

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
ЛАЗЕРНА ОБРОБКА ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

(тема)

Виконав:

здобувач 4 року навчання,
групи МТЮЛС-21-1

Михайло СТЕПАНЕНКО

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 152 Метрологія та
інформаційно-вимірвальна техніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Інженерія
оптоінформаційних та лазерних систем»

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. ФОЕТ Ольга АФАНАСЬЄВА

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ФОЕТ

(підпис)

Олександр ГНАТЕНКО

(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____

Кафедра _____ Фізичних основ електронної техніки _____

Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

Спеціальність _____ 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____

Освітня програма _____ «Інженерія оптоінформаційних та лазерних систем» _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Степаненку Михайлу Євгеновичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Лазерна обробка інструментальних матеріалів _____

затверджена наказом університету від « 23 » _____ травня _____ 2025 р. № 408 Ст _____

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії _____ 23 червня _____ 2025 р. _____

3. Вихідні дані до роботи: вуглецеві та швидкорізальні інструментальні сталі; тверді і надтверді матеріали для обробки різанням; Nd:YAG, ексимерні, волоконні лазери; мікротвердість _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: _____

1 Аналіз характеристик і принципів роботи інструментальних матеріалів. _____

2 Підвищення експлуатаційних характеристик інструменту. 3 Види лазерів, що _____

використовуються для обробки інструменту. 4 Поверхнева обробка інструментальних _____

матеріалів. 5 Текстури поверхні ріжучого інструменту. 6 Лазерне термічне зміцнення _____

інструментальних сталей. 6 Дослідження режимів багатоімпульсного лазерного _____

термоzmіцнення сталі. 7 Висновки. _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій.

Демонстраційний матеріал – 11 слайдів.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про лазерну обробку інструментальних матеріалів	06.05.25–13.05.25	Виконано
2	Дослідження лазерної обробки інструментальних матеріалів	14.05.25–20.05.25	Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків характеристик лазерної обробки інструментальних матеріалів	21.05.25–25.05.25	Виконано
4	Аналіз розрахунків та параметрів лазерної обробки інструментальних матеріалів	26.05.25–30.05.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	31.05.25–10.06.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	11.06.25–13.06.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	14.06.25–19.06.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	20.06.25–21.06.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	22.06.25–24.06.25	Виконано

Дата видачі завдання 05 травня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. каф. ФОЕТ Ольга АФАНАСЬВА
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 38 с., 12 рис., 1 табл.,
1 додаток, 17 джерел.

ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ СТАЛІ, КАРБІД ВОЛЬФРАМУ, ЛАЗЕРНА
МІКРООБРОБКА, ЛАЗЕРНЕ ГАРТУВАННЯ, НІТРИД БОРУ
ПОЛКРИСТАЛІЧНИЙ, ТЕКСТУРУВАННЯ ПОВЕРХНІ, ТРИВАЛІСТЬ
ІМПУЛЬСУ, ШВИДКОРІЗАЛЬНІ СТАЛІ.

Об'єкт дослідження – інструментальні матеріали для обробки різанням.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження процесів лазерної обробки інструментальних сталей та твердих і надтвердих матеріалів та аналіз можливих застосувань такої обробки в сучасних технологіях.

Методи дослідження – теоретичний та експериментальний.

Робота присвячена визначенню впливу параметрів лазерного випромінювання на проведення різних видів лазерної обробки інструментальних матеріалів.

Проаналізовано вплив довжини хвилі, типу променя, тривалості імпульсу, щільності потоку та швидкості сканування на твердість і геометричні характеристики поверхні. Виявлені напрямки подальших досліджень з метою підвищення ефективності лазерної обробки.

Результати роботи можуть бути використані у виробництві і навчальному процесі.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 38 p., 11 draw., 1 tab.,
1 addition, 17 sources.

HIGH-SPEED CUTTING STEELS, LASER HARDENING, LASER
MICROMAKING, POLYCRYSTALLINE BORON NITRIDE, PULSE
DURATION, SURFACE TEXTURING, TOOL STEELS, TUNGSTEN CARBIDE

The object of research is tool materials for cutting.

The purpose of the qualification work is to study the processes of laser processing of tool steels and hard and superhard materials and analyze possible applications of such processing in modern technologies.

Research methods are theoretical and experimental.

The work is devoted to determining the influence of laser radiation parameters on various types of laser processing of tool materials.

The influence of wavelength, beam type, pulse duration, flux density, and scan rate on the hardness and geometric characteristics of the surface was analyzed. Directions for further research were identified to improve the efficiency of laser processing.

The results of the work can be used in production and the educational process.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Аналіз характеристик і принципів роботи інструментальних матеріалів.....	8
1.1 Загальна характеристика інструментальних матеріалів	8
1.2 Підвищення експлуатаційних характеристик інструменту	13
1.3 Види лазерів, що використовуються для обробки інструменту	15
2 Поверхнева обробка інструментальних матеріалів	19
2.1 Створення поверхневих текстур.....	19
2.2 Текстури поверхні ріжучого інструменту	22
2.3 Лазерне термічне зміцнення інструментальних сталей	26
2.4 Дослідження режимів багатоімпульсного лазерного термозміцнення.....	
сталі.....	28
Висновки	35
Перелік джерел посилання	37
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	39

ВСТУП

Обробка деталей різанням полягає у видаленні із заготовівлі певного шару матеріалу, званого припуском, з метою отримання деталі заданих форми, розмірів та якості поверхні. У обробці металів різанням основну роль грає різальний інструмент. Продуктивність обробки різанням та стійкість інструменту суттєво залежать від правильного вибору марки інструментального матеріалу для виготовлення різального інструменту.

Ефективність роботи ріжучого інструменту, що визначається його працездатністю за максимально можливої стійкості, залежить від матеріалу робочої частини. Застосування того чи іншого інструментального матеріалу в конкретних виробничих умовах обумовлюється службовим призначенням ріжучого інструменту, необхідною ефективністю процесу обробки, необхідною якістю та точністю поверхонь, що обробляються, матеріалом і видом заготовок.

У сучасних виробничих умовах інтенсивність режимів різання загалом зросла від 20 до 30 разів. Це пов'язано в основному з дослідженнями в галузі інструментальних матеріалів та створенням нових високоефективних марок. Виготовлення металорізального інструменту передбачає застосування інструментальних матеріалів, що мають такі якості: твердість, що перевищує твердість оброблюваного матеріалу; менша крихкість та більша в'язкість; зносостійкість; висока теплостійкість; достатня механічна міцність.

Перелічені властивості обумовлені складними умовами роботи різальних кромки інструментів.

В даний час для виготовлення металорізальних інструментів застосовують п'ять груп інструментальних матеріалів: інструментальні сталі, тверді сплави, ріжуча кераміка, синтетичні надтверді та абразивні матеріали.

У кваліфікаційній роботі розглянуто групи інструментальних матеріалів, їх основні фізико-механічні властивості, дано характеристики та їх використання і шляхи підвищення їх експлуатаційних характеристик.

1 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК І ПРИНЦИПІВ РОБОТИ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Загальна характеристика інструментальних матеріалів

Інструментальними є матеріали, основне призначення яких – оснащення робочої частини інструментів. У зв'язку з великою кількістю матеріалів, що застосовуються для виробництва заготовок, високими вимогами до якості та точності обробки в даний час в інструментальному виробництві використовують велику кількість різних інструментальних матеріалів.

Основні властивості, якими повинен мати інструментальний матеріал, в першу чергу матеріал для ріжучих інструментів, це зносостійкість і теплостійкість.

Умови роботи інструментів залежать від режимів різання та властивостей оброблюваного матеріалу. Чим більша швидкість різання, переріз стружки, що знімається, а також міцність і в'язкість оброблюваного матеріалу, тим вище температура нагріву ріжучої кромки інструментів. За цих умов працездатність інструментів визначається високою «гарячою» твердістю та здатністю матеріалу зберігати її за тривалого нагрівання, тобто, теплостійкістю. Від теплостійкості матеріалу, таким чином, залежить продуктивність різання.

За теплостійкістю застосовувані матеріали поділяють на такі групи: вуглецеві і низьколеговані сталі (до 200 °С), високолеговані швидкорізальні сталі (від 600 °С до 640 °С), тверді сплави (від 800 °С до 1000 °С) і надтверді матеріали (до 1200 °С).

Вуглецеві сталі (У7, У8, У9, ..., У13) добре обробляються різанням і деформуються, що дозволяє застосовувати накатку, насічку та інші високопродуктивні методи виготовлення з них інструментів. Через низьку прогартовуваність (від 10 мм до 12 мм) вуглецеві сталі придатні для дрібних інструментів або інструментів з поперечним перерізом до 25 мм з

незагартованою серцевиною (рис. 1.1), в якій ріжуча частина припадає на поверхневий шар (мітчики, розгортки, напилки тощо).



Рисунок 1.1 – Різальний інструмент з вуглецевої сталі. Ілюстративне фото

Швидкорізальні сталі призначені виготовлення інструментів високої продуктивності (рис. 1.2). Основна властивість цих сталей – висока теплостійкість, яка забезпечується введенням великої кількості вольфраму спільно з іншими карбідоутворюючими елементами – молібденом, хромом, ванадієм.



Рисунок 1.2 – Інструмент з швидкорізальної сталі. Ілюстративне фото

Високі експлуатаційні властивості інструменту з швидкорізальних сталей набувають після загартування та триразового відпуску. Особливість гартування швидкорізальних сталей - висока температура нагріву, яка необхідна для забезпечення теплостійкості – одержання після гартування високолегованого мартенситу в результаті переходу в розчин максимальної кількості спеціальних карбідів.

Тверді матеріали класифікуються як матеріали з твердістю понад 15 ГПа, сюди входять карбід вольфраму (WC), нітрид титану (TiN), карбід кремнію (SiC) і борид титану (TiB₂) [1, 2]. Твердість залежить від розміру зерен і складу в'язучого [3]. До порошкових твердих сплавів відносяться матеріали, що складаються з високотвердих та тугоплавких карбідів вольфраму, титану, танталу, з'єднаних металевим зв'язуванням. Тверді сплави виготовляють порошковою технологією. Порошки карбідів змішують з порошком кобальту, що виконує роль зв'язування, пресують і спікають при температурі від 1400 °С до 1550 °С. При спіканні кобальт розчиняє частину карбідів та плавиться. В результаті виходить щільний матеріал, структура якого на 80–95 % складається з карбідних частинок, з'єднаних зв'язуванням. Збільшення вмісту зв'язки викликає зниження твердості, але підвищення міцності та в'язкості. Тверді сплави виготовляють у вигляді пластин, якими оснащують різці, свердла, фрези та інші ріжучі інструменти (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Інструмент з твердих сплавів. Ілюстративне фото

Такі інструменти поєднують високу твердість від 85 до 92 HRA (від 74 до 76 HRC) та зносостійкість із високою теплостійкістю (від 800 °C до 1000 °C). За своїми експлуатаційними властивостями вони перевершують інструменти зі швидкорізальних сталей і застосовуються для різання з високими швидкостями.

Надтверді матеріали – клас матеріалів, твердість яких перевищує 40 ГПа за шкалою твердості за Віккерсом [4, 5]; ці матеріали мають чудові властивості, включаючи високу теплопровідність (більше 800 Вт·м⁻¹К⁻¹ [6]), високу зносостійкість і хімічну стабільність. Як результат, вони використовуються в різних видах обробки. Алмаз і нітрид бору є найтвердішими серед матеріалів, з твердістю в діапазоні від 40 ГПа до 80 ГПа для полікристалічних алмазів (PCD); від 59 ГПа до 75 ГПа для алмазів із хімічним осадженням (CVD) і від 28 ГПа до 44 ГПа для полікристалічних кубічних нітридів бору (PcBN) [7]. Надтверді матеріали широко застосовують для оснащення (вставками) лезових інструментів (різці, свердла, торцеві фрези). Такі інструменти використовують для чистової розмірної обробки за високих швидкостей різання (від 100 м/хв до 200 м/хв і більше). Серед надтвердих матеріалів перше місце належить алмазу, твердість якого (10000 HV) у 6 разів перевищує твердість карбіду вольфраму (1700 HV) та у 8 разів – твердість швидкорізальної сталі (1300 HV). Переважне застосування мають синтетичні алмази (борт, баллас, карбонадо) полікристалічної будови, які в порівнянні з монокристалами відрізняються меншою крихкістю та вартістю. Алмаз теплостійкий до 800 °C (при більшому нагріванні він графітізується). Відносно невелика теплостійкість компенсується його високою теплопровідністю, що знижує розігрів ріжучої кромки інструментів при високих швидкостях різання. Область застосування алмазних інструментів обмежується високою адгезією до заліза, що є причиною його низької зносостійкості при точенні сталей та чавунів. Алмазним інструментом (рис. 1.4) обробляють кольорові метали та їх сплави, а також пластмаси, кераміку, скло, забезпечуючи при цьому низьку шорсткість поверхні.



Рисунок 1.4 – Алмазний інструмент. Ілюстративне фото

Найбільш універсальними є інструменти з полікристалічного нітриду бору BN з кубічними ґратами, званого кубічним нітридом бору. Його одержують спіканням мікропорошків нітриду бору (гексагонального, кубічного або вюрцитоподібного) при високих температурах і тисках або прямим синтезом нітриду бору з гексагональною решіткою. Залежно від технології отримання кубічний нітрид бору випускають за назвою: ельбор, ельбор-Р, боразон (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Інструмент на основі кубічного нітриду бору.

Ілюстративне фото

Кубічний нітрид бору має таку ж, як алмаз, кристалічну решітку та близькі з ним властивості. За твердістю (9000 HV) він не поступається алмазу, але перевершує його теплостійкістю (1200 °C) і хімічною інертністю. Відсутність у кубічного нітриду бору хімічної спорідненості до заліза дозволяє ефективно використовувати його для обробки різних сталей, що важко обробляються, у тому числі цементованих і загартованих (> 60 HRC). При цьому високошвидкісне точення загартованих сталей може замінити шліфування, скорочуючи у 2-3 рази час обробки та забезпечуючи низьку шорсткість поверхні.

Використання твердих і надтвердих матеріалів є затребуваним у промисловості ріжучого інструменту через їх чудові механічні та зносостійкі властивості. Інструменти, виготовлені з цих матеріалів, мають довший термін служби та покращують якість оброблених деталей.

Механічні властивості твердих і надтвердих матеріалів ускладнюють їх обробку традиційними методами. В даний час велика область досліджень зосереджена на точному різанні, індивідуальних мікроструктурних змінах, модифікаціях властивостей поверхні та текстуруванні. Ці поверхневі процеси допомагають покращити продуктивність різання за рахунок зменшення тертя, зменшення зносу, зменшення площинних напружень, покращення потоку стружки та збільшення терміну служби інструменту. Лазерна обробка, як правило, вважається ефективною та відтворюваною технікою виробництва [8, 9], яка може використовуватися для обробки поверхонь твердих і надтвердих матеріалів.

1.2 Підвищення експлуатаційних характеристик інструменту

Основним механізмом руйнування інструменту є зношування. Зносостійкість, тобто здатність матеріалу чинити опір зношуванню в першу чергу залежить від твердості матеріалу. Механізм зносу залежить від розміру текстури та матеріалу інструменту. Матеріал заготовки та сполучна речовина

також є впливовими факторами зносу; більш тверді сполучні композиції виявляють менший розпад зв'язуючого внаслідок абразивного зношування та меншу дифузію зв'язуючого до заготовки.

Підвисити твердість матеріалу за рахунок термічної обробки можливо лише для сталей. При цьому необхідно враховувати, що із зростанням твердості одночасно буду зменшуватися така дуже важлива характеристика, як ударна в'язкість. Вочевидь об'ємна термічна обробка не може додати нічого нового до вирішення цієї проблеми.

Зчеплення заготовки з інструментом також є справжньою проблемою для ріжучих інструментів у роботі, оскільки це зменшує термін служби інструменту та загальну продуктивність. Під час операцій видалення матеріалу стружка, що утворюється, часто прилипає до ріжучих інструментів. Це явище виникає, коли температура різання досягає точки розм'якшення матеріалу або прикладається достатньо висока сила, наприклад, із негативним переднім кутом. Стружка розм'якшується, стає більш пластичною та легше розтікається по інструменту. У міру твердіння стружки утворюють гострі ділянки та вторинна ріжуча кромка, що призводить до погіршення якості поверхні заготовки [10]. Адгезія значною мірою залежить від матеріалу заготовки, але текстурування поверхні інструменту із твердих та надтвердих матеріалів може зменшити її ступінь через зменшену довжину контакту. Наявність мікротекстур зменшує виникнення поверхневого зчеплення титанових та алюмінієвих сплавів і зменшує ефект борозни [8].

Інструментом для створення текстурованої поверхні може бути лазер. Лазерна мікрообробка ріжучих інструментів зазвичай передбачає створення поверхневих елементів для покращення продуктивності різання.

1.3 Види лазерів, що використовуються для обробки інструменту

Вибір лазера для проведення певного виду обробки визначається специфікою впливу лазерного випромінювання на даний матеріал і особливостями поставленого технологічного завдання. Основними параметрами, що характеризують лазерне випромінювання, є потужність, довжина хвилі і тривалість впливу випромінювання, енергія і частота проходження імпульсів, а також когерентність, спрямованість, монохроматичність і поляризація випромінювання.

Більшість лазерних технологій заснована на тепловій дії випромінювання, тобто передбачається необхідність нагрівання об'єкта впливу до заданої температури. Тому головною характеристикою лазера, що використовується в таких технологіях, є його потужність. Для імпульсних лазерів розглядають потужність в імпульсі і середню потужність, яка залежить від тривалості та частоти проходження імпульсів.

Лазерне випромінювання, падаючи на оброблювану поверхню, поглинається відповідно до експоненціального закону Бугера-Ламберта:

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x), \quad (1.1)$$

де $I(x)$ – інтенсивність лазерного випромінювання, що проникає в матеріал на глибину x ;

I_0 – інтенсивність падаючого на об'єкт лазерного випромінювання (для спрощення внесок відбиття не враховується).

Тепло, що при цьому виділилось, поширюється в глиб матеріалу за рахунок теплопровідності.

Температура T , до якої нагрівається об'єкт впливу, визначається щільністю поглиненої потужності випромінювання q , яка залежить від потужності випромінювання P_0 , її розподілу за опромінюваною поверхнею і поглинальної здатності об'єкта A . Зокрема, при рівномірному розподілі щільності потужності в межах опроміненої зони дорівнюють:

$$q = \frac{P_0 A}{S}, \quad (1.2)$$

де S – площа опроміненої зони на оброблюваній поверхні.

Довжину хвилі лазерного випромінювання вибирають таким чином, щоб забезпечити максимальне його поглинання речовиною. Наприклад, для обробки металів використовують випромінювання видимого та ближнього інфрачервоного діапазону, скла – середнього ІЧ-діапазону та ін.

Для обробки інструменту в промисловості використовуються різні види лазерів, кожен із яких має свої переваги залежно від матеріалу та типу обробки (різання, гравірування, зварювання, загартування тощо). Найпоширенішими лазерами для обробки твердих і надтвердих матеріалів є твердотільний (в першу чергу Nd-лазер), ексимерний і волоконний лазери, а також титан-сапфіровий лазер (Ti:Sapphire лазер, Ti:Sa), що успішно застосовується для обробки твердих матеріалів (WC, TiC і TiN, промисловий алмаз) [11].

Твердотільні лазери можуть працювати в імпульсному режимі, що корисно для тонкої точкової обробки.

Неодимові (Nd) лазери є лазерами ближнього інфрачервоного (ІЧ) діапазону і можуть легко створювати елементи розміром 20 мкм. Існує три основних типи лазерів Nd: Nd:YAG, Nd:YLF і Nd:YVO₄. Довжини хвиль незначно змінюються від 1064 нм до 1047 нм відповідно. Nd:YAG має більш стабільний показник заломлення. Nd:YVO₄ можна імпульсувати з високою частотою повторення, але це призводить до меншої енергії на імпульс. Порівняння впливу різних Nd-лазерів на цілісність поверхні оброблюваних матеріалів [12] виявило, що мікроструктурне пошкодження сильно залежить від використовуваного Nd-лазера.

Ексимерні лазери мають високу енергію імпульсу, ідеальну для абляції в УФ-діапазоні довжин хвиль (від 193 нм до 355 нм). Частота повторення обмежена лише парою кілогерц. Для створення ексимерного лазера потрібен аргон. Цей газ потрібно контролювати; оскільки він старіє з використанням, він змінює однорідність променя [12].

З 1980-х років використання волоконних лазерів випередило CO₂-лазер, причому понад 60 % машин для лазерного різання були волоконними лазерами [13]. Волоконні лазери надійні, мають високу пікову потужність і гарну оптичну якість. Вони також можуть бути модифіковані, щоб мати різні профілі променя та підтримувати високий розподіл потужності [11]. підходять для точної та швидкої обробки металевих інструментів (різання, гравірування, маркування, зварювання).

Як правило, частота в діапазоні кілогерц використовується для забезпечення доставки достатньої лазерної енергії, щоб викликати абляцію [11]. Менше досліджень досліджували діапазон мегагерц (МГц) і гігагерц (ГГц) у надтвердих матеріалах. У твердих матеріалах діапазон МГц може викликати лавинну іонізацію. В роботі [14] використовували УФ-лазер з частотою 1,5 МГц для створення мікроканалів на дисках WC. Шлейфи, що утворюються під час процесу, швидко розширюються, ефективно викидаючи пару та матеріал із канавки. Профілі каналів були чистими та відповідали невеликій зоні термічного впливу (ЗТВ) та переробленому шару.

Тривалість дії випромінювання визначає температуру об'єкту, що нагрівається, темп нагрівання та охолодження, величину температурних градієнтів і розміри прогрітих шарів в матеріалі. При використанні імпульсних лазерів тривалість впливу визначається тривалістю імпульсу випромінювання τ . Тривалість дії лазерів, що працюють в безперервному режимі, залежить від швидкості сканування $V_{ск}$ лазерного пучка по поверхні матеріалу:

$$\tau = \frac{2r_0}{V_{ск}} \quad (1.3)$$

Частота проходження імпульсів визначає продуктивність обробки.

Важливою характеристикою лазерного випромінювання є ступінь його когерентності. При обробці поверхні матеріалу когерентним випромінюванням можливе формування на ній дифракційної картини, а також

періодичної поверхневої структури, що виникає при утворенні поверхневих електромагнітних хвиль. Когерентність випромінювання пов'язана із спрямованістю пучка випромінювання, його монохроматичністю і поляризацією.

Спрямованість пучка випромінювання характеризується кутом розходження пучка і просторовим розподілом інтенсивності. Розподіл інтенсивності випромінювання на вихідній апертурі лазера визначається типом використовуваного резонатора і модовим складом випромінювання.

Монохроматичність лазерного випромінювання характеризує властивість лазера випромінювати у вузькому діапазоні довжин хвиль. Ступінь монохроматичності випромінювання залежить від властивостей активного середовища і характеристик резонатора.

Основними параметрами лазерів, які визначають якість лазерної обробки, є такі: потужність випромінювання P , довжина хвилі λ , тривалість імпульсу τ , частота проходження імпульсів f , просторові характеристики модової структури випромінювання, розбіжність пучка α .

2 ПОВЕРХНЕВА ОБРОБКА ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Створення поверхневих текстур

Лазерна обробка забезпечує ефективний, безконтактний і швидкий метод створення поверхневих текстур та термічної обробки сталей, твердих і надтвердих матеріалів для ріжучих інструментів [15].

Процес створення поверхневих текстур можна описати як фототермічний, коли відбуваються нагрівання, плавлення та випаровування, що призводить до видалення матеріалу, або фотохімічний, коли відбувається розрив зв'язку з недостатнім часом для проведення зворотнього процесу в навколишній області. Фототермічні перетворення, як правило, відбуваються в умовах термодинамічної рівноваги, де передача тепла (закон Бугера-Ламберта, рівняння (1.1)) і закони механіки рідини керують поведінкою розплавленого матеріалу. Цей процес носить назву імпульсної лазерної абляції.

Імпульсна лазерна абляція (ІЛА, PLA) – це поширений лазерний метод, який використовується для створення геометрії поверхні на ряді матеріалів, включаючи тверді та надтверді композити. PLA – це фототермічний і фотохімічний процес, у якому використовується імпульсний лазер із фіксованою тривалістю імпульсу. Густина енергії випромінювання і тривалість імпульсу визначають, чи буде поглинання лінійним чи нелінійним. Під час цього процесу випаровування, тиск віддачі та сублімація, викликані процесом, витісняють матеріал, створюючи елементи поверхні (рис. 2.1), розміри яких досягають від 10 мкм до 100 мкм. На процес лазерної абляції впливає багато факторів, включаючи довжину хвилі, лазерне середовище, тривалість імпульсу, щільність потоку, швидкість сканування тощо.



Рисунок 2.1 – Процес абляції

Довжина хвилі визначає матеріальні механізми та поведінку поглинання. Довжина хвилі 1064 нм зазвичай використовується для абляції твердих і надтвердих матеріалів через максимальне поглинання. Проте, поглинальна здатність і ефективність оптичного пробою покращуються з коротшими довжинами хвиль (532 нм) через багатофотонне поглинання навіть в ізоляційних матеріалах, таких як PCVD і PCBN. Багатофотонне поглинання легко ініціює електронне збудження та рухливість. Перевагами цього є більша швидкість абляції з кращою точністю.

Тип/джерело лазера – це середовище, яке використовується для генерації лазерного променя. Вибір визначає енергію фотона пучка. Це особливо важливо, якщо потрібен фотохімічний механізм, оскільки енергія фотона має бути більшою за енергію зв'язку матеріалу заготовки.

Найпоширенішими лазерами для твердих і надтвердих матеріалів є Nd:YAG, ексіммерний і волоконний лазери. Неойтербієві (Nd) лазери є лазерами ближнього інфрачервоного (ІЧ) діапазону і можуть легко створювати елементи розміром 20 мкм. Існує 3 основних типи лазерів Nd: Nd:YAG, Nd:YLF і Nd:YVO₄. Довжини хвиль незначно змінюються від 1064 нм до

1047 нм відповідно. Nd:YAG має більш стабільний показник заломлення. Nd:YVO₄ можна імпульсувати з високою частотою повторення, але це призводить до меншої енергії на імпульс.

Ексимерні лазери мають високу енергію імпульсу, ідеальну для абляції в УФ-діапазоні довжин хвиль (від 193 нм до 355 нм). Вони є ефективним середовищем для розриву молекулярних зв'язків; частота повторення обмежена лише парою кілогерц. Для створення ексимерного лазера потрібен аргон. Цей газ потрібно контролювати; оскільки він старіє з використанням, він змінює однорідність променя.

Волоконні лазери надійні, мають високу пікову потужність і гарну оптичну якість. Вони також можуть бути модифіковані, щоб мати різні профілі променя та підтримувати високий розподіл потужності.

Тривалість імпульсу – це тривалість кожного опроміненого імпульсу, вона змінює кількість відкладення енергії та її розподіл на матеріал мішені. Як і довжина хвилі, він впливає на поведінку поглинання. Дослідження показали переваги коротшого імпульсу в точній абляції твердих і надтвердих матеріалів, оскільки вони фокусують енергію в надзвичайно малій області для створення поверхневих текстур.

Швидкість сканування визначає, як довго деталь піддається дії лазерного променя в певній області. Його потрібно оптимізувати відповідно до характеристик матеріалу та лазерного променя, щоб забезпечити достатню передачу енергії для достатнього рівномірного видалення матеріалу з обмеженим пошкодженням поверхні. Сучасні технології обробки матеріалів використовували швидкість подачі в діапазоні від 2 мм/с до 900 мм/с. Найвища швидкість проникала лише у верхні поверхневі шари, але передавала достатньо енергії, щоб спричинити розбрикування матеріалу вздовж текстури. Зі зменшенням швидкості глибина канавки збільшувалася з більш чіткою формою текстури (рис. 2.2).

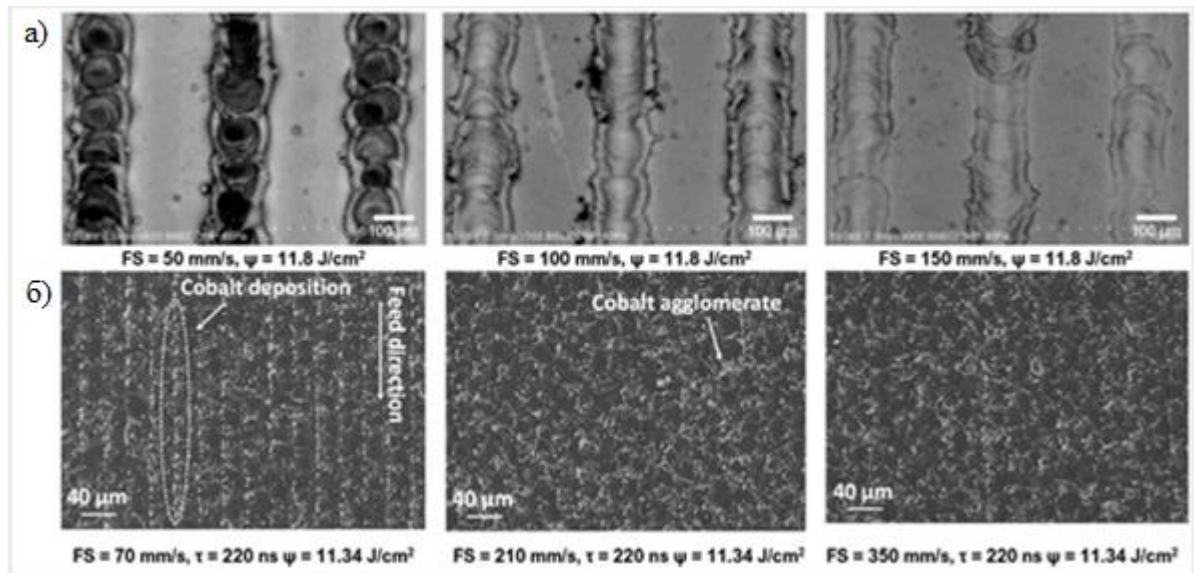


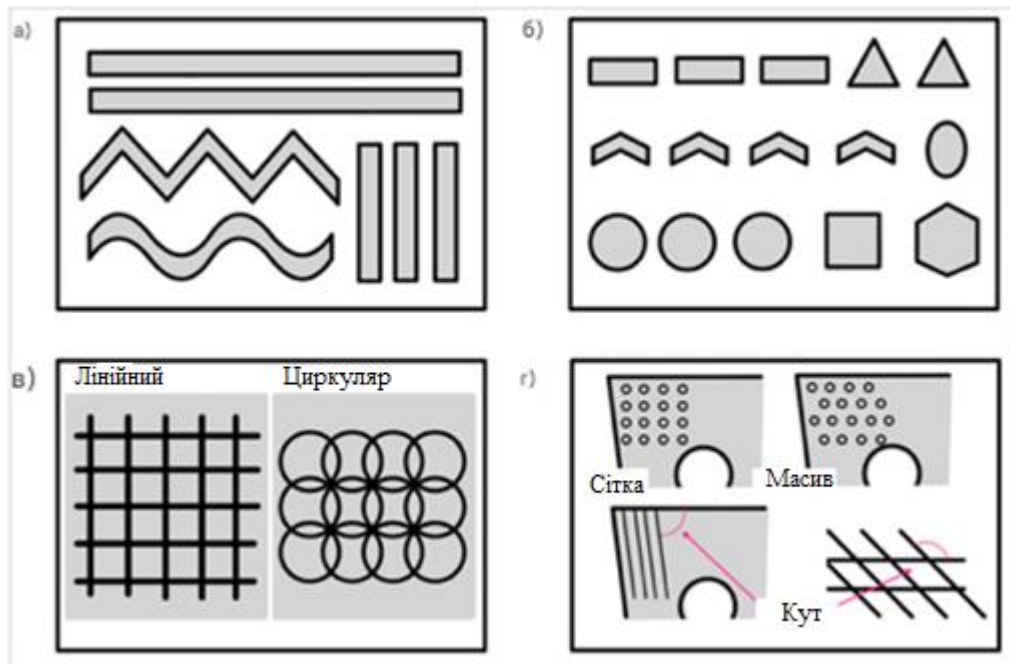
Рисунок 2.2 – Мікроканавки на твердому сплаві ВК8 при різних швидкостях обробки: 70 мм/с дає $R_a = 0,5 \text{ мкм}$, 210 мм/с дає $R_a = 0,41 \text{ мкм}$ [16]

Швидкість лазерного сканування також відіграє помітну роль у отриманні шорсткості поверхні оброблених текстур. Дослідження [12] прийшли до висновку про чотириразове збільшення параметра R_a (Roughness average – середнє арифметичне відхилення профілю від середньої лінії на базовій довжині вимірювання) в PCD-матеріалах при зменшенні швидкості лазера на 75 %. Нижча швидкість зазвичай збільшує термічне пошкодження поверхні, що призводить до появи поверхневих дефектів.

2.2 Текстури поверхні ріжучого інструменту

Лазерна абляція ідеально підходить для мікрообробки інструментів із твердих і надтвердих матеріалів для створення ряду поверхневих текстур і конфігурацій, включаючи неперервні, переривчасті та складні геометрії (рис. 2.3). Виходячи з аналізу розглянутих робіт, можна відзначити, що обґрунтування вибору параметрів лазера та розміру текстури все ще базується на методі проб і помилок/статистичному підході для визначення найкращого діапазону параметрів для створення мікротекстур. Статистичні підходи

корисні для визначення значущості факторів під час обробки. Взаємодія між лазером і деталлю відносно коротка і складна, що ускладнює точне прогнозування поведінки для досягнення бажаної цільової текстури [15]. Тому методи оптимізації та моделювання для широкомасштабного виробництва постійно розробляються та переглядаються. Чисельне моделювання показало успіх у прогнозуванні результатів лазерної обробки.



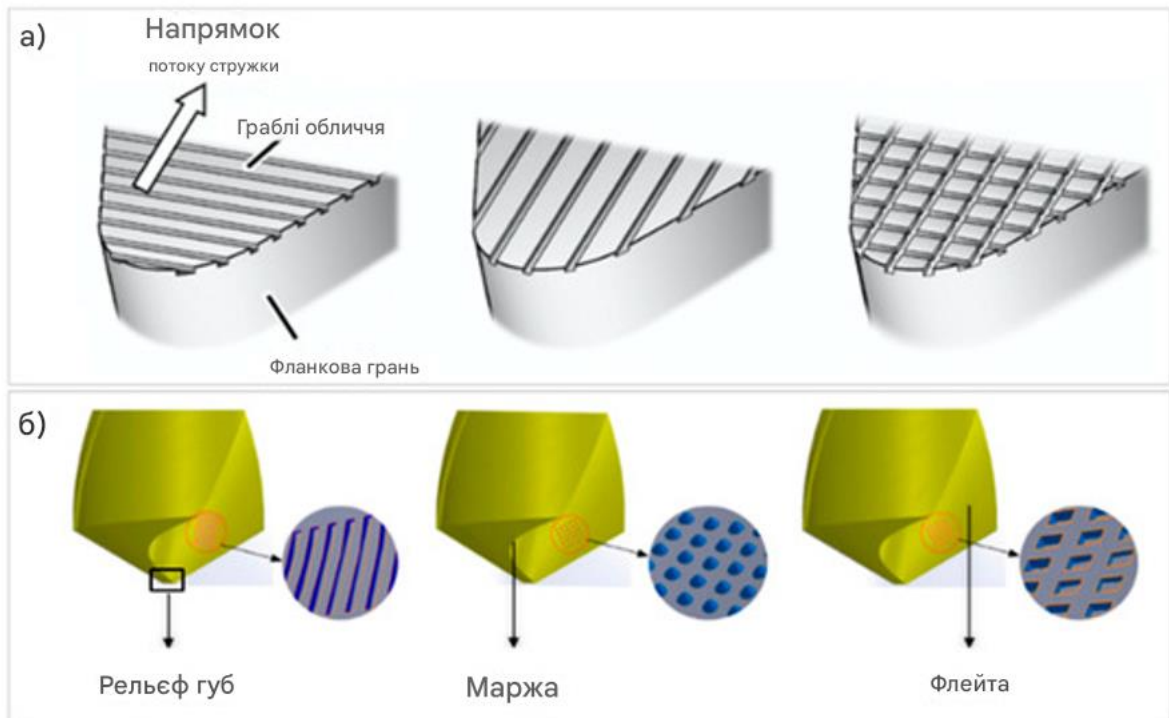
а) безперервні текстури; б) дискретні текстури;
в) елементи штрихування; г) орієнтація текстури.

Рисунок 2.3 – Зазвичай використовувані конструкції та конфігурації мікротекстур

Використання та форма текстур на різальних інструментах були натхненні різними біологічними структурами з основною метою покращення трибологічних характеристик під час обробки. Наявність мікротекстур на поверхні зменшує довжину контакту між заготовкою та ріжучим інструментом, спричиняючи загальне зниження сил різання, тертя і

температур різання при сухому різанні. Текстури також діють як резервуари для мастила та сміття.

Різні місця на інструменті можуть бути текстуровані лазером: передня поверхня, бокова поверхня на однокочкових ріжучих інструментах або край, канавка на багаточочкових ріжучих інструментах (рис. 2.4, [16, 17]).



а) напрямок потоку стружки, показаний стрілкою;

б) мікротекстури на передній поверхні свердла.

Рисунок 2.4 – Мікроканавки, створені на передній поверхні поворотного ріжучого інструменту

На однокочкових ріжучих інструментах передня поверхня зазвичай має текстуру, оскільки це початкова область взаємодії стружки та інструменту; зміни довжини та форми контакту мають більший вплив на тертя, знос, адгезію та змащування. Текстурування бокової поверхні покращує загальну зносостійкість; текстури в цій області допомагають видалити сміття та

запобігають утворенню включень між інструментом і стружкою. У свердлильних інструментах край часто текстурований, оскільки він знаходиться в ковзаючому контакті з поверхнями отвору, і стружка тече по цій області. Текстури спричиняють меншу адгезію та покращують осипання прилиплої стружки. Канал має меншу текстуру, тому що він менш схильний до адгезії, але текстурування поверхні сприяє змащенню, дозволяючи видаляти стружку з наконечника свердла.

Мікротекстури на вставці ріжучого інструменту зменшують довжину контакту між заготовкою та інструментом. Сучасні дослідження показали ефективність текстур у зниженні коефіцієнту тертя і сил різання, оскільки поверхневі структури дозволяють краще розсіювати тепло і зберігати залишки зносу і забезпечують простір для змащування [16, 17].

Геометрія текстур змінює довжину контакту між інструментом і деталлю та здатність утримувати залишки зносу. Геометрію текстури слід вибирати так, щоб покривати достатню площу, щоб максимізувати зменшення коефіцієнту тертя і адгезії під час процесу точіння. На покращення трибологічної продуктивності впливає не лише геометрія текстури, але й розмір текстури та відсоток площі інструменту, покритого мікротекстурами.

Загалом, два основні фактори, які впливають на ефективність тертя, – це розмір текстури та щільність текстури інструменту. Порівняння геометрії та їх продуктивності показує, що прямокутні виїмки та еліптичні канавки найкраще знижують сили різання під час точіння на 35 %. Під час токарних операцій ямочки стабілізують зношування, тоді як канавки, як правило, дестабілізують тертя. Вплив розташування текстури на інструмент і ступінь взаємодії заготовки з геометрією текстури також не досліджено детально. Крім того, недостатньо досліджень щодо визначення оптимальної геометрії текстури при механічній обробці через той факт, що на необхідну продуктивність сильно впливає матеріал заготовки та конкретне застосування обробки. Майбутня робота в області мікротекстурування рухається в напрямку моделювання для

ефективної функціональності текстур і точного прогнозування швидкості зношування, коефіцієнта тертя і адгезії.

2.3 Лазерне термічне зміцнення інструментальних сталей

Термічне зміцнення інструментальних сталей лазерним випромінюванням, яке засноване на локальному нагріванні ділянки поверхні під впливом випромінювання та охолодження цієї ділянки з надкритичною швидкістю після припинення впливу за рахунок тепловідведення у внутрішні шари металу широко застосовується у промисловості і може стати ще більш перспективним напрямом у майбутньому. При цьому не потрібно застосовувати будь-які охолодні середовища, що спрощує технологію термозміцнення. Лазерне термічне зміцнення характеризується малим часом впливу та забезпечує відсутність деформації деталей. Технологічні можливості лазерного гарту дозволяють використовувати цей процес як заключну операцію без подальшої механічної обробки [16].

Потужність і енергія випромінювання є основними параметрами лазерного пучка. Для поверхневої обробки матеріалів до теперішнього часу застосовувалися твердотільні або газорозрядні CO₂-лазери потужністю більше 1 кВт, надійні в експлуатації, з автоматизованою системою управління технологічного комплексу. Висока вартість таких комплексів та їх низька продуктивність обмежують застосування лазерного термічного або хіміко-термічного зміцнення [3]. Ця проблема може бути вирішена шляхом використання лазерів нового покоління.

На сьогоднішній день найбільш перспективними технологічними інструментами є волоконні лазери. До переваг волоконних лазерів слід віднести високу ефективність (до 50 %), що веде до більш низьких експлуатаційних витрат; невеликі розміри дозволяють легко вбудовувати їх у існуючі системи виробництва. Однак їх вартість поки залишається дуже високою.

У цій роботі була досліджена можливість використання лазерів низької потужності, що працюють в імпульсному режимі, для поверхневого лазерного загартування деталей або окремих їх ділянок. Традиційно лазери потужністю менше 0,5 кВт для цього не використовуються. Метою цієї роботи є розробка режимів зміцнення поверхні деталей та інструменту з використанням Nd:YAG-лазерів малої потужності. Лазерне зміцнення проводилося з допомогою лазера потужністю 5 Вт. Основним параметром, що варіюється, була тривалість імпульсу. Як параметр контролю властивостей зміцненого шару була обрана мікротвердість.

При обробці поверхні сталей і сплавів імпульсним лазерним випромінюванням проявляється ряд особливостей порівняно з безперервним. По-перше, завдяки меншій довжині хвилі імпульсне випромінювання більше поглинається поверхнею матеріалів. По-друге, за рахунок зменшення розфокусування лазерного променя при одній і тій же потужності лазера можна домогтися значного підвищення щільності потужності в імпульсі. Температура нагрівання матеріалу значно зростає, і тугоплавкі сполуки, що є в структурі поверхневого шару, розплавляються. І, по-третє, швидкості охолодження поверхні матеріалів після імпульсної обробки в 100-1000 разів вище аналогічних для безперервного випромінювання. В результаті виходять унікальні структури та властивості обробленої поверхні.

Дослідження проводилися на інструментальних сталях: вуглецевої У12 та швидкорізальної Р6М5. Сталі піддавали стандартній термічній обробці: У12 – загартуванню та низькому відпуску, Р6М5 – загартуванню та триразовому відпуску. Шорсткість зразків становила $Rz = 20\text{мкм}$, тому заходи щодо зменшення відбивної здатності поверхні не вживалися.

2.4 Дослідження режимів багатоімпульсного лазерного термозміцнення сталі

В даний час у технологічних цілях використовуються три типи лазерів: це газові, твердотільні та волоконні. Газові CO₂-лазери потужністю понад 1 кВт, надійні в експлуатації, з автоматизованою системою управління технологічного комплексу, широко застосовуються для різних технологічних операцій, у тому числі для термічної обробки. Однак висока вартість таких комплексів та їх низька продуктивність обмежують застосування таких лазерів. Твердотільні лазери на алюмоітрієвому гранаті (Nd³⁺:YAG-лазери) мають у порівнянні з газовими ряд переваг. Вони компактніші, мають вищі значення коефіцієнта корисної дії. Одночасно з цим YAG-лазери є дорогими та вимагають великих експлуатаційних витрат. Для термічної обробки використовуються YAG-лазери потужністю від 1 кВт до 5 кВт, що працюють як у безперервному, так і імпульсному режимі.

Наразі найперспективнішими технологічними інструментами є волоконні лазери. До переваг волоконних лазерів слід віднести високу ефективність (до 50 %), що веде до нижчих експлуатаційних витрат; невеликі розміри дозволяють легко вбудовувати їх у існуючі системи виробництва. Однак їх вартість поки що залишається дуже високою, що також не дозволяє говорити про їхнє широке використання.

Незважаючи на переважну думку [1, 2] про те, що безперервний режим підходить для проведення термічної обробки, можна припустити, що використання імпульсного випромінювання дозволить знизити потужність використовуваних лазерних пристроїв. Мала тривалість імпульсів і можливість фокусування випромінювання в пляму малого діаметра дозволяють створювати щільності потужності, достатні для нагрівання оброблюваної поверхні до температур вище фазових перетворень. Раніше було показано [3], що застосування імпульсних режимів дозволяє проводити термічну обробку за допомогою YAG – лазера із середньою потужністю всього

від 5 Вт до 10 Вт, при цьому на всіх режимах спостерігалось оплавлення та спінювання металу у зоні нагріву.

Метою цієї роботи є розробка режимів зміцнення поверхні деталей та інструменту з використанням YAG-лазерів малої потужності. Лазерне зміцнення проводилося з допомогою лазера потужністю 5 Вт. Основним параметром, що варіюється, була тривалість імпульсу. У роботі було досліджено два режими: обробка одиночними імпульсами тривалістю від 0,1 мс до 0,4 мс та багатоімпульсна обробка короткими (від 30 мкс до 70 мкс) імпульсами.

Як параметр контролю властивостей зміцненого шару була обрана мікротвердість. Випробування мікротвердості найчастіше проводять на приладі ПМТ-3 шляхом вдавлювання стандартної 136-градусної алмазної піраміди з квадратною основою та навантаженнями 2, 5, 10, 20, 50, 100 та 200 [4]. Великою перевагою приладу є пряме навантаження індентора, що забезпечує високу точність і стабільність величин навантажень, що прикладаються. Загальне збільшення мікроскопа приладу ПМТ-3 при візуальних спостереженнях та вимірюваннях 40-кратним епіоб'єктивом ОЕ-6 з апертурою $A = 0,65$ (фокусна відстань $F = 6,16$) і гвинтовим окулярним 15-кратним мікрометром АМ9-3 дорівнює від 485 до 487.

Технологія виміру довжини діагоналі відбитка досить трудомістка, а можливість внесення похибки, особливо при вимірі відбитків невеликих розмірів, дуже істотна. У роботі [5] розроблено методику дослідження мікротвердості з наноточністю. Комплекс для досліджень поєднує мікротвердомір ПМТ-3 та персональний комп'ютер. Вимірювання мікротвердості виконується вдавлюванням чотиригранної піраміди, а зображення відбитка передається за допомогою відеокамери на екран монітора. На екрані зображення може бути збільшено до будь-яких розмірів, тобто найменший відбиток може бути збільшений до розмірів, які дозволяють вимірювати його з найвищою точністю. Довжина діагоналі розраховується автоматично. Вимірювання довжин діагоналей можуть повторюватися

багаторазово. Значення довжин діагоналей заносяться автоматично до таблиці у програмі Excel і проводиться розрахунок середнього значення мікротвердості.

Безперечною перевагою даної методики є можливість не тільки вимірювати мікротвердість, а й фотографувати об'єкти, що досліджуються. Ширина зміцненої доріжки оцінювалася мікроскопі МБС-9.

Дослідження проводилися на інструментальних сталях: вуглецевої У12 та швидкорізальної Р6М5. Стали піддавали стандартній термічній обробці У12 – загартуванні та низькій відпустці, Р6М5 – загартуванні та триразовій відпустці. Шорсткість зразків становила $Rz = 20\text{мкм}$, тому заходи щодо зменшення відбивної здатності поверхні не вживалися.

У таблиці 2.1 наведено результати розрахунків щільності потужності залежно від тривалості імпульсу для багатоімпульсної обробки.

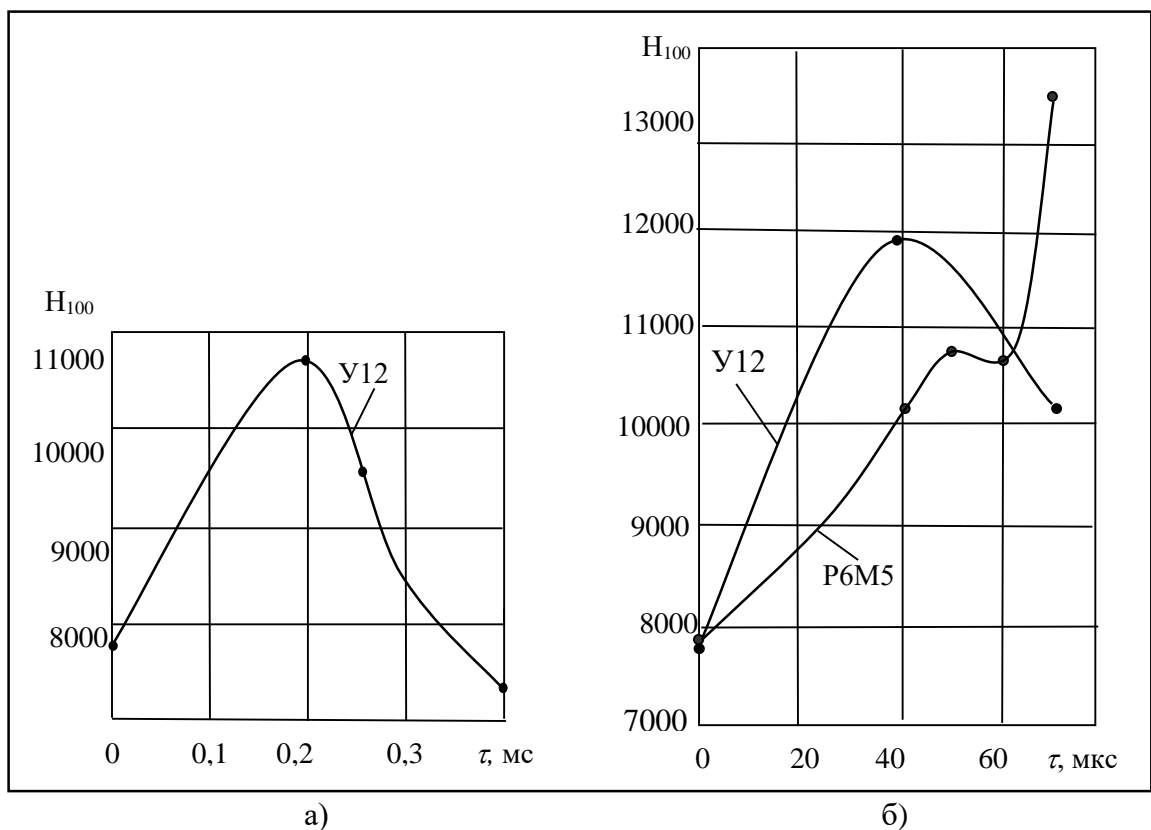
Таблиця 2.1 – Розрахунок густини потужності для багатоімпульсної обробки

Режим	Тривалість імпульсу, мкс	40	50	60	70	400 (0,4 мс)
		Енергія в імпульсі, Дж	0,7	1,45	2,38	3,55
Щільність потужності q , Вт/м ²		$7,3 \times 10^8$	$12,1 \times 10^8$	$16,5 \times 10^8$	$21,1 \times 10^8$	$8,8 \times 10^9$

Видно, що зі збільшенням тривалості імпульсу значення густини потужності зростають. Для порівняння наведено одне із значень густини потужності для одноімпульсної обробки. Видно, що в цьому випадку щільність потужності на порядок вища. Ці дані добре узгоджуються з аналізом поверхні зміцнених зразків. Всі досліджені режими викликають нагрівання поверхні, що обробляється вище температури плавлення. Однак при обробці одиночними імпульсами спостерігається не тільки плавлення, а й спінювання металу, а після кристалізації на поверхні утворюються мікротріщини.

Використання багатоімпульсної обробки хоч і призводить до плавлення, що в ряді випадків не бажано, все ж таки забезпечує більш високу якість поверхні.

Результати досліджень мікротвердості представлено на рисунку 2.5. Порівняння двох режимів показує, що з обробці серіями коротких імпульсів мікротвердість сталі У12 вище, ніж із обробці одиночними імпульсами. Можна припустити, що при багатоімпульсній обробці внаслідок малого часу впливу лазерного випромінювання на матеріал і великій швидкості відведення тепла дифузійні процеси, пов'язані з розчиненням карбідів при плавленні не встигають завершитися в повному обсязі. Тому вторинний цементит зберігається, відбувається подальше подрібнення зерна, підвищення щільності дислокацій, що призводить до зростання рівня внутрішньої напруги, і, як наслідок – підвищення твердості.



а) обробка одиночними імпульсами; б) багатоімпульсна обробка.

Рисунок 2.5 – Залежність мікротвердості від тривалості імпульсу

Для сталі У12 оптимальне значення тривалості імпульсу становить 40 мкс. Для сталі Р6М5 в тимчасовому інтервалі, що розглядається, спостерігається майже монотонне зростання твердості. Можна припустити,

по-перше, проведення досліджень з більшою тривалістю імпульсу дозволить розробити оптимальний режим лазерного зміцнення для сталі Р6М5. По-друге, збільшення оптимальної тривалості імпульсу для сталі Р6М5 порівняно зі сталлю У12 пов'язане з її особливими теплофізичними властивостями: більш високою теплоємністю та значно нижчим коефіцієнтом теплопровідності порівняно з вуглецевою сталлю.

На рисунку 2.6 представлена структура зони лазерного впливу. Чітко помітні зони плавлення, загартована (світла), перехідна, основного металу.

Зона плавлення на сталі Р6М5 (рис. 2.7) значно менша, ніж для сталі У12. Глибина загартованої зони становить приблизно 150 мкм, що є дуже хорошим результатом для імпульсного режиму.



Рисунок 2.6 – Сталь У12, моноімпульсна обробка.

Тривалість імпульсу 40 мкс



Рисунок 2.7 – Сталь Р6М5, багатоімпульсна обробка.

Тривалість імпульсу 60 мкс

Вимірювання мікротвердості в перехідній зоні не фіксує розміщення – мікротвердість перехідної зони нижче, ніж у загартованій зоні, але вище за мікротвердість основного металу.

У цілому нині результати цієї роботи непогано узгоджуються з результатами робіт [1, 2], де значення мікротвердості досліджених сталей часом навіть менше отриманих нами, проте потужність використовуваної лазерної установки у разі значно нижче.

У ряді робіт [1, 2, 6] не рекомендується проводити загартування з оплавленням для сталі Р6М5, через те, що такий режим призводить до розчинення карбідів та збільшення кількості залишкового аустеніту.

На думку авторів, висока твердість може бути забезпечена тільки при лазерному загартуванні швидкорізальної сталі в твердому стані, без оплавлення поверхневих шарів.

Незважаючи на те, що всі розглянуті нами режими призводять до оплавлення поверхні, зниження твердості сталі Р6М5 не спостерігалось, що пояснюється збереженням карбідів при короткочасній дії. Разом з тим необхідно продовжити дослідження режимів сталі Р6М5 з метою оптимізації

тривалості імпульсу та пошуку параметрів імпульсного загартування, що не викликає оплавлення. Останнє особливо важливе для інструменту та деталей, для яких необхідно зберігати геометричні параметри поверхні.

ВИСНОВКИ

1. Актуальність і мета дослідження.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню лазерної мікрообробки твердих і надтвердих інструментальних матеріалів, зокрема інструментальних сталей, карбїду вольфраму, нітриду бору тощо. Метою є виявлення залежності між параметрами лазерного випромінювання (довжина хвилі, імпульс, щільність потоку тощо) та змінами фізико-механічних властивостей поверхні (твердість, зносостійкість, шорсткість).

2. Характеристика інструментальних матеріалів.

Описано п'ять основних груп інструментальних матеріалів:

а) інструментальні сталі (вуглецеві та швидкорізальні) – зручні в обробці, але мають обмеження в теплостійкості;

б) тверді сплави (наприклад, карбід вольфраму) – мають високу твердість, теплостійкість, але складні в обробці;

в) надтверді матеріали (алмаз, кубічний нітрид бору) – забезпечують найкращу зносостійкість, особливо для складних сталей, хоча мають свої обмеження (наприклад, алмаз - низька термостійкість та адгезія до заліза).

3. Проблеми експлуатації та методи їх вирішення.

Ключові проблеми інструментів: зношування, адгезія, перегрів. Для їх зменшення:

– застосовується лазерна мікрообробка та текстурування поверхні, що дозволяє знизити тертя, покращити зносостійкість і зменшити контакт із стружкою;

– розглядаються методи модифікації поверхні, які не погіршують інші важливі властивості (наприклад, ударну в'язкість);

– термічна обробка ефективна лише для сталей, і не вирішує повністю проблему крихкості.

4. Практичне значення та перспективи.

Отримані результати можуть бути використані в:

- а) виробництві високоточних і довговічних ріжучих інструментів;
- б) подальших дослідженнях з оптимізації лазерних режимів обробки;
- в) навчальному процесі для підготовки спеціалістів у галузі матеріалознавства та обробки матеріалів.

Перспективи полягають у подальшому удосконаленні лазерних технологій і розширенні їх застосування в індустрії.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Chang F., Gu D., Dai D., Yuan P. Selective laser melting of in-situ Al₄SiC₄ + SiC hybrid reinforced Al matrix composites: Influence of starting SiC particle size. // Surf. Coatings Technol. 2015. 272 (3). P. 15–24.
2. Pacella M., Butler-Smith P.W., Axinte D.A., Fay M.W. The allotropic transformation of polycrystalline cubic boron nitride structures resulting from the thermal effects of pulsed laser ablation. // Diam. Relat. Mater. 2015. Vol. 59. P. 62–68.
3. Smith G.T. Cutting Tool Technology: Industrial Handbook. Springer: London, UK, 2008. 612 p.
4. Denyer D., Tranfield D. Producing a systematic review.pdf. The SAGE Handbook of Organisational Research Methods. Sage Publications Ltd: London. 2009. P. 671–689.
5. Sumiya H., Harano K. Innovative ultra-hard materials: Binderless nanopolycrystalline diamond and nano-polycrystalline cubic boron nitride // SEI Tech. Rev. 2016. Vol. 82. P. 21–26.
6. McKie A., Winzer J., Sigalas I., Herrmann M. et al. Mechanical properties of cBN-Al composite materials // Ceram. Int. 2011. Vol. 37. P. 1–8.
7. Novikov N.V., Dub S.N. Hardness and fracture toughness of CVD diamond film // Diam. Relat. Mater. 1996. Vol. 5 P. 1026–1030.
8. Paul S., Singh R., Yan W. Finite element simulation of laser cladding for tool steel repair.; In lasers Based Manufacturing // Springer: New Delhi. 2015. P. 139–156.
9. Wu Z., Bao H., Xing Y., Liu L. Tribological characteristics and advanced processing methods of textured surfaces: a review // The Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2021. Vol. 114, No. P. 71241–1277.
10. Pang K., Wang D. Study on the performances of the drilling process of nickel-based superalloy Inconel 718 with differently micro-textured drilling tools // Int. J. Mech. Sci. 2020. 180(1–3): 105658.

11. Pacella M., Axinte D., Butler-Smith P., Daine M. On the Topographical/Chemical Analysis of Polycrystalline Diamond Pulsed Laser Ablated Surfaces // *Procedia CIRP*. 2014. Vol. 13. P. 387–392.

12. Denkena B., Grove T., Krödel A., Ellersiek L. Increased performance in high speed turning of Inconel 718 by laser structuring of PcBN tools // *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 77. P. 602–605.

13. Zhang Z., Lu W., He Y., Zhou G. Research on optimal laser texture parameters about antifriction characteristics of cemented carbide surface // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*. 2019. Vol. 82 P. 287–296.

14. See T.L., Chantzis D., Royer R., Metsios I., Antar M. Marimuthu S. A comparison of the DPSS UV laser ablation characteristic of 1024 and H10F WC-Co. // *Opt. Laser Technol*. 2017. Vol. 92. P. 101–108.

15. Zimmermann M., Kirsch B., Kang Y., Herrmann T., Aurich J.C. Influence of the laser parameters on the cutting edge preparation and the performance of cemented carbide indexable inserts // *J. Manuf. Process*. 2020. Vol. 58 P. 845–856.

16. O.S. Hnatenko, O.V. Afanasieva, N.O. Lalazarova, Yu.S. Kurskoy, E. Odarenko, Y. Sashkova, O. Ivanchenko. New technologies of laser hardening of parts of fuel equipment // *J. Nano- Electron. Phys*. 2023. Vol. 15 No 1, 01007-1-01007-7.

17. Афанасьєва О.В., Лалазарова Н.О., Попова О.Г Нові технології лазерної поверхневої обробки // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. Харків: Національн. Аерокосміч. ун-т ім. Н.С.Жуковського. 2021, № 2 (170). С. 59–65.