

## ВІДГУК

офіційного опонента

Гапонової Оксани Петрівни

на дисертаційну роботу Краєвської Жанни Владиславівни

«Підвищення зносостійкості поверхні при застосуванні додаткового

фрикційно-деформаційного зміцнення сталей»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 132 – Матеріалознавство

### **Актуальність теми.**

Актуальність теми обумовлена потребою розроблення нових або удосконалення існуючих методів оброблення, які спрямовані на управління структурою та додаткове зміцнення поверхні виробів, що може застосовуватись при зміцненні виробів різної номенклатури.

Здобувачка зазначає, що важливим аспектом даного науково-технічного напрямку є економічна складова. Постійне здорожчання енергоресурсів, як суттєвий економічний чинник, підвищує актуальність використання в промисловості більш сучасних методів поверхневого зміцнення матеріалів, де враховані аспекти ресурсозбереження з одночасною перспективою отримання необхідних властивостей в об'єктах зміцнення.

Наголошено, що застосування тертя при обробленні, нагріванні та деформуванні поверхонь є сучасним і перспективним науково-промисловим питанням. Це підтверджено багатьма дослідженнями, які вже проведені в цьому напрямі, однак залишається багато питань, які потребують детального вивчення та розвитку з метою отримання можливості використання набутих результатів в науково-промисловій сфері.

Показано, що фрикційно-деформаційне зміцнення є одним із сучасних методів підвищення механічних властивостей матеріалів, що забезпечує значно вищий рівень зміцнення, порівняно з традиційними методами оброблення. Його застосування дозволяє покращити зносостійкість та довговічність виробів, що робить цей підхід особливо актуальним для різних галузей промисловості. Відомо, що формування експлуатаційних характеристик матеріалу залежить від комплексу

факторів, серед яких параметри процесу зміцнення, хімічний склад матеріалу, його вихідний стан та особливості мікроструктури. Однак механізми, що визначають ефективність цього методу, потребують подальшого дослідження, що зумовлює необхідність проведення експериментальних і теоретичних робіт, спрямованих на вдосконалення методу зміцнення сталей різних класів. Здобувачка акцентує увагу на факторах та умовах оброблення ДФДЗ, а також на визначенні ключових чинників, які відіграють вирішальну роль у процесі зміцнення. Відповідно, дослідження, що спрямовані на підвищення зносостійкості поверхневого шару матеріалів, за допомогою фрикційно-деформаційного впливу, є надзвичайно важливими як з наукової, так і з практичної точки зору. Таким чином поглиблене вивчення механізмів зміцнення дозволить сформувати науково обґрунтований підхід до застосування ДФДЗ, використовуючи положення теорії структурних і фазових перетворень у матеріалах.

Актуальною науковою задачею є удосконалення методів оброблення для підвищення зносостійкості, в результаті додаткового зміцнення під дією ДФДЗ, поверхні попередньо зміцненої термічним шляхом.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.**

Положення та висновки, наведені в дисертаційній роботі Краєвської Жанни Владиславівни, в достатній мірі обґрунтовані. Обґрунтованість отриманих у роботі наукових положень, висновків і рекомендацій базується на дослідженні процесу формування ієрархічної структури та механічних властивостей при додатковому фрикційно-деформаційному зміцненні (ДФДЗ) поверхні.

Дослідження виконані з використанням комплексу методів: металографічного макро- та мікроаналізу, дослідження механічних, трибологічних характеристик та якості поверхні до та після ДФДЗ сталей. Результати перевірені шляхом проведення експериментальних досліджень, що підтверджують обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

### **Достовірність результатів досліджень.**

Достовірність результатів теоретичних досліджень підтверджується результатами відповідних експериментальних досліджень.

Наукові результати впровадженні в навчальний процес.

### **До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:**

В дисертаційній роботі узагальнено та розвинуто результати теоретичних і експериментальних досліджень щодо факторів, умов забезпечення та керування процесами ДФДЗ, що дозволяє отримати необхідний рівень зносостійкості матеріалів і виробів з урахуванням відповідних до них вимог.

Вперше:

- запропоновано метод ДФДЗ, як спосіб підвищення зносостійкості поверхні вже зміцнених термічним шляхом, до максимального рівня, виробів із сталей;
- експериментально виявлено морфологію структури в перерізі зразків із сталей, які були додатково зміцнені з використанням методу ДФДЗ;
- встановлено оптимальні умови для отримання ефективного результату ДФДЗ сталей та надано рекомендації щодо оптимального вмісту вуглецю в сталях для застосування даного методу;
- встановлено характер змін та науково обґрунтовано взаємозв'язок між отриманим під дією ДФДЗ рівнем інструментальної твердості та значенням модуля Юнга (модуля нормальної пружності), в різних структурних станах, тобто в поверхневій, підповерхневій та основній частинах зразків із сталей, що досліджували;
- виконано розрахунки щодо підвищення зносостійкості сталі під дією ДФДЗ та визначено очікуваний економічний ефект від застосування методу ДФДЗ при зміцненні виробів із сталі 65Г на одиницю зміцненої поверхні.

Отримали подальший розвиток:

- теорії «додаткового фрикційно-деформаційного зміцнення» (ДФДЗ) та «додаткового термо-деформаційного зміцнення» (ДФТЗ) в контексті характеру додаткового зміцнення для підвищення зносостійкості загартованих сталей, які на етапі термічного зміцнення набули максимально можливого, в термічний спосіб,

рівня твердості;

– теорія аналізу зміни мікротвердості порівняно зі зміною модуля Юнга під впливом ДФДЗ в перерізах зразків сталей, що досліджувалися в дисертаційній роботі.

Удосконалено:

Методи ДФДЗ та ДТФЗ, в питаннях факторів та умов оброблення, які є похідними від методу «термофрикційного зміцнення» (ТФЗ), проте відрізняються характером структуроутворення за рахунок механізму впливу імпульсу від оброблення на фізико-механічні процеси, які відбуваються при цьому.

Методи оброблення, що спрямовані на управління структурою та зміцнення поверхневих шарів виробів, під час яких формується багатошарова морфологія перерізу, що складається з шарів, які характеризуються різними структурними станами з відповідними різними функціональними властивостями.

### **Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.**

Результатом проведених теоретичних і експериментальних досліджень є запропонований метод ДФДЗ, який може бути застосований для підвищення зносостійкості поверхні виробів із сталей. Це дозволяє реалізовувати концепцію ресурсозбереження при одночасному використанні менш дорогих матеріалів, але з покращеним рівнем зносостійкості, завдяки дії ДФДЗ. Окремі питання з матеріалів дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі при викладанні дисциплін (освітніх компонентів): «Матеріали з особливими фізичними та механічними властивостями» (бакалаврська освітня програма), «Технології та обладнання для модифікування поверхні та об'ємної обробки матеріалів», «Термомеханічні методи впливу на властивості матеріалу», «Зносостійкі та антифрикційні матеріали» (магістерська освітня програма).

### **Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.**

Результати досліджень опубліковані у 11 роботах, серед яких: 2 статті у наукових фахових виданнях України, 2 статті, що індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus, 7 тез доповідей до міжнародних науково-практичних

конференцій.

Участь здобувача у роботах, що опубліковані у співавторстві зазначена у дисертаційній роботі.

Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації та відповідають вимогам пункту 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44.

### **Оцінка змісту дисертаційної роботи.**

Дисертаційна робота Краєвської Жанни Владиславівни складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, двох додатків.

У вступі дисертації обґрунтовано актуальність обраної теми, визначено мету й завдання дослідження, окреслено об'єкт і предмет дослідження. Зазначено які методи дослідження застосовані при виконанні роботи. Підкреслено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Показаний особистий внесок здобувача, надані відомості про апробацію результатів дисертації та публікації де висвітлено результати дисертаційної роботи.

Перший розділ дисертації присвячений аналізу стану питання щодо методів поверхневого зміцнення. Детально розглянуті термічні, хіміко-термічні методи поверхневого зміцнення. Також розглянуті окремі аспекти фрикційного зміцнення, формування покриттів та інші методи зміцнення поверхні. Проаналізовані дані показують, що існує потреба в методах додаткового зміцнення поверхні, таких як, наприклад, метод фрикційно-деформаційного зміцнення, який дає змогу додатково зміцнювати вже попередньо зміцнені (наприклад термічним шляхом) сталі та є актуальним і перспективним.

У другому розділі представлені матеріали та методика проведення дослідження. В якості матеріалів для виготовлення зразків була обрана лінійка (ряд) вуглецевих сталей та низьколегована сталь 65Г. Розглянута методика додаткового фрикційно-деформаційного зміцнення, представлено обладнання, яке використовується для забезпечення процесуДФДЗ. Описано методику

металографічного аналізу, який був проведений за допомогою металографічних мікроскопів: оптичного МІМ-7 та цифрового мікроскопу ZEISS AXIO Vert. A1 та електронного мікроскопу «ПЕМ-100» в перерізах зразків, що досліджували. Детально розглянута методика інструментального індентування (наноіндентування), яке, станом на сьогодні, є одним із найсучасніших прецизійних методів визначення окремих механічних характеристик тонких шарів та покриттів. Індентування здійснювалось з використанням приладу «Нано скан 4D» в усіх ділянках перерізів зразків, де відбулись певні структурні перетворення. Окрім того, розглянуто методику випробувань зміцненої поверхні на тертя та зношування і методику визначення шорсткості при дослідженні якості поверхні, що проводили до та після випробувань на тертя та зношування. При дослідженні зносостійкості зразків застосовано машину для випробувань на тертя та зношування СМЦ-2. Проведено порівняльний аналіз отриманих даних щодо зносостійкості зазначених зразків.

У третьому розділі розглянуті основні види термічних операцій та аспекти попереднього термічного оброблення зразків. Наведені результати дослідження структурних перетворень, що відбуваються в сталях в процесі основного термічного та додаткового фрикційно-деформаційного зміцнення. Представлені мікроструктури досліджених зразків із сталей марок: Сталь 20, 45, У7, У12 після ДФДЗ з метою виявлення різниці в структуроутворенні внаслідок збільшення вмісту вуглецю та марок: Сталь 65Г, У8А в контексті ДФДЗ, як матеріалів конкретних виробів.

У четвертому розділі представлено результати дослідження змін механічних характеристик, які відбуваються в поверхневому та підповерхневому шарах попередньо термічно зміцнених сталей в процесі додаткового фрикційно-деформаційного зміцнення зразків. Показано зміну мікротвердості в перерізах зразків з використанням приладу ПМТ-3, показано зміну інструментальної твердості в перерізах зразків з використанням приладу «Нано-скан 4D». Визначено модуль Юнга та його зміну в різних шарах при дослідженні перерізів зразків. Проаналізовано вплив ДФДЗ на зміну механічних властивостей матеріалів, а особливо, зміну мікротвердості, інструментальної твердості (нанотвердості) у співвідношенні з модулем нормальної пружності (модулем Юнга).

У п'ятому розділі надано результати визначення зносостійкості поверхні, як

результат трибологічних змін в сталі, які викликані дією додаткового фрикційно-деформаційного зміцнення поверхневих шарів виробів. Зносостійкість додатково зміцненої поверхні було визначено із застосуванням методу штучних баз за стандартною методикою, з використанням твердоміру типу ТП (Віккерс), а в якості зразка була застосована попередньо термічно зміцнена колодка із сталі 65Г після ДФДЗ. Випробування на зношування, з використанням машини СМЦ-2, проводили за схемою «диск-колодка». Також визначали рівень шорсткості при дослідженні якості поверхні, що проводили до та після випробувань на тертя та зношування.

Шостий розділ присвячений визначенню очікуваного економічного ефекту від потенційного виготовлення та зміцнення циклювальних ножів із сталі 65Г.

У висновках представлено основні результати наукової роботи щодо вирішення поставлених наукових задач дослідження.

Анотація відображає основний зміст дисертації та достатньо повно розкриває наукові результати та практичну цінність роботи.

#### **Академічна доброчесність**

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено.

Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих роботах. У роботах, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків.

#### **По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:**

Попри загалом позитивну оцінку дисертаційного дослідження, слід відзначити наявність окремих положень, що викликають наукову дискусію, а також зауважень, які потребують уточнення, додаткового обґрунтування або розширеного аналізу. Зазначені уточнення не знижують загального рівня роботи, проте їх опрацювання сприятиме підвищенню наукової аргументованості та поглибленню результатів дослідження.

1. У якості матеріалів дослідження обрано вуглецеві сталі марок 20, 45, У7 та У12. Водночас доцільним є більш детальне обґрунтування вибору саме цих

сталей із різним вмістом вуглецю, особливо з урахуванням того, що леговані сталі не були достатньо охоплені дослідженням. Слід зазначити, що легувальні елементи істотно впливають на характер структурних перетворень і механізми зміцнення під час фрикційно-деформаційного оброблення. Залучення легованих сталей могло б поглибити результати дослідження та підвищити його прикладну значущість.

2. На графіку, наведеному на рисунку 2.8, слід позначити критичні точки для відповідної марки сталі, що дозволило б аналізувати фазові перетворення, які відбуваються в процесі термічного оброблення.

3. На рисунку 3.1 подано діаграму стану, на якій структурні складові підписані англійською мовою. Оскільки дисертація написана українською, доцільніше було б позначити ці складові українською мовою для зручності сприйняття матеріалу.

4. У роботі доцільно детальніше розкрити, як саме проводилася обробка експериментальних даних під час вимірювання інструментальної твердості за допомогою приладу Nano Scan 4D.

5. У роботі зазначено, що важливим аспектом є можливість проведення фрикційно-деформаційного зміцнення за наявності залишкового аустеніту в структурі сталі після гартування. Проте це твердження потребує додаткового обґрунтування з урахуванням впливу залишкового аустеніту на пластичність, стабільність структури та механізми зміцнення в умовах локалізованої пластичної деформації. Доцільним було б також навести відповідні літературні джерела.

6. У роботі згадується доцільність фрикційно-деформаційного зміцнення не лише у випадку наявності залишкового аустеніту, а й за його відсутності – при переважанні цементитної складової, яка, як відомо, має високий рівень твердості. Проте, таке твердження потребує додаткового обґрунтування, зокрема з урахуванням різних механізмів зміцнення для мартенситно-цементитної та аустенітовмісної структур. Було б доцільно розширити пояснення щодо ролі залишкового аустеніту, з огляду на його високу здатність до наклепу та зміцнення за рахунок фазових перетворень при деформуванні.

7. На рисунку 3.3 представлені мікроструктури досліджуваних зразків, однак їх якість є недостатньою для повноцінного аналізу – зображення виглядають

розмитими та недостатньо контрастними. З огляду на використання сучасного металографічного обладнання доцільно покращити якість візуалізації шляхом підвищення роздільної здатності та оптимізації параметрів зйомки.

8. В розділі 3 подані зміни будови та мікротвердості в поверхневому шарі після ДФДЗ. На мою думку, було б доцільно додатково представити графіки розподілу мікротвердості від поверхні до основи для кожної марки сталі. Такий підхід дозволив би більш детально проаналізувати вплив вмісту вуглецю на формування та властивості зміцненого «білого шару».

9. На рисунку 3.10 відсутнє зазначення масштабу збільшення мікроструктури, що ускладнює інтерпретацію результатів.

10. Формулювання щодо причин високої мікротвердості в сталі 65Г після ДФДЗ потребує уточнення (с. 106). Важливо врахувати, що крім підвищеного вмісту вуглецю, значний вплив на структуру та механічні властивості цієї сталі має марганець. В дослідженні недостатньо обґрунтований вплив легувальних елементів на структуру та властивості після ДФДЗ.

11. В роботі відсутнє пояснення методики визначення показника «Ступінь додаткового зміцнення», значення якого наведені у таблиці 4.2.

12. Яка точність вимірювання інструментальної твердості забезпечується приладом Нано-скан 4Д? Для об'єктивного оцінювання ефекту зміцнення до значень твердості, наведених у таблиці 4.6, доцільно додати інтервали невизначеності (похибки) вимірювань.

13. У роботі зазначено, що максимальний ефект ДФДЗ досягається у сталях 65Г та У7, при цьому найкращі результати за показниками мікротвердості та глибиною зміцненого «білого» шару спостерігаються на зразках сталі У7. Враховуючи це, вибір матеріалу для дослідження зносостійкості поверхні виглядає не зовсім обґрунтованим. Було б доцільно провести порівняльний аналіз двох марок сталі з метою оцінки впливу ДФДЗ на зносостійкість, що дозволило б комплексно оцінити ефективність зміцнення.

14. У роботі отримані важливі результати щодо впливу економічно ефективної технології зміцнення шляхом ДФДЗ, детально досліджені зміни в мікроструктурі, а також визначені механічні та триботехнічні властивості із

застосуванням сучасного обладнання. Водночас, відсутнє достатнє обґрунтування практичної значущості та можливостей впровадження отриманих результатів у реальні виробничі процеси.

### ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Краєвської Жанни Владиславівни «Підвищення зносостійкості поверхні при застосуванні додаткового фрикційно-деформаційного зміцнення сталей» за своїм змістом відповідає спеціальності 132 – Матеріалознавство. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу наукову задачу – удосконалення методів оброблення для підвищення зносостійкості, в результаті додаткового зміцнення під дією ДФДЗ, поверхні попередньо зміцненої термічним шляхом. Подана дисертаційна робота «Підвищення зносостійкості поверхні при застосуванні додаткового фрикційно-деформаційного зміцнення сталей» Краєвської Ж.В. відповідає спеціальності 132 – «Матеріалознавство», відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме вимогам пунктів 6, 7, 8 і 9 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44, а здобувачка Краєвська Жанна Владиславівна заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – Матеріалознавство.

Офіційний опонент

Завідувачка кафедри прикладного  
матеріалознавства і технологій  
конструкційних матеріалів, Сумський  
д.т.н., професор



*Handwritten signature of Oksana Gaponova*

Оксана ГАПОНОВА

20.06.2025

*Підпис д.т.н. професора Гапонової О.О.  
Завідувачка*

*Виконаний секретар* *Handwritten signature* *А. Рудков*