

РЕЦЕНЗІЯ

рецензента, доктора технічних наук, професора

Клочка Олександра Олександровича

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

Детальний аналіз дисертаційної роботи Приходька Вадима Олександровича на тему «Технологічне забезпечення шорсткості поверхні нержавіючої сталі короткоімпульсним лазерним випромінюванням», що представлена для захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», дає змогу зробити комплексний висновок щодо її актуальності, ступеня обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, достовірності та значущості отриманих результатів, наукової новизни, теоретичної та практичної цінності, надати загальну оцінку дисертації.

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

Нержавіючі сталі, зокрема AISI 321, мають велике значення в машинобудуванні, оскільки вони широко використовуються для виготовлення обладнання, яке працює в складних умовах і потребує високоякісної поверхні. Поверхня сталі AISI 321 у стандартному стані має високу світловідбивну здатність, що ускладнює її використання для виробів, які потребують низької видимості. Одним із пріоритетних напрямків зміни світловідбивальних властивостей поверхні є її модифікація короткоімпульсним лазерним опроміненням. Звісно, що головну роль у світловідбиванні має шорсткість поверхні. Однак роботи в цьому напрямку мають дуже обмежений характер. Тому вдосконалення технологічних процесів формування шорсткості поверхні за допомогою нанолазерного структурування сталі AISI 321 для забезпечення невидимості є важливою науковою задачею, розв'язання якої є об'єктом дослідження В.О. Приходька у його дисертаційній роботі.

Ця тема є актуальною як для науки, так і для практики.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертація виконувалась відповідно до наукової програми 131 «Прикладна механіка», яка була впроваджена на кафедрі технології машинобудування та металорізальних верстатів НТУ «ХП».

Проведені дослідження тісно пов'язані з державними бюджетними темами НТУ«ХП»: кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів «Формування і трансформація періодичних нановуглецевовмісних структур на поверхні металів короткоімпульсними лазерними, мікрохвильовими і плазмовими методами» (ДР№0124U000481) та кафедри турбінобудування «Розробка методології оптимального проектування та виготовлення високоефективних, високонадійних турбомашин з врахуванням різних режимів роботи» (ДР№0121U107511)

3. Наукова новизна одержаних результатів

Дисертація містить наукову новизну, з найбільш суттєвих результатів роботи можна відзначити наступні:

- отримала подальший розвиток модель лазерного впливу на поверхню нержавіючої сталі з урахуванням процесу сканування у продольному та поперечному напрямку.
- 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.
- 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.
- вперше визначені умови створення 3D структур, коли у спектрі інтерференційних структур виявляються лише періодичні структури.

Вважаю, що робота дисертанта є внеском у формування фундаментальних знань в вирішення питань лазерного структурування поверхонь нержавіючих сталей, зокрема для зменшення світловідбивальних характеристик компонентів авіаційних агрегатів подвійного призначення та для зниження помітності металів для радарів та дальномірів у інфрачервоному діапазоні хвиль, що відповідає пріоритетній тематиці при проведенні конкурсів фундаментальних наукових досліджень відповідно до Наказу МОН України № 1104 від 07.09.2023 р. (п.3).

4. Практична цінність одержаних результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання

Дослідження має певну практичну цінність, оскільки автор запропонував і розробив метод контролю типу шорсткості поверхні шляхом використання ковзного лазерного опромінення 3D шорстких поверхонь. Суть методу полягає в об'єктивній оцінці стану поверхні за картинами інтерференційного розсіювання, як періодичних так і вірогідних 3D структур,

та інтенсивності дзеркального відображення світла. Окрім того метод дозволяє виконати суб'єктивну оцінку шорсткості на основі кольорової гами поверхні. Запропонований метод можна використовувати при аналізі поверхні під час прокатки листів нержавіючої сталі.

Результати роботи можуть бути використані при аналізі ступеня гідрофобності та гідрофільності поверхні при адсорбції вологи, підвищенні адгезійних властивостей при нанесенні покриттів та красок, при вирішенні трибологічних проблем в машинобудуванні. Результати дослідження по розсіюванню світла будуть також корисними при створенні STELS-технологій.

5. Повнота викладення матеріалів дисертації в наукових працях, які опубліковані автором. За результатами дослідження дисертаційної роботи опубліковано 10 наукових праць, з них у реферативній базі Scopus та/або Web of Science – 4, наукових праць, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації – 6. Зазначене вище дозволяє стверджувати, що представлена дисертаційна робота є самостійним, завершеним науковим дослідженням, результати якого мають науково-практичне значення для науки і техніки.

6. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації

Робота Приходька В.О. є завершеною науковою роботою, містить анотацію – українською та англійською мовами, вступ, шість розділів основної частини, висновки, список використаних джерел і 3 додатки.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі, пов'язаної із вирішенням проблем малопомітності виробів із нержавіючої сталі.

Об'єктом дослідження є процес формування періодичних та вірогідних 3D структур при модифікації поверхні сталі AISI321 лазерним випромінюванням.

У роботі створено новий технологічний процес, що дозволив зменшити світловідбивальні характеристики поверхонь деталей, виготовлених зі сталі AISI 321. В основу технологічного процесу покладено структурування поверхні наноімпульсним лазерним опроміненням з метою створення технологічних умов отримання контрольованої шорсткості поверхні із формуванням періодичних і вірогідних 3D структур.

У вступі дисертаційної роботи обґрунтована актуальність теми, приведені мета роботи, наукова новизна, обґрунтована достовірність отриманих результатів, визначена практична цінність, представлені дані про апробацію роботи, публікації та особистий внесок здобувача у ході виконання дослідження.

В подальшому для досягнення поставленої мети дисертаційного дослідження розгалужені необхідні адекватні математичні моделі процесу взаємодії лазерного променя з оброблюваним матеріалом. Комп'ютерне дослідження нагрівання та руйнування поверхні виконане на основі побудованих скінчено-елементних моделей, що стали передумовою отримання раціональних технологічних параметрів лазерного опромінення для мікроструктурування поверхонь з різною шорсткістю та періодичністю профілю створених мікроструктур.

Для емпіричного дослідження впливу процесу лазерного наносекундного опромінення на характер руйнування оброблюваного матеріалу зразка зі сталі AISI321 розміром 35x75x1 мм, виконано чисельну кількість експериментів із лазерним скануванням з різними технологічними режимами та за строковою стратегією.

На першому етапі практичних досліджень процесу наносекундного лазерного опромінення автором було оброблено 11 позицій сталевого зразка строковим скануванням з кроком 25мкм та із змінними параметрами швидкості сканування, частоти лазерних імпульсів та потужності лазера. Із аналізу результатів дослідження поверхонь зразків, що виконували із застосуванням цифрового оптичного мікроскопу KEYENCE VHX 7100, були виділені найбільш характерні режими для формування періодичних 3D структур. Встановлено, що періодичні структури при раціональних режимах оброблення зразку характеризуються симбіозом кратерів і кілець кратерів, що підтвердило результати моделювання методами скінчених елементів.

Наступним етапом дисертаційного дослідження стало виконання експерименту відповідно до визначеного діапазону існування технологічних режимів формування поверхневих 3D мікро- і наноструктур. В цьому дослідженні було реалізовано 4 варіанти створення періодичних і вірогідних 3D структур, формування характеристик яких забезпечували параметрами лазерного променя.

Подальші дослідження фокусувалися на аналізі шорсткості оброблених зразків сталі AISI 321, що базувалися на декількох взаємодоповнюючих методах із використанням сучасних цифрових оптичних мікроскопів та атомно-силової мікроскопії. Важливою складовою відповідного комплексу досліджень стало виконання дослідження шорсткості у двох напрямках – вдовж ліній сканування лазерного променя, та впоперек ліній сканування. Підкреслено, що визначення точних значень параметрів шорсткості поверхні після лазерної модифікації є доволі складним процесом. Це в свою чергу обумовлено комплексом особливостей руйнувань поверхні. Встановлено явне посилення змін у структурі поверхні з підвищенням рівня потужності лазерного випромінювання, що характеризуються появою періодичності

поверхневих 3D структур. Періодичність структури підтверджується параметрами текстури поверхні S_{sk} і S_{ku} .

Встановлено, що за низької інтенсивності лазерного випромінювання на поверхні формується шорсткість з імовірнісним (випадковим) розподілом амплітуд і 3D форм створюваних структур. Збільшення інтенсивності лазерного опромінення впливає на розвиток рельєфу профілю, збільшення рівня періодичності структури обробленого зразка, формування мікро- і нано- лазерно-індукованих періодичних структур, що підтверджено на ділянках експериментального зразка сталі AISI321, де також відзначений значний вплив напрямку сканування лазерного променя на залежність параметрів R_a , R_q і R_z .

Встановлено, що більш високі значення контрольованих параметрів спостерігаються на поверхні при вимірюванні профілю за напрямком X, що відповідає напрямку сканування лазерного променя. Таким чином обґрунтовано, що модифікація поверхні пов'язана не тільки з інтенсивністю процесу опромінення, а й з напрямком сканування лазерним променем, що підтверджено величиною ексцесу - S_{ku} . Зазначено, що лазерне випромінювання дає змогу змінювати ступінь зсуву форми шорсткості та ексцес, що є принципово важливим при розгляді процесів поглинання і розсіювання електромагнітних хвиль модифікованою поверхнею.

Підкреслено, що запропоновані режими лазерного наноімпульсного оброблення сталевого зразка дозволили отримати поверхні із збільшеною площею (S_{dr}), що має перспективу застосування при розгляді процесів адсорбції. Анізотропія шорсткості наноструктурованої поверхні вздовж ліній сканування лазерного променя може бути використана при вирішенні питань трибології.

Отримані, за результатами експериментальних досліджень шорсткості оброблених зразків, дані оброблено за методиками теорії вірогідності і побудовано діаграми нормального розподілу.

Зроблено висновок, що наносекундний лазерний промінь є унікальним технологічним інструментом. Результат AFM аналізу дозволив стверджувати про можливість створення практично усіх головних типів 3D структур поверхні: вірогідна, квазівірогідна, квазіперіодична та періодична. Відзначено, що детальна конструкція поверхневих 3D структур може включати окремо мікрорівень, нанорівень так і взаємну їх інтеграцію. Доведено наявність області існування технологічних параметрів лазерного випромінювання для створення дворівневих та багаторівневих поверхневих 3D структур.

На подальшому етапі дисертаційного дослідження було вивчено вплив технологічних параметрів короткоімпульсного наносекундного оброблення

на показники твердості модифікованих поверхонь, що обумовлено перетвореннями фізико-хімічних властивостей в поверхневому шарі обробленого матеріалу під впливом швидкоплинних термічних процесів. Дослідження велись з використанням твердоміри за Віккерсом фірми Zwick Roell.

Висловлено припущення, що за малої інтенсивності лазерного випромінювання, процеси, що мають місце в поверхневому шарі оброблюваного матеріалу, напевне, відповідають характеру традиційного нагрівання-охолодження. Однак при досягненні відповідних критичних умов опромінення (потужності опромінення, швидкості нагрівання та охолодження, градієнту деформації тощо) відбувається лазерне зміцнення аустенітної сталі із підвищенням твердості, тобто, загартування. В основі механізму підвищення твердості лежать процеси часткового перетворення аустеніту в мартенсит та утворення твердих карбідів і окислів в поверхневому шарі обробленого металу.

Експериментально підтверджено, що при багаторазовому короткочасному накладанні теплових плям, що неодноразово перетинають одна одну, виникає збільшення теплової деформації матеріалу, і, як результат, в поверхневому шарі формуються більш міцні кристалічні структури – мартенсит, карбіди та окиси металів.

На заключному етапі представленого дослідження вирішувалась задача забезпечення контролю наявності поверхневих 3D структур при виробництві деталей машин і агрегатів. Було запропоновано і апробовано метод контролю періодичних 3D структур поверхні шляхом використання ковзного лазерного опромінення 3D шорстких поверхонь гелій-неоновим лазером. Суть методу полягає в об'єктивній оцінці стану поверхні за картинами інтерференційного розсіювання, як періодичних так і вірогідних 3D структур, та інтенсивності дзеркального відображення світла. Дослідження розсіювання лазерного випромінювання виконували на спеціально створеному експериментальному стенді.

Встановлено, що 3D структури лазерномодифікованої поверхні мають зазвичай багаторівневий характер, що залежить від технологічних параметрів обробки лазером. Визначено, що розсіювання лазерного випромінювання найбільше залежить від параметрів нахилу 3D структур, округлення піків і параметрів западин. Доведено, що для кількісної оцінки параметрів розсіювання є недостатнім використання трьох традиційних параметрів шорсткості R_a , R_z , R_q . Необхідно проводити комплексний аналіз поверхні згідно зі стандартом ISO 2518, що і було виконано у даній роботі. За результатами чисельних експериментів з розсіювання гелій-неонового променя відбитого від різних областей обробленого зразка сталі AISI 321

вдалося визначити умови створення 3D структур, за умови, коли у спектрі інтерференційних структур виявляються лише періодичні структури. До основних результатів розділу також належить визначення умови та безпосереднє створення 3D структури, що забезпечує повне розсіювання лазерного випромінювання, що падає на її поверхню.

Висновки, сформульовані у роботі, висвітлюють результати дослідження як вирішення висунутих в дисертації завдань. В цілому висновки відповідають вимогам, які висуваються до результатів дисертаційного дослідження на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Список літератури досить широко охоплює предметне поле дослідження, певною мірою відображає опрацювання автором значної кількості джерел технічного змісту (в тому числі вітчизняні), а також іноземних джерел.

Додатки містять інформацію про практичне впровадження результатів дисертації.

7. Достовірність отриманих результатів та висновків

Достовірність результатів дисертації забезпечена застосуванням загально визнаних означень шуканих величин в прикладній механіці і нанотехнологіях, підтвердженням правильності отриманих аналітично результатів за допомогою чисельних методів, порівнянням і зв'язком з результатами інших авторів, одержаними в граничних випадках. Представлені результати є достатньо переконливими, науково обґрунтованими, а їхній аналіз проведений з урахуванням останніх даних фахової наукової літератури. Додатковим підтвердженням достовірності наукових результатів слугують рецензовані публікації автора та представлення отриманих результатів на наукових конференціях.

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

Дисертація виконана з дотримання 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 чотирьох наукових статтях, що індексуються наукометричними базами Scopus та/ або Web of Science, а також дисертант активно приймав участь в українських та закордонних конференціях, де було проведено апробацію ідей, що викладено у дисертаційному дослідженні.

9. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. Оцінка похибок експериментальних вимірювань: у підрозділі 4.1 детально описана методика експерименту, але відсутні кількісні оцінки похибок при вимірюванні різних параметрів – товщини зразків, потужності лазера, шорсткості поверхні тощо. Бажано було б навести методику оцінки похибок та числові значення похибок для різних параметрів.

2. У роботі отримано технологічні режими оброблення для створення 3д структур. Однак потужність лазерного випромінювання приведена в процентному вигляді в залежності від максимальної потужності лазера. Бажано було привести ці параметри також у розмірності характерної для інтенсивності імпульсного лазерного випромінювання.

3. У роботі проведено вимірювання твердості поверхні, але наведено значення навантаження на індентор.

10. Висновки

Дисертаційна робота Приходька В.О. є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить науково-обгрунтовані 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 – доктор технічних наук, професор
завідувач кафедри інтегрованих
технологій машинобудування
Національного Технічного Університету
«Харківський Політехнічний Інститут»
26.06.2024

Олександр КЛОЧКО

