

## РЕЦЕНЗІЯ

рецензента, к.т.н., доцента Стрельчука Р.М.  
на дисертаційну роботу Приходька Вадима Олександровича  
«Технологічне забезпечення шорсткості поверхні нержавіючої сталі  
короткоімпульсним лазерним випромінюванням»  
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 131 – Прикладна механіка

### **1. Актуальність теми та зв'язок з науковими планами і програмами**

Актуальність теми є безсумнівною з огляду на сучасні тенденції в машинобудуванні, які спрямовані на підвищення точності та якості обробки поверхонь. Використання нано-, піко- і фемтосекундних лазерів для структурування поверхонь відкриває нові можливості для досягнення високих стандартів світловідбивальних властивостей деталей машин, що є надзвичайно важливим у ряді галузей промисловості. Впровадження лазерного модифікування забезпечує досягнення таких поверхневих властивостей, які недосяжні іншими механічними і електрофізичними методами обробки, що підтверджує актуальність обраної теми дослідження.

Особливий інтерес представляє обробка нержавіючих сталей аустенітного класу, зокрема, сталі AISI 321. Ця сталь відзначається своїми поліпшеними фізико-механічними властивостями завдяки низькому вмісту вуглецю та наявності легуючих елементів, таких як хром, нікель та титан. Наявність титану значно підвищує стійкість до агресивних середовищ та зносостійкість, що є важливим для деталей, які працюють в екстремальних умовах. Технологія модифікації поверхні наноімпульсним лазерним випромінюванням AISI 321 є перспективним напрямком для забезпечення необхідних гідрофобних, гідрофільних, адгезійних та трибологічних характеристик. Це дозволяє задовольнити різні, а часом і суперечливі вимоги до властивостей поверхні в залежності від сфери застосування, особливо в контексті контролю шорсткості поверхні, що впливає на світлорозсіювання та світловідбиття.

Отже, вдосконалення технологічних основ формування шорсткості поверхні за допомогою нанолазерного структурування сталі AISI 321 є актуальною науковою задачею. Розв'язання цієї задачі не лише підвищить експлуатаційні характеристики деталей, але й сприятиме розвитку нових технологічних процесів у машинобудуванні, що підтверджує наукову та практичну цінність обраного напрямку дослідження.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дослідження, виконані в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт НТУ «ХП», на кафедрі технології машинобудування та металорізальних верстатів, а також на кафедрі турбінобудування, мають значну наукову та практичну цінність. Зокрема, робота над проектом «Формування і трансформація періодичних нановуглецевовмісних структур на поверхні металів короткоімпульсними лазерними, мікрохвильовими і плазмовими методами» (ДР№0124U000481) спрямована на дослідження нових технологічних процесів для модифікації поверхонь металів. Здобувач, будучи співвиконавцем окремих розділів, зробив вагомий внесок у дослідження, що відзначається високою науковою якістю та інноваційністю підходів.

Особливо варто відзначити інтеграцію сучасних методів, таких як короткоімпульсне лазерне, мікрохвильове та плазмове оброблення, для формування наноструктур на поверхні металів. Це дозволяє досягти унікальних поверхневих характеристик, які не можуть бути отримані традиційними методами обробки. Результати дослідження сприяють розвитку нових технологій, що можуть бути застосовані в різних галузях машинобудування.

Крім того, участь здобувача в проекті «Розробка методології оптимального проектування та виготовлення високоефективних, високонадійних турбомашин з врахуванням різних режимів роботи» (ДР№0121U107511) є свідченням його високого рівня компетентності та здатності до міждисциплінарного підходу. Робота над цим проектом включала розробку методології для проектування та виготовлення

турбомашин, що є критично важливими для підвищення їх ефективності та надійності.

Загалом, науково-дослідна діяльність здобувача в рамках згаданих проектів підтверджує його високий професійний рівень та внесок у розвиток сучасних технологій машинобудування. Проведені дослідження відзначаються високою актуальністю, інноваційністю, що робить їх важливими для подальшого розвитку галузі машинобудування.

## **2. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтовності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації**

Дисертаційна робота, присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі щодо зменшення помітності виробів з нержавіючої сталі, є високоякісним науковим дослідженням, яке має значну теоретичну та практичну цінність.

*Об'єктом дослідження* є процес формування періодичних і ймовірнісних 3D структур при лазерній модифікації поверхні сталі. Предмет дослідження включає закономірності формування цих структур на аустенітній хромонікелевій сталі AISI 321 та їх здатність розсіювати світло. Мета роботи – забезпечити контрольовану шорсткість поверхні сталі AISI 321 для покращення її світловідбивальних характеристик шляхом створення 3D структур за допомогою короткоімпульсного лазерного випромінювання.

*У першому розділі* здійснено ґрунтовний аналіз науково-технічних завдань, пов'язаних з формуванням шорсткості поверхні нержавіючої сталі короткоімпульсним лазерним випромінюванням. Автором було сформульовано основну наукову проблему та обґрунтовано вибір методів для подальших досліджень. Це є вагомим внеском у розуміння проблеми та підходів до її вирішення.

*У другому розділі* наведено опис технологічного обладнання для модифікації поверхні наносекундними лазерними імпульсами. Детальне висвітлення технологічного процесу дозволяє чітко зрозуміти методи та засоби, використані для досягнення поставлених завдань.

*Третій розділ* присвячено математичному моделюванню процесу взаємодії лазерного променя з оброблюваним матеріалом. Побудовані скінчено-елементні моделі забезпечили науково обґрунтоване підґрунтя для вибору раціональних технологічних параметрів лазерного опромінення.

*У четвертому розділі* виконано експериментальні дослідження модифікації поверхні сталі AISI 321 наносекундним лазерним випромінюванням. Аналіз результатів, отриманих за допомогою цифрового оптичного мікроскопу, підтвердив наявність періодичних структур та ефективність обраних режимів обробки.

*П'ятий розділ* фокусується на аналізі параметрів шорсткості та твердості оброблених зразків сталі. Використання різноманітних методів дослідження, включаючи атомно-силову мікроскопію та вимірювання твердості за Віккерсом, дозволило отримати комплексну характеристику змін поверхневих властивостей після лазерної обробки.

*У шостому розділі* розглянуто проблему розсіювання лазерного випромінювання та запропоновано метод контролю періодичних 3D структур. Експериментальні дослідження розсіювання лазерного випромінювання підтвердили доцільність та ефективність використання нових підходів до контролю якості поверхні.

*Висновки*, сформульовані в роботі, достатньо висвітлюють результати проведеного дослідження і уявляють собою результат вирішення висунутих в дисертації завдань. В цілому висновки відповідають вимогам, які висуваються до результатів дисертаційного дослідження на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

*Список літератури* (202 джерела) досить широко охоплює предметне поле дослідження, відображає опрацювання автором значної кількості джерел технологічного змісту, в тому числі вітчизняні, а також іноземні джерела.

*Додатки* містять дані про практичне впровадження результатів дисертації.

Дисертаційна робота має високий науковий рівень та добре структурована. Автором проведено глибокі теоретичні та експериментальні дослідження, результати яких мають важливе значення для розвитку технологій обробки поверхонь матеріалів. Запропоновані методи та підходи до формування 3D структур на поверхні сталі AISI 321 відкривають нові перспективи для підвищення ефективності та надійності машинобудівних виробів.

### **3. Наукова новизна одержаних результатів**

Наукова новизна проведеного дослідження полягає в розроблених науково-методичних рекомендаціях, спрямованих на вдосконалення процесів створення 3D вірогідних та періодичних мікро- і наноструктур на поверхні аустенітної хромонікелевої сталі AISI 321 наносекундним лазерним випромінюванням:

1. Отримала подальший розвиток модель лазерного впливу на поверхню нержавіючої сталі з урахуванням процесу сканування у продольному та поперечному напрямку.

2. Показано, що при використанні наносекундного лазерного випромінювання створюються періодичні і вірогідні 3D структури, формування яких залежить від властивостей матеріалу, параметрів лазерного променя та стратегії сканування.

3. Встановлено, що на поверхні сталі при низькій інтенсивності лазерного опромінення формуються тільки вірогідні 3D структури, а зі збільшенням інтенсивності лазерного випромінювання поверхневі структури трансформуються в періодичні 3D структури, які мають мікро- та нанорозміри.

4. Вперше визначені умови створення 3D структур, коли у спектрі інтерференційних структур виявляються лише періодичні структури.

5. Вперше визначені умови та створені багаторівневі лінійні 3D структури, що забезпечують повне розсіювання ковзного лазерного випромінювання. Визначено, що основну роль у розсіюванні відіграють глибина і форма западин.

Мета дослідження – технологічне забезпечення шорсткості поверхні аустенітної хромонікелевої сталі AISI 321 шляхом її модифікації для забезпечення світловідбивальних характеристик на основі створення 3D вірогідних та періодичних мікро- і наноструктур короткоімпульсним лазерним випромінюванням – досягнута.

#### **4. Достовірність отриманих результатів та висновків**

Достовірність отриманих результатів обумовлено коректно поставленими метою та завданнями, а також використанням відповідної сучасної методології дослідження. Крім того, достовірність заявлених положень обґрунтовується комплексним підходом до вивчення визначеного об'єкта, тобто базується на низці певних сучасних методів, які були використані в процесі дослідження.

#### **5. Практична цінність одержаних результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання**

Практичне значення одержаних результатів має суттєве значення і може бути корисним в різних аспектах галузі машинобудування:

Технологічні параметри та режими наносекундного лазерного оброблення. Отримані результати щодо технологічних параметрів і режимів для створення на поверхні нержавіючої сталі AISI 321 періодичних і вірогідних 3D структур є важливим внеском у розвиток лазерних технологій обробки. Це дозволяє значно підвищити ефективність обробки та якість отриманих поверхонь, що є актуальним для виготовлення високоточних деталей.

Розподіл параметрів шорсткості після модифікації поверхні. Одержані конкретні значення розподілу параметрів шорсткості на основі дослідження комплексу параметрів ( $S_a, S_q, S_p, S_v, S_z, S_{10_z}, S_{sk}, S_{ku}, S_{dq}, S_{dr}, FLT_t, R_a, R_q, R_z, S_k, S_{pk}, S_{vk}, S_{mr1}, S_{mr2}, V_{mp}, V_{mc}, V_{vc}, V_{vv}$ ) надають детальну інформацію про стан поверхні після лазерної обробки. Це сприяє оптимізації технологічних процесів і покращенню характеристик виробів.

Зміни твердості поверхні. Визначені показники зміни твердості поверхні, що відбуваються одночасно з формуванням шорсткості, мають

значне значення для вирішення проблем тертя. Комплекс досліджень шорсткості та твердості може бути корисним при розробці нових матеріалів і технологій для підвищення зносостійкості і довговічності деталей.

Метод контролю періодичних структур. Запропонований та реалізований метод контролю періодичних структур за допомогою ковзного променя гелій-неонового лазера є інноваційним підходом для забезпечення якості оброблених поверхонь. Створений експериментальний стенд для дослідження розсіювання лазерного випромінювання дозволяє проводити точний контроль і діагностику отриманих структур.

Впровадження результатів роботи. Впровадження результатів роботи у виробничу практику ТОВ «Технополіс машинобудування» (м. Харків) та в навчальний процес кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів НТУ «ХП» свідчить про високу практичну цінність дослідження. Використання результатів у навчальних курсах («Сучасні технології в прикладній механіці», «Спеціальні енергоефективні технології», «Основи наукових досліджень», «Експериментальні дослідження», «Обробка результатів експериментів») сприяє підготовці висококваліфікованих спеціалістів у галузі машинобудування.

## **6. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладення наукових положень та результатів в опублікованих працях**

Дисертація виконана з дотриманням вимог академічної доброчесності, отримані результати дають підстави говорити про оригінальність роботи. У тексті містяться авторські ідеї, і не виявлено використання ідей інших науковців без посилання на їх роботи.

Основні ідеї автора та результати дослідження викладено у 4 (чотирьох) статтях, включених до міжнародної наукометричної бази Scopus, також дисертант активно приймав участь в 6 (шести) міжнародних науково-практичних конференціях.

## **7. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи**

1. Для підсилення аналітичної складової розділу 1 доцільно було б додати такі критичні зауваження та порівняння, наприклад: оцінка застосовності різних числових моделей для різних режимів лазерної обробки, порівняння результативності різних стратегій лазерного сканування в плані формування текстур та ЛППС, виявлення суперечностей у поясненні механізмів структуроутворення за різними джерелами, окреслення невирішених питань та відкритих проблем у дослідженні процесів лазерного руйнування металів, критичний аналіз обмежень і недоліків методик та підходів, застосованих в різних проаналізованих працях. Саме такий більш критичний та аналітичний підхід до огляду літератури в розділі 1 з виявленням невирішених питань та суперечностей між різними джерелами зробив би цей огляд більш змістовним та корисним для подальших досліджень.

2. Теоретичні викладки механізмів утворення періодичних структур: у підрозділі 3.1 досить докладно описані фізичні процеси взаємодії лазера з поверхнею металу – нагрівання, плавлення, випаровування тощо. Однак механізми утворення саме періодичних структур, що спостерігалися в експерименті, розкриті недостатньо. Варто було б детальніше зупинитися на теоретичному поясненні походження періодичності, можливо залучити додаткові літературні джерела з цієї тематики.

3. Пояснення припущень математичної моделі: у підрозділі 3.2 представлена система диференціальних рівнянь математичної моделі. Однак не вказано, які припущення та спрощення були зроблені при її побудові. Також не деталізовано, які саме граничні та початкові умови використовувались для розв'язання цієї системи рівнянь. Це важливо для коректної інтерпретації результатів моделювання.

4. Поглиблена інтерпретація результатів у розділі 4.2: результати експериментів ілюструються якісними зображеннями та 3D профілограмами поверхні. Однак їх інтерпретація обмежується переважно якісним описом спостережуваних структур. Бажано було б більш глибоко проаналізувати утворені періодичні та випадкові структури, пов'язати їх із режимами

лазерного оброблення, можливо, залучити додатковий теоретичний базис для пояснення результатів.

5. У підрозділах 5.1 і 5.2 представлені численні параметри шорсткості ( $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ ,  $S_z$ ,  $S_{10z}$ ,  $S_{sk}$ ,  $S_{ku}$ ,  $S_{dq}$ ,  $S_{dr}$ ,  $FLT_t$ ), а також наведені результати їх вимірювань для базової необробленої поверхні та обробленої лазером поверхні в різних режимах. Однак існує недостатній зв'язок між цими числовими значеннями та візуальними змінами топографії поверхні, спостережуваними на мікрофотографіях та 3D зображеннях. Для кращої ілюстрації співвідношення між параметрами і структурою поверхні можна було б:

- наводити мікрофотографії характерних ділянок поверхні поряд з табличними даними параметрів шорсткості для цих ділянок. Це дозволило б візуально пов'язувати числові значення з реальною топографією.

- використовувати спеціальні 3D графіки, діаграми або схематичні зображення для ілюстрації того, як саме виглядатиме поверхня з певними значеннями  $S_q$ ,  $S_{sk}$ ,  $S_{ku}$  тощо. Наприклад, різні значення  $S_{sk}$  можна ілюструвати 3D моделями із спадаючими або піковими формами профілю.

- детальніше проаналізувати, як змінюються конкретні параметри шорсткості зі збільшенням потужності, швидкості чи частоти лазера, і пов'язати ці зміни з виникненням періодичних структур різного типу.

- порівняти отримані значення параметрів із типовими діапазонами для різних класів поверхневої топографії – полірованої, грубозернистої, періодичної тощо.

- обговорити фізичне походження змін певних параметрів шорсткості внаслідок лазерного впливу та процесів абляції, плавлення, окислення та ін.

Вважаю, що висвітлені зауваження не зменшують наукову новизну та практичну вагомість результатів і не впливають на оцінку дисертаційної роботи.

## 8.Висновки

Дисертаційна робота Приходька В. О. є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить науково-обґрунтовані результати, має

наукову новизну та дає перспективи подальших досліджень. Тема дослідження відповідає галузі знань 13 – «Механічна інженерія» та спеціальності 131 – «Прикладна механіка».

Отже, враховуючи актуальність теми, отримані результати та певну практичну значущість вважаю, що дисертаційна робота Приходька Вадима Олександровича «Технологічне забезпечення шорсткості поверхні нержавіючої сталі короткоімпульсним лазерним випромінюванням» відповідає вимогам 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціальної вченої ради Закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від 12.01.2022 р. № 44 та вимогам до оформлення дисертації МОН України від 12.01.2017 № 40, а сам автор, Приходько Вадим Олександрович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 131 – «Прикладна механіка».

Рецензент –

Доцент кафедри інтегрованих технологій машинобудування

Національного Технічного Університету «Харківський Політехнічний Інститут»

кандидат технічних наук, доцент



Роман СТРЕЛЬЧУК

Підпис Ю. І. Зайцев  
 ЗАСВІДЧУЮ:  
 ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР  
 НАЦІОНАЛЬНОГО-ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
 "ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"  
 "18" 06 2024

ЗАЙЦЕВ Ю. І.