристика поверхневого зміцнення матеріалів поверхневими 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 присвячений аналізу сучасного стану досліджень щодо підвищення зносостійкості деталей машин шляхом ХТО. Приведений огляд джерел літератури свідчить про те, що насичення поверхневих шарів бором є одним з найефективніших методів поверхневого зміцнення конструкційних сталей. Бориди заліза забезпечують значний рівень твердості, а за товщиною борований шар поступається тільки цементованим шарам. В той же час традиційні методи пічного буровання мають ряд недоліків, головними з яких є значна тривалість процесу та неможливість в разі потреби локалізувати нагрівання. На цій підставі дисертантом Князевим С. А. сформульовано мету та завдання дослідження.

У другому розділі «Методика досліджень» здобувач висвітлює узагальнену методологію

виконання дисертаційної роботи. Наведено відомості про матеріали, що були використані в роботі, та методологію досліджень, яка включає використання комплексу експериментів з досліджень впливу борування з швидкісним нагрівом СВЧ, що зміцнює на особливості формування структури та властивостей сталей.

Дослідженню підлягали сталі 40, 40X, 15X11МФ, X46Cr13 та 12X18H10T. Борування проводилось з використанням паст, які наносились на поверхню зразків та натурних виробів шари товщиною ~ 1 мм. В процесі експериментів використовувались пасти різних складів, основними компонентами яких були карбід бору, аморфний бор та фтористий натрій. Борування за традиційною технологією проводилося шляхом нагрівання в печі в інтервалі температур 950...1200 °С з витримкою від 15 хв. до 3 годин. Для швидкісного борування використовувався генератор струмів високої частоти ВЧГ 60-3/0,44, температура нагрівання при цьому варіювалась від 1050 до 1300 °С, а швидкість – від 1000 до 1200 °С/с. Швидкісне борування проводилось без витримки при температурі нагрівання з наступним охолодженням на повітрі або в воді.

Мікроструктуру та товщину дифузійних шарів Князев С. А. досліджував методом оптичної мікроскопії на мікроскопі ZEISS AXIO Vert. A1 за стандартною методикою світлого поля з максимальним збільшенням $\times 1000$. Твердість зразків визначалася на приладі типу ТК (Роквелл) за шкалою А згідно з ГОСТ 9013–95, мікротвердість – на приладі ПМТ-3 при навантаженні 200 г і витримці 10 с за стандартною методикою (ДСТУ ISO 6507-1:2007). Показник мікротвердості дифузійних шарів оцінювали при різних навантаженнях від 20 до 200 г відповідно до шкали ВІАМ за допомогою приладу ПМТ-3, випробування на ударний згин на маятниковому копрі 2130КМ-03. Зношування визначалось виміром втрати ваги при дії твердих прискорених стислим повітрям часток з кутом атаки 45° та 90°. Елементний аналіз проводився на приладах СЕФ-01-М та СЕФ-01-М-1 серії "СПРУТ". Для фазового аналізу застосовували рентгенівський дифрактометр ДРОН-3, для детального структурного аналізу та мікророзподілу елементів растровий електронний мікроскоп Philips XL 30 ESEM з максимальним збільшенням $\times 8000$. Для оптимізації режимів швидкісного борування та побудови моделі інтенсивного насичення поверхні бором при високих швидкостях нагрівання проводили математичне планування експерименту.

Представлена дисертантом Князевим С. А. методика проведення досліджень забезпечила одержання достовірних та коректних результатів. Даний розділ дисертації свідчить про логічні та чіткі напрями реалізації автором поставленої мети, та підтверджує його здатність ставити та послідовно розв'язувати складні наукові завдання, застосовувати сучасні методики та обладнання, зіставляти і аналізувати одержані різними методами результати, робити на їх основі коректні висновки, що демонструє системний підхід до вирішення складних завдань.

У третьому розділі приведені результати дослідження впливу традиційного пічного борування на структуру та властивості борованих шарів в залежності від режимів борування та вмісту вуглецю в сталі. 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 дисертант робить висновок, що боровані шари на сталі 40X складаються, головним чином, з бориду Fe_2B . При появі в структурі твердого розчину бору в α -залізі на відстані 110 – 150 мкм від краю зразків спостерігається падіння мікротвердості до 10000 МПа. На сталі 15X11МФ у поверхні виявлено зону бориду Fe_2B , що щільно зчеплена з основним металом і простягається на глибину приблизно 80 мкм. Мікротвердість цієї ділянки вища, ніж на сталях 40 та 40X, і складає $H_{200} \approx 22500$ МПа. З результатів дослідження Князев С. А. робить висновок, що карбід бору є ефективнішим джерелом атомів бору у складі Борування високолегованої сталі X46Cr13 з підвищеним складом вуглецю (до 0,5 %), на відміну від сталей 40 та 40X, призводить до формування двофазного стану з утворенням боридів FeB та Fe_2B . Завдяки металографічному аналізу дисертант Князев С. А. робить висновок, що шар FeB схильний до сколювання і є небажаним, однак його присутність показує високий потенціал насичення при дисоціації борскладової речовини. паст, що діє в умовах окисного середовища і по насичуючій здатності переважає аморфний бор. Борування зі ступеневим нагрівом, при

якому спочатку відбувається нагрів до 1000 °С з подальшим зниженням температури обробки до 830 °С, дозволяє отримати більші за розмірами боровані шари з мінімальним укрупненням зерна основного матеріалу, яке відбувається внаслідок збиральної рекристалізації. Такі дослідження показують існування потенційних шляхів вдосконалення процесу борування. Борування високолегованої сталі 15X11МФ з малим вмістом вуглецю (0,15%) з використанням пасти, призводить до формування меншої кількості бориду FeB. Дослідження розподілу легуючих елементів в борованому шарі, здійснене з пошаровим поліруванням показало, що хром присутній у приповерхневих шарах концентрується у перехідному підшарку під зоною боридів. Такий перерозподіл свідчить про наявність зустрічної дифузії з формуванням більш твердого підшарку, ніж у сталях без хрому. Молібден та ванадій розчиняється тільки у фазі типу Me₂B, підвищуючи її мікротвердість.

Як виявили досліди, проведені дисертантом Князевим С. А. з застосуванням короткочасного високотемпературного борування, найефективнішою є паста з підвищеним вмістом активатору на основі 60% карбиду бору та 40% NaF. В цілому, дослідження по пічному боруванню показали потенційну можливість скорочення процесу борування.

У четвертому розділі приведені результати дослідження особливостей фазового складу, структури та властивостей борованих шарів, отриманих в умовах швидкісного нагрівання СВЧ.

Як показали досліди, проведені дисертантом Князевим С. А. борований шар, отриманий на сталі мартенситного класу з пасти, має високі значення товщини дифузійного шару (235 мкм), і переважає по товщині борований шар отриманий за традиційною пічною технологією нагріву (40 мкм). Під дифузійною зоною розташована зона гартування, яка являє собою твердий підшарок. 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

Ключовим у структуроутворенні є швидкість нагріву. На вуглецевих конструкційних сталях, при високій температурі (1300 °С і вище), часто формується структура евтектики і боридів з заокругленими гранями, які при порівняно низьких швидкостях нагрівання (100 – 350 °С/с) утворюють дендритний скелет. При більш нерівноважних умовах (500 – 1000 °С/с) формування борованого шару, на високолегованих сталях мартенситного класу, утворюється структура ізольованих боридів з правильними прямолінійними гранями типу Fe₂B, високодисперсними карбоборидами та твердим розчином бору у залізі в якості матриці. При зменшенні концентрації бору, кількість карбоборидів може помітно зменшуватись, що закономірно призводить до збільшення пластичності шару. При режимах термоциклоування «нагрівання-охолодження» спостерігається збільшення кількості та укрупнення карбоборидної фази. Самі карбобориди формують ланцюги від великих боридів.

Шляхом рентгеноструктурного аналізу борованих шарів, отриманих при швидкісному нагріві СВЧ, автором роботи виявлено твердий розчин на основі заліза, невелику кількість бориду типу FeB (сліди), борид типу Fe₂B, карбоборид Fe₂₃(C,B)₆, що є нехарактерним для структури борованих шарів, отриманих традиційним способом.

Дисертант Князев С. А. встановив, що збільшення швидкості нагріву з 150 °С/с до 1000 °С/с призводить до зміни морфології структури, яка полягає в усуненні структури регулярної евтектики, що як правило, має понижено мікротвердість (8000 – 9500 МПа). При боруванні з швидкістю нагріву 1000 °С/с на сталі 15X11МФ, утворюється морфологія структури, подібна до морфології структури борованого шару на вуглецевій сталі а розподіл елементів структурних складових підтверджує їх приналежність до твердого розчину бору у залізі та легуючих елементів, карбоборидів та бориду типу Fe₂B з достатньо точної стехіометрією.

Для виявлення експериментального виявлення механізму дифузії бору, при різних швидкостях нагріву, дисертантом було проведено експерименти по боруванню аустенітної сталі 12X18N10T. Встановлено, що дифузійне проникнення бору відбувається по границям зерен. Верхня частина структури борованого зразка після пічного борування, в більшості випадків, сколюється, внаслідок того, що поверхневий шар дуже крихкий і пористий. Він складається з боридів і великої кількості пор, які утворилися у зв'язку з надмірною активністю пасти. Глибше шар складається з зерен легованого аустеніту і боридної фази Fe₂B по границям зерен. Як

встановив автор роботи 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.

У дисертаційній роботі автор демонструє перспективність методу і можливі шляхи подальшого його розвитку. Так окремий інтерес представляє використання дифузійного борованого шару у якості проміжного між нітридом хрому, нанесеного вакуумно-дуговим осадженням, та м'якою аустенітною сталлю. В процесі дослідження перед нанесенням покриття CrN сталь піддавали борованню з нагрівом СВЧ. В результаті такої обробки на поверхні формується шар CrN товщиною ≈ 5 мкм та борований прошарок товщиною до 20 мкм, який є перехідною структурою між дуже твердим нітридом хрому і м'якою підкладкою, що зменшує продавлювання при великих контактних навантаженнях та ризик сколювання поверхневого напиленого шару з нітриду хрому. 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.

Порівняння даних по ударній в'язкості сталі 15X11МФ після пічного та швидкісного боровання засвідчили, що після швидкісного боровання СВЧ ударна в'язкість збільшується на 16 - 30 %, ніж при пічному борованні.

Автором роботи встановлено і експериментально підтверджено параметри зернограничної дифузії для різних варіантів нагріву. Отримані коефіцієнти є ключовими для моделювання концентраційного розподілу бору в умовах нерівноважного формування дифузійного шару і, відповідно, для прогнозування фазового складу, структури та властивостей борованих поверхонь при високих швидкостях їх нагрівання. Надійність отриманих розрахунків підтверджена співвідношенням результатів моделювання розподілу бору по глибині співпадає з експериментальними даними.

Шляхом проведення експериментів з математичним плануванням створена математична модель з геометричною оптимізацією. Князевим С. А. були встановлені оптимальні параметри обробки. Для сталі 15X11МФ температура формування шарів повинна знаходитись у межах 1150 – 1250 °C зі швидкістю нагріву у межах 1000 – 1100 °C/c.

У п'ятому розділі висвітлено практичне використання боровання 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.

Інтенсивне зносостійке зношування вхідних кромок лопаток парових турбін призводить до суттєвого зменшення ресурсу експлуатації таких виробів. Проведені дослідження показали, що вирішення даної проблеми можна досягти застосовуючи комплексний підхід, а саме, використовуючи боровання разом зі швидкісним нагріванням СВЧ. Крім того, використання для боровання насичуючих паст, які можна наносити локально на вхідну кромку лопатки, дозволяє поєднати боровання і швидкісний нагрів СВЧ в межах однієї технології протиерозійного зміцнення лопаток, яка в даний час застосовується на АТ «Турбоатом».

В результаті металографічних та дюрOMETричних досліджень натурних лопаток зі сталі 15X11МФ Князевим С. А. встановлено, що боровання в умовах швидкісного нагрівання дозволяє отримати на вхідній кромці лопатки багатшарову композицію з власне борованого шару та перехідного прошарку високої твердості. Така структура та властивості зміцненого шару будуть сприяти ефективному підвищенню ерозійної стійкості лопаток, оскільки відносно пластична матриця твердого розчину бору в залізі здатна до дисипації енергії кавітаційних мікроударів, в той час, як тверді дисперсні частки боридів та карбоборидів зміцнюють матричну фазу та надійно екранують поширення руйнівної дії кавітації вглиб матеріалу. Цьому сприяє і наявність додаткового загартованого шару з мартенситною структурою, який забезпечує підвищену твердість на глибині до 1000 мкм. На мою думку, це підтверджує важливість отриманих результатів і висновків не тільки у науковому, але й у прикладному

плані, що дозволяє мені позитивно охарактеризувати здобувача Князева Сергія Анатолійовича, як науковця, котрий чітко окреслює та успішно вирішує найскладніші наукові завдання і реалізує їх на практиці.

У **додатках** до дисертації, що рецензується, автором представлено лістинг програми для аналого-цифрового перетворювача, який є основою створеної автором системи швидкісного збору даних температури та швидкості нагріву та акти впровадження, апробації технологій борування на різноманітних деталях.

Зауваження по дисертаційній роботі

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

1. В першому розділі розглянуті методи зміцнення поверхні з використанням хіміко-термічної обробки. Однак існують і інші методи поверхневого зміцнення, які потребують критичного порівняння з технологією, що пропонується.

2. У другому розділі при описі методики вимірювання мікротвердості запропоноване навантаження на індентор – 200 г. Чому було використано саме це навантаження і чи не було б доцільним використати менші навантаження для збільшення щільності даних по розподілу мікротвердості.

3. При обробці деталей з нагрівом СВЧ використаний нетиповий індуктор. У роботі не вказано чи можна використати циліндричний індуктор для деталі типу вал. Незрозуміло, як зміна форми індуктору позначиться на параметрах нагріву.

4. При аналізі впливу режимів борування при пічному нагріві на структуроутворення та властивості сталей в якості прикладу обрані сталі X46Cr13 та 15X11MФ. Не зовсім зрозуміло, у зв'язку з чим автором зроблено саме такий вибір матеріалів для досліджень.

5. На мою думку, було б доцільним також провести оцінку корозійної стійкості отриманих шарів. Оскільки саме за рахунок комбінованої дії руйнівних факторів відбувається зношування реальних виробів. Дослідження дії комбінованих факторів, наприклад, корозійно-ерозійних найбільш повно характеризуватиме ефективність дії обробки, що пропонується.

Загальні висновки по дисертації

Дисертація Князева С. А. є завершеною науковою працею, при виконанні якої були одержані нові науково обґрунтовані результати, що у сукупності вирішують актуальну науково-технічну проблему – підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин боруванням із використанням швидкісного нагріву струмами високої частоти.

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

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

Вважаю, що дисертаційна робота «Підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин боруванням із швидкісним нагрівом СВЧ» повністю відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – «Матеріалознавство» та вимогам п. 9, 11, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів...», що затверджений постановою КМУ № 567 від 24.07.13, а її автор – **Князєв Сергій Анатолійович** заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за означеною спеціальністю.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, доцент
директор навчально-наукового інституту технічного сервісу
Харківського національного технічного університету
сільського господарства імені Петра Василенка



О. В. Сайчук