

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ТА
ЗВАРЮВАННЯ ІМЕНІ Є. О. ПАТОНА
КАФЕДРА ЛАЗЕРНОЇ ТЕХНІКИ ТА ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ О. Д. Кагляк
“ ” _____ 2024 р.

Магістерська дисертація
на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності **131 Прикладна механіка**

на тему: «Технологічне забезпечення цілісності поверхні та підвищення корозійної стійкості штампової сталі комбінованим лазерно-ультразвуковим поверхневим обробленням»

Виконала: студентка II курсу, групи ФП-21мп

Сідун Карина Юріївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник к. т. н, доцент Лесик Д. А.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент к. т. н, доцент Зворикін К. О.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студентка _____
(підпис)

Київ – 2024 р.

РЕФЕРАТ

Дипломний проект освітньо-кваліфікаційного рівня “Магістр” спеціальності 131. Прикладна механіка, спеціалізації – інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій. Сідун Карина Юріївна. Керівник Д. А. Лесик. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона, кафедра “Лазерної техніки та фізико-технічних технологій”. Група ФП-21мп. 2023. – 87 с.

Пояснювальна записка складається із вступу, 5 розділів, висновку, переліку використаних джерел із 36 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 87 сторінок основного тексту, 40 рисунків та 6 таблиць.

Метою роботи є розробка процесу комбінованого лазерно-ультразвукового поверхневого оброблення інструментальних штампових сталей для того, щоб покращити експлуатаційні властивості поверхневого шару. Інструментальні сталі є одними із найпоширеніших видів матеріалу, які призначені для виготовлення штампів, прес-форм, матриць та інших інструментів, які повинні мати високу міцність, щоб витримувати високі навантаження і не деформуватися при роботі з металом. Крім того, є необхідність покращити корозійну стійкість, яка викликає пошкодження робочих поверхонь матриць, що призводить до втрати їх міцності та цілісності. Тому під час виготовлення матриці із сталі X12M або X12MФ є необхідність розробити новий метод поверхневого постооброблення для покращення якості робочих поверхонь матриці.

Робота полягає в дослідженні впливу комбінованого лазерно-ультразвукового поверхневого оброблення з використанням високопотужного лазера, на якісні показники поверхневого шару сталі X12MФ. Аналіз використаної лазерної технологічної установки приводиться до вимог охорони праці. Графічна частина дипломного проекту включає 6 креслеників/плакатів формату А1, що містять загальну інформацію щодо опису проблеми та задачі дипломного проекту, технологічного процесу та пристроїв, які використовуються під час виготовлення деталі.

ABSTRACT

Diploma project of educational and qualification level "Master" specialty 131. Applied mechanics, specialization - welding engineering, laser and related technologies. Sidun Karyna Yuriyivna. The head is D. A. Lesyk. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". E. O. Paton Educational and Research Institute of Materials Science and Welding. Department of Laser Systems and Advanced Technologies. Group FP-21mp. 2023. – p. 87.

The explanatory note consists of an introduction, 5 sections, a conclusion, a list of used 36 sources by name. The total volume of the work consists of 87 pages of the main text, 40 figures and 6 tables.

The purpose of the work is to develop a process of combined laser-ultrasonic surface treatment of tool die steels in order to improve the operational properties of the surface layer. Tool steels are one of the most common types of material that are intended for the manufacture of stamps, molds, dies and other tools that must have high strength to withstand high loads and not deform when working with metal. In addition, there is a need to improve corrosion resistance, which causes damage to the working surfaces of the matrices, which leads to a loss of their strength and integrity. Therefore, during the manufacture of AISI D3 or AISI D2 steel matrix, it is necessary to develop a new method of surface post-treatment to improve the quality of the working surfaces of the matrix.

The work consists in researching the effect of combined laser-ultrasonic surface treatment using a high-power laser on the quality indicators of the surface layer of AISI D2 steel. The analysis of the used laser technological installation is based on labor protection requirements. The graphic part of the diploma project includes 6 drawings/posters in A1 format, containing general information about the description of the problem and task of the diploma project, technological process and devices used during the production of the part.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
1. АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ.....	12
1.1. Інструментальні матеріали.....	12
1.2. Висококонцентровані методи поверхневого зміцнення металевих виробів.....	13
1.3. Обґрунтування вибору методу поверхневого зміцнення штампових сталей.....	21
1.4. Лазерне поверхнєве зміцнення сталевих виробів високопотужними лазерами.....	22
1.4.1. Лазерне зміцнення низьковуглецевих сталей.....	25
1.4.2. Лазерне зміцнення середньовуглецевих сталей.....	25
1.4.3. Лазерне зміцнення високовуглецевих сталей.....	26
1.4.4. Лазерне зміцнення легованих сталей.....	27
1.5. Аналіз методів інтенсифікації лазерного термозміцнення сталей методами інтенсивного пластичного деформування.....	28
1.6. Умови та рішення для підвищення корозійної стійкості.....	30
2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	33
2.1. Аналіз вихідних даних для проектування технологічного процесу.....	33
2.2. Проектування операційного технологічного процесу виготовлення деталі «Матриця» та її технічне обґрунтування	35
2.3. Термофізична модель лазерного термозміцнення штампових сталей волоконним лазером в поєднанні із сканувальною оптикою.....	42
2.4. Особливості ультразвукового ударного зміцнення великогабаритних виробів багатобойковим наконечником.....	44
3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	47
3.1. Обладнання та методика проведення експериментальних досліджень.....	47
3.1.1. Матеріал.....	49
3.1.2. Лазерне поверхнєве термозміцнення.....	50

3.1.3. Ультразвукове поверхнєве зміцнення.....	54
3.2. Математичне планування експерименту.....	56
3.3. Методика експериментальних вимірювань.....	57
3.3.1. Морфологія поверхні та параметри шорсткості	57
3.3.2. Дослідження структурно-фазового напруженого стану.....	58
3.3.3. Твердість та інтенсивність зміцнення.....	59
3.3.4. Випробування на зносо- та корозійну стійкість.....	60
4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	63
4.1. Оптимізація режимів лазерного зміцнення.....	63
4.2 Топографія поверхні.....	64
4.3. Мікроструктура та фазовий склад зміцненого шару.....	67
4.4. Мікротвердість та інтенсивність зміцнення зміцненого шару.....	69
4.5. Зносостійкість зміцненого шару комбінованим обробленням.....	72
4.6. Корозійна стійкість зміцнених зразків.....	74
5. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	76
5.1 Алгоритм керування комбінованим лазерно-ультразвуковим процесом поверхневого зміцнення та оздоблювання штампових сталей.....	76
5.2 Інші пропозиції.....	78
ВИСНОВКИ.....	80
ДОДАТКИ.....	82
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	84

ВСТУП

Сталь є одним із найбільш використовуваних матеріалів у світі. Вона використовується у всіх найважливіших галузях промисловості: будівництво, інфраструктура, автомобілебудування та інший транспорт, упаковка та машинобудування, а також побутова техніка. Сьогодні у більшості галузей промисловості застосовуються різні види сталевих конструкцій. Від важкої техніки до готових блоків та прокатів – сталь використовується повсюдно. Будівлі, мости та обладнання виготовляються із використанням сталевих профілів.

У машинобудуванні використовуються марки сталі з високим рівнем характеристик якості, такі як інструментальні сталі. Це міцний, надійний матеріал із відмінними механічними властивостями. Деталі з інструментальних сталей можна піддавати великим навантаженням. Серед інших переваг інструментальної сталі є стійкість до впливу широкого діапазону температур, корозії і гарна зварюваність, а також високі характеристики міцності, зносостійкості та ударної в'язкості. Але наскільки міцним, протиударним і максимально стійким до будь-яких змін навколишнього середовища не був би даний вид сталі, на сьогодні необхідність підвищення ресурсу роботи відповідальних виробів, зокрема деталей штампового устаткування (Рис. 1 а, б), є актуальною задачею.

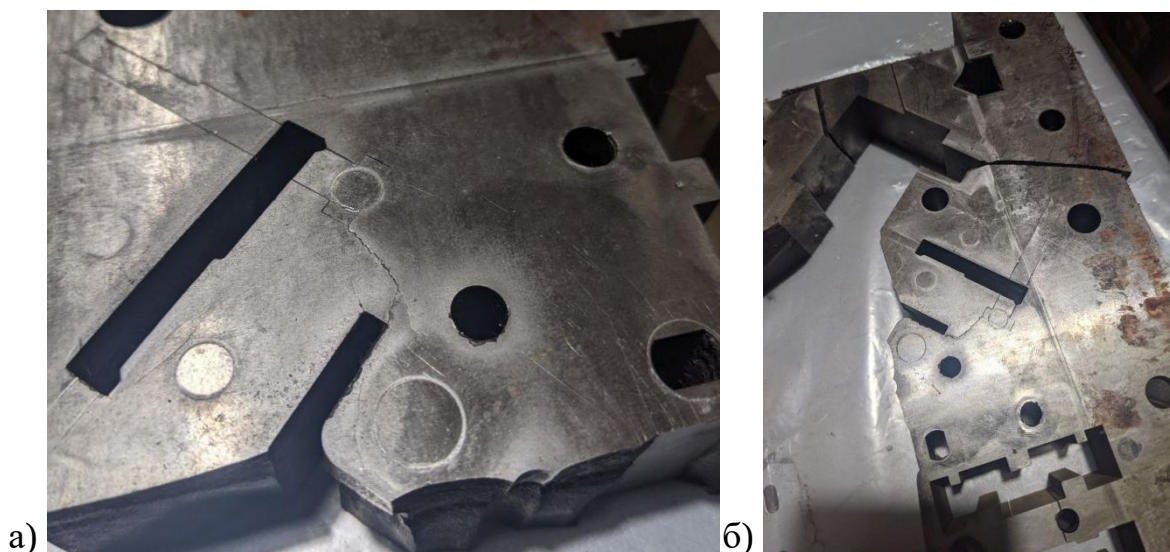


Рисунок 1 (а, б) – Загальний вигляд зламаної матриці

Відомо, що технології не стоять на місці і завдяки сучасним вже наявним процесам можна покращити експлуатаційні властивості матеріалів, а в нашому випадку інструментальної сталі. Оскільки йдеться про інструментальну штампову сталь, яка активно застосовується, наприклад, при виробництві форм та штампів, що використовуються у процесах формування та штампування матеріалів, таких як метали та пластмаси, то необхідність в розробці нових технологій поверхневого постоброблення для підвищення експлуатаційних властивостей є актуальними й на сьогодні.

На основі виконаного аналізу існуючих методів зміцнення зміною структури поверхневого шару деталей для підвищення експлуатаційних властивостей виробів, які працюють в екстремальних умовах, доцільно використати комбіновані методи термомеханічного поверхневого оброблення металів й сплавів шляхом поєднання висококонцентрованих джерел енергії.

Одним із можливих ефективних методів поверхневого зміцнення та оздоблювання інструментальних високолегованих сталей є процес комбінованого лазерно-ультразвукового поверхневого оброблення. В основі процесів лазерного зміцнення лежать незвичні структурні та фазові зміни в матеріалі, що виникають внаслідок надвисоких швидкостей його нагрівання та подальшого охолодження в умовах лазерного опромінення. Важливу роль грають можливість зростання щільності дислокацій в зоні опромінення та інші ефекти. В свою чергу, ультразвукова поверхнева обробка сталі є ефективним методом для якості зміцнення та оздоблювання сталевих виробів [1]. Цей процес може бути застосований для різних цілей, включно з лазерним термообробленням.

Тому, розробка комбінованого термомеханічного методу для поверхневого зміцнення та оздоблювання робочих поверхонь матриці з використанням лазерного термооброблення в поєднанні з ультразвуковим обробленням є актуальною задачею та має практичне значення.

1. АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

1.1 Інструментальні матеріали

Інструментальні високолеговані сталі - це спеціалізовані матеріали, які використовуються для виготовлення різних видів інструментів, призначених для оброблення матеріалів, різання, штампування, формування та інших технологічних процесів. Ці матеріали повинні мати певні механічні, термічні та хімічні властивості, щоб забезпечувати високу продуктивність і тривалий термін служби інструментів. Інструментальні матеріали можна поділити на декілька типів:

- Інструментальні сталі мають такі характеристики:
 - Високий рівень вуглецю задля досягнення високої твердості.
 - Додавання хрому, вольфраму, ванадію, молібдену та інших легуючих елементів для покращення властивостей, таких як твердість, зносостійкість та стійкість до корозії.
 - Проходять спеціальну термічну обробку задля досягнення оптимальних властивостей.
- Інструментальні кераміки мають такі характеристики:
 - Висока твердість та зносостійкість.
 - Хороші теплові та електричні ізоляційні властивості.
 - Крихкість, що робить їх менш придатними для деяких робіт, що вимагають стійкості до ударів.
- Твердосплави (карбіди вольфраму) мають такі характеристики:
 - Висока твердість та зносостійкість.
 - Стійкість до високих температур.
 - Мають крихкість, що може обмежувати їх застосування в певних умовах.
- Інструментальні пластмаси мають такі характеристики:
 - Хімічна стійкість та стійкість до зносу.
 - Легкі та міцні.

- Можуть бути формованими у різні форми для створення спеціалізованих інструментів.
- Інструментальні композити мають такі характеристики:
 - Поєднання різних матеріалів, таких як скловолокно, вуглепластик та інші.
 - Забезпечують оптимальне поєднання міцності, жорсткості та легкості.
 - Широкий діапазон застосування у різних галузях.
- Спеціальні покриття мають такі характеристики:
 - Нанесення на поверхню інструменту для покращення його властивостей.
 - Покриття можуть включати твердосплавні шари, нітриди, карбіди та інші.
 - Поліпшують зносостійкість, знижують тертя та підвищують твердість.

Вибір відповідного інструментального матеріалу залежить від типу інструменту, умов його експлуатації та вимог виробничого процесу. Комбінування різних матеріалів та технологій може бути використане для досягнення оптимальних характеристик у різних умовах роботи.

1.2 Висококонцентровані методи поверхневого зміцнення металевих виробів

Висококонцентровані методи поверхневого зміцнення металевих виробів – це спеціальні (передові) технології, які спрямовані на поліпшення механічних властивостей поверхні металу, не торкаючи при цьому його внутрішню структуру. Ці методи забезпечують збільшення міцності, зносостійкості, корозійної стійкості та інших експлуатаційних характеристик металевих виробів. Дані методи можна поділити на декілька груп:

- Термічне оброблення:
 - Цементация: Цей метод включає насичення поверхні металу вуглецем шляхом нагрівання в атмосфері вуглецю. Результатом є утворення вуглецевих карбідів, які збільшують твердість та зносостійкість поверхні.

- Нітроцементация: Цей процес поєднує цементацию з азотуванням для створення азотованих вуглецевих карбідів, що збільшує міцність та стійкість до зношування.
- Хіміко-термічне оброблення:
 - Нітрування: При нітруванні поверхня металу насичується азотом, що призводить до утворення азотованих вуглецевих карбідів. Цей процес збільшує твердість та корозійну стійкість металу.
 - Карборознітрування: Цей метод комбінує нітрування та цементацию для покращення механічних властивостей поверхні.
- Плазмове зміцнення:

Плазмове зміцнення включає використання плазми для опромінення поверхні металу. Це метод, який може збільшити твердість та стійкість до зношування металу, а також покращити адгезію покриттів [2].

- Ультразвукове оброблення (УЗО):

Ультразвукове оброблення включає вплив ультразвуковими хвилями на поверхню металу. Цей метод може покращити мікроструктуру металу, усунути дрібні дефекти та збільшити міцність [3] (Рис. 2).



Рисунок 2 - Ультразвукове ударне оброблення зварного шва [4]

Ультразвукове ударне оброблення має наступні переваги:

1. Висока питома енергоефективність - у масштабах серійного виробництва - це метод, при якому економія досягає десятків тисяч кіловат.

2. УЗО є поверхневим пластичним деформуванням (ПД). У поверхневому шарі оброблюваної поверхні формуються залишкові напруження стиску та сприятливий профіль (мікрорельєф) на поверхні. Для деталей, виготовлених із високоміцних матеріалів та які мають підвищену чутливість до концентраторів напруги, ПД підвищує опір втоми та перешкоджає появі втомних тріщин.

3. УЗО зварювального шва та навколошовної зони знижує розвиток міжкристалічної корозії границь зерен металу з допомогою їх подрібнення ударними імпульсами ультразвуку [5]. Також даний метод дозволяє:

- покращити структуру металу та стабілізувати її;
- створити на оброблюваній поверхні зміцнювальний шар з підвищеним опором до утворення тріщин;
- зменшити деформації спричинені зварюванням;
- знизити концентрації напруги навантаження в з'єднанні;
- зменшити деформації, що протікають з часом і стабілізувати властивості металу та з'єднання (штучне старіння);
- створити вигідний перерозподіл залишкових зварювальних напружень у зварному шві та навколошовній зоні;
- зменшити власні напруження у поєднанні;
- підвищити циклічну довговічність зварного з'єднання до рівня основного металу.

Методи ультразвукового оброблення є ефективними для зміцнення та оздоблювання поверхні інструментальних сталей, які ведуть до покращення ефективності використання цього матеріалу для більш довготривалої роботи навіть в агресивних умовах зовнішнього середовища. Застосування ультразвукового ударного оброблення надає комплексний вплив на зварне з'єднання і значно збільшує застосування зварних з'єднань при виготовленні металоконструкцій [4,5].

Як приклад, було проведено аналіз як ультразвукове зміцнення впливає на якісні показники поверхні сталі 20ГЛ (Рис. 3).

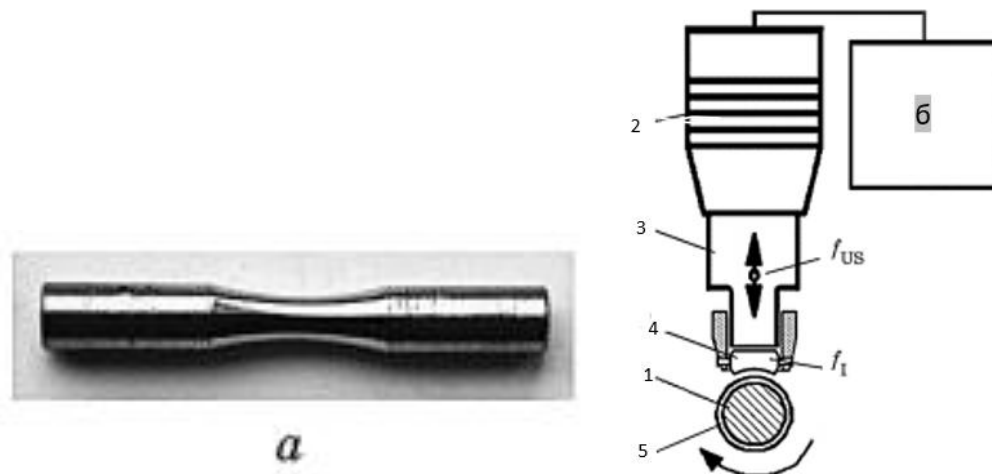


Рисунок 3 - Зовнішній вигляд зразка (а) і схема процесу УЗО (б): 1 — зразок, 2 — п'єзокерамічний перетворювач, 3 — ультразвуковий концентратор, 4 — бойок в ударній головці; 5 — модифікований поверхневий шар, f_{US} , f_I — частоти аноди, ультразвукового концентратора і ударів бойка [6]

УЗО може проводитися із використанням промислових роботів або верстатів. Механічні властивості вихідного стану сталі після УЗО вивчалися при проведенні випробувань на втому та мікротвердість. Швидкість обертання зразка при УЗО становила $N = 132$ об/хв., а позовжня подача $S = 0,1$ мм/об. При частоті коливань ультразвукового концентратора $f_{US} = 18,7$ кГц бойок, розміщений між торцем концентратора і зразком, здійснює багаторазове ударне навантаження поверхонь з частотою 1–3 кГц (Рис. 4).



Рисунок 4 - Зовнішній вигляд ударника [4]

Така схема ударного оброблення, забезпечуючи зниження шорсткості поверхні зразка, викликає структурні зміни та формування значних

стискальних залишкових макронапружень в його поверхневому шарі, товщина якого залежить від кінетичної енергії удару, яка задається потужністю генератора і амплітудою коливань ультразвукового концентратора. Результати експериментів показали що у порівнянні з вихідним станом мікротвердість зразків зростає після УЗО. При УЗО мікротвердість всіх зразків поступово збільшується. Величина зміцнення, викликаного деформацією при УЗО, також залежить від властивостей застосованих легувальних елементів, а саме, від їх кількості в твердому розчині та схильності до утворення карбідів і інших фаз із залізом. Аналіз розподілу мікротвердості по глибині поверхневих шарів після УЗО свідчить про те, що її максимальні значення спостерігаються на глибині 10–20 мкм від поверхні, перевищуючи значення на поверхні на 10%. Це може бути пов'язано з релаксаційними процесами в тонкому поверхневому шарі. При відстані більш ніж 20 мкм від обробленої поверхні мікротвердість починає знижуватися і наближається до значень вихідного стану сталі 20ГЛ.

У вихідному стані після нормалізації сталь 20ГЛ має сформовану зернисту структуру з розміром зерен від 3 до 15 мкм, де можна відрізнити феритну (світлі зерна) та перлітну складові (Рис. 5, а). Порівняльний аналіз результатів електронно-мікроскопічних досліджень внутрішньої структури приповерхневих шарів зразків вихідного стану до і після УЗО показує, що їх феритна складова зазнає при деформації істотних змін (Рис. 5, г).

Вони пов'язані з утворенням добре сформованих комірчастих структур, середній розмір комірок яких лежить в межах 0,25–1 мкм. Аналіз електронограми (Рис. 5, д) свідчить про незначні кутові азимутальні дезорієнтації між комірками. Висококутові межі зерен феритної складової, які добре проявляються у вихідному стані сталі 20ГЛ (Рис. 5, в), після УЗО в поверхневому шарі визначаються набагато гірше і найчастіше мають вигляд дисклінацій (обірваних залишків вихідних меж зерен різної довжини), які поступово переходять у межі комірок. У той же час перлітна складова зазнає значно менших змін, які полягають у появі дислокаційних скупчень, що

піддають фрагментації феритні прошарки перліту, а також у частковому розчиненні окремих областей цементитних пластин перліту (Рис. 5, е).

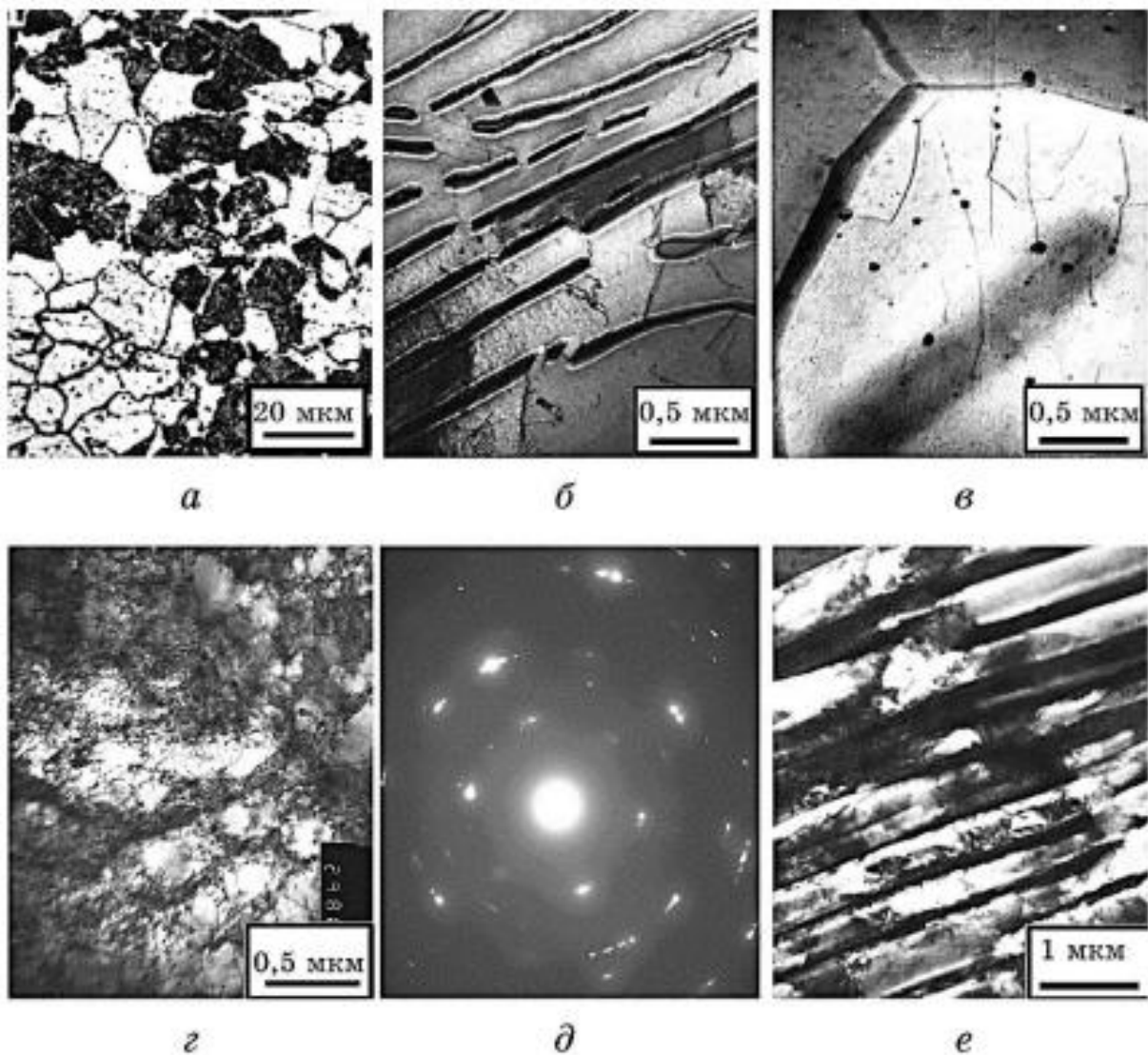


Рисунок 5 - Металографічне (а) й електронно-мікроскопічні (б–е) зображення структури перлітної (б, е) та феритної (в, г) складових у вихідному стані сталі 20ГЛ (в, г) та після її УЗО (г, е), де (д) — електронограма від області, наведеної на (г) [6]

У порівнянні з вихідним станом зразки, оброблені тільки УЗО, демонструють суттєво поліпшені втомні характеристики. Інша картина спостерігається в зразках, оброблених УЗО, в яких відбувається збільшення розміру локальної зони підвищеної дефектності. Це сприяє зміщенню зони зародження тріщини вглиб зразка — ближче до його центральної частини, що й приводить до підвищення кількості циклів навантаження до руйнування. Чисельні експерименти вказують на те, що внаслідок УЗО в поверхневому

шарі виникають стискальні напруження і знижується шорсткість поверхні, що є основними причинами росту опору втоми. Це створює умови для зникнення або зменшення концентраторів напружень, спроможних в умовах використаних амплітудних навантажень сприяти зародженню тріщини втоми. При таких високих напруженнях характер руйнування змінюється з втомного, яке містить одне чітко виражене місце зародження та росту тріщини, на квазікрихке руйнування з виявленням на більш рельєфній поверхні декількох, незалежно діючих тріщин, утворених завдяки поверхневим концентраторам.

Отже, можна зробити висновок, що застосована УЗО веде до зростання мікротвердості та суттєвого підвищення втомної міцності сталі 20ГЛ на базі 10^6 циклів за умов циклічних навантажень в межах діючих амплітуд навантажень 360–400 МПа. Втомна довговічність зразків після УЗО помітно зростає в діапазоні амплітуд 380–400 МПа у порівнянні з вихідним станом. Фінішне УЗО сталі 20ГЛ, окрім зниження шорсткості поверхні, яка сприяє заліковуванню або значному зменшенню найбільш небезпечних поверхневих технологічних концентраторів, забезпечує в приповерхневих шарах формування залишкових макронапружень стиснення та утворення дислокаційних комірчастих структур, що збільшує загальну кількість мікроструктурних концентраторів, зменшує ймовірність локалізації деформації та раннього зародження втомних тріщин [6].

- Оброблення ударом та оброблення кульками:

Ці методи включають обробку поверхні металу дрібними кульками або ударами, що може призвести до гартування і збільшення твердості поверхні.

- Плазмове напилення:

Плазмове напилення дозволяє наносити на поверхню металу тонкі шари спеціальних матеріалів, що покращують його характеристики, такі як твердість та зносостійкість. Цей метод використовують також в якості проведення «ремонтних робіт» поверхні металу.

- Електронно-променеве оброблення:

Цей метод використовує високоенергетичний електронний промінь для опромінення поверхні металу та збільшення його міцності та стійкості до корозії.

- Лазерне термооброблення (ЛТО):

Лазерне термооброблення – це сучасний метод, який можна використовувати для поверхневого зміцнення металевих виробів (Рис. 6).



Рисунок 6 – Лазерне гартування (термообробка) [7]

Метод ЛТО заснований на використанні лазерного випромінювання для нагрівання та оброблення поверхневих шарів матеріалу [8]. В результаті ЛТО відбувається швидке нагрівання поверхні металу до дуже високої температури, після чого слідує швидке охолодження, що призводить до зміни структури та властивостей поверхневого шару металу [9].

Вибір конкретного методу поверхневого зміцнення залежить від матеріалу, його цілей та вимог до кінцевого виробу. Основна мета полягає в тому, щоб посилити поверхню металу, не змінюючи його внутрішню структуру, що дозволяє досягти бажаних механічних властивостей.

1.3 Обґрунтування вибору методу поверхневого зміцнення інструментальних сталей

Після проведеного аналізу вже існуючих висококонцентрованих методів поверхневого зміцнення металевих виробів були обрані наступні – лазерне поверхневе оброблення в поєднанні з ультразвуковим.

Комбіноване лазерно-ультразвукове поверхневе оброблення є інноваційним методом, який поєднує переваги як лазерного оброблення, так і ультразвукового оброблення, для досягнення більш ефективних результатів.

Можна виділити наступні переваги:

- Збільшена мікротвердість - комбіноване лазерно-ультразвукове оброблення дозволяє значно збільшити мікротвердість (зносостійкість) поверхні матеріалу [9].
- Лазерний промінь підвищує температуру та індукує фазові перетворення, а потім ультразвукові хвилі сприяють глибокій деформації матеріалу, збільшуючи його твердість [10].
- Глибока зміцнена зона - цей метод забезпечує оброблення на глибину, що значно збільшує стійкість до зношування та ударних навантажень у порівнянні з традиційними методами [11].
- Збільшення опору втоми - комбіноване оброблення сприяє збільшенню опору втоми матеріалу, що важливо для деталей, що піддаються циклічним навантаженням [12].
- Збільшення стійкості до корозії - цей метод може покращити стійкість до корозії за рахунок зміни структури поверхні матеріалу та формування захисних оксидних шарів [13].
- Точне керування - комбіноване лазерно-ультразвукове оброблення дозволяє точно контролювати глибину, інтенсивність та область оброблення, що особливо важливо при обробці складних деталей.
- Зменшення деформацій - завдяки поєднанню лазерного та ультразвукового оброблення можна зменшити деформації та

спотворення у матеріалі, що особливо важливо для виробів з високою точністю.

- Мінімізація на навколишні області - комбіноване оброблення фокусується на конкретних ділянках, скорочуючи вплив на навколишні області деталі.
- Автоматизація процесу - застосування сучасних автоматизованих систем дозволяє підвищити продуктивність та якість оброблення.

Однак слід зазначити, що комбіноване лазерно-ультразвукове оброблення вимагає спеціалізованого обладнання та технічної компетентності, і воно може бути дорожчою порівняно з іншими методами поверхневого зміцнення. Тим не менш, ці додаткові інвестиції компенсуються підвищеними характеристиками матеріалу та довговічністю кінцевих виробів.

1.4 Лазерне поверхнєве зміцнення сталевих виробів високопотужними лазерами

Лазерне поверхнєве зміцнення сталевих виробів з використанням високопотужних лазерів - це метод, при якому лазерне випромінювання нагріває поверхневий шар сталі до високих температур, після чого слідує швидке охолодження. Цей процес змінює структуру матеріалу та підвищує його механічні характеристики, такі як твердість, міцність та стійкість до зносу. Можна виділити наступні етапи:

1. Підготовка поверхні - процес починається з підготовки поверхні сталі. Це включає видалення забруднень і оксидів за допомогою хімічного очищення або механічного оброблення.
2. Вибір параметрів лазера - оператор вибирає параметри лазерного випромінювання, такі як потужність, тривалість імпульсів та частоту залежно від необхідних характеристик оброблення.
3. Лазерна дія - лазерне випромінювання фокусується на поверхні сталі, і відбувається моментальне нагрівання. Висока інтенсивність лазера дозволяє досягти високої температури в дуже вузькій ділянці, що мінімізує вплив на іншу деталь.

4. Швидке охолодження - після нагрівання слідує швидке охолодження області, наприклад за допомогою повітряного потоку або рідини. Це призводить до формування нових структур, таких як мартенсит, що збільшує мікротвердість матеріалу.
5. Відділення охолоджених шарів - після завершення процесу лазерного опромінення, відокремлюється охолоджений шар матеріалу, і деталь піддається додатковій обробці, якщо це необхідно.
6. Контроль якості - проводиться контроль якості, щоб переконатися у відповідності до отриманих характеристик вимог та стандартів.

Лазерне поверхнєве зміцнення часто використовується в автомобільній промисловості для збільшення міцності та зносостійкості різних деталей, таких як шестерні, вали та колінчасті вали. Наприклад, високопотужний лазер може бути спрямований на зубці шестерні, що збільшить їхню твердість і зробить їх більш стійкими до зношування під час роботи.

У виробництві інструментів, таких як свердла, фрези та різці, використання лазерного поверхневого зміцнення дозволяє значно збільшити зносостійкість та тривалість їхньої служби. Лазер обробляє робочі кромки інструментів, що збільшує їх стійкість до зношування та дозволяє працювати з більш твердими матеріалами.

Різні типи лазерів мають свої унікальні характеристики, які визначають їхні особливості та застосування. Розглянемо основні типи лазерів: волоконний лазер, дисковий лазер, CO₂-лазер і діодний лазер, порівнюючи їх за різними параметрами (Табл. 1).

Загальні порівняльні аспекти:

Споживана енергія: Діодні лазери зазвичай менше витрачають енергії порівняно з іншими типами лазерів.

Ціна: Волоконні та діодні лазери можуть бути більш доступними за ціною порівняно з дисковими та CO₂-лазерами.

Діапазон хвиль: Кожен тип лазера має свій характерний діапазон хвиль, що впливає на їхню здатність оброблення різних матеріалів.

Таблиця 1 - Основні типи лазерів

	Принцип роботи	Ефективність	Стійкість	Застосування
Волоконний лазер	Використовує волоконний елемент для підсилення світлового сигналу	Висока, оскільки волокно дозволяє ефективно виводити лазерне випромінювання	Дуже стійкий до впливу зовнішніх факторів, таких як вібрації	Зазвичай використовується в медицині, науці та промисловості
Дисковий лазер	Використовує кристалічний диск для створення лазерного випромінювання	Висока ефективність в застосуванні обробці металів.	Залежить від конструкції, але в цілому стійкий до зовнішніх впливів.	Використовується в області оброблення матеріалів, наприклад, для різання та свердління металів
CO ₂ -лазер	Використовує газовий лазер на основі діоксиду вуглецю	Висока для оброблення не металевих матеріалів, таких як дерево, пластик і т. д.	Залежить від конструкції, менш стійкий до впливу вологості	Використовується для різання, гравірування та маркування матеріалів
Діодний лазер	Використовує напівпровідниковий елемент для генерації лазерного випромінювання	Ефективний із зниженим споживанням енергії	Залежить від конструкції, стійкий до впливу вологості і температурних змін	Використовується в багатьох галузях, включаючи комунікації, медицину, промисловість

Застосування лазерів залежить від конкретних вимог завдання, вартості та умов експлуатації.

Різниця між лазерним зміцненням низьковуглецевих сталей, середньовуглецевих сталей, високовуглецевих сталей та легованих сталей полягає в їх складі та механічних властивостях.

1.4.1 Лазерне зміцнення низьковуглецевих сталей

Низьковуглецеві сталі містять невелику кількість вуглецю (зазвичай менше 0,3%). Вони також можуть містити малі кількості інших елементів, таких як мідь та марганець.

Лазерне зміцнення може збільшити твердість і зносостійкість низьковуглецевих сталей, що робить їх придатними для застосування в автомобільній промисловості, виробництві інструментів та деталей машин.

1.4.2 Лазерне зміцнення середньовуглецевих сталей

Середньовуглецеві сталі містять помірну кількість вуглецю (зазвичай від 0,3% до 0,6%). Вони також можуть містити інші елементи, такі як марганець, кремній та нікель.

Лазерне зміцнення може збільшити міцність і зносостійкість середньовуглецевих сталей. Вони часто використовуються у виробництві деталей машин, трансмісій тощо, де потрібна висока міцність.

Як приклад, було проведено дослідження та аналіз термічного впливу лазерного опромінення на сталь 45. Утворення мартенситної фази в обробленій лазером поверхневій зоні підтвердило зміцнення сталі. Рівномірна твердість по обробленій поверхні була гарантована. Фаза пластинчастого мартенситу була помітна в повністю аустенітизованому стані шару, а мікротвердість поверхні збільшилася приблизно в 2,5 рази, що перевищує початкову мікротвердість матеріалу. Після оброблення утворюється аустеніт, і було виявлено, що локальна мікротвердість у зовнішньому шарі аустеніту значно впала. Ця особлива мікроструктура ефективно запобігає стиранню, сприяючи утворенню захисного оксидного шару [14].

1.4.3 Лазерне зміцнення високовуглецевих сталей

Високовуглецеві сталі містять значну кількість вуглецю (зазвичай більше 0,6%). Це робить їх більш жорсткими та крихкими.

Лазерне зміцнення може бути складнішим для високовуглецевих сталей через їх більш складну структуру. Однак, у деяких випадках, воно може бути використане для підвищення їхньої зносостійкості.

Як приклад, було проведено дослідження та аналіз термічного впливу лазерного опромінення на інструментальну сталь У8 (Рис. 7).



Рисунок 7 - Лазерне зміцнення матриці просічно-витяжного штампу, виготовленої із вуглецевої сталі У8 [15]

Аналіз отриманих даних показав, що лазерне зміцнення вуглецевої сталі У8 має ряд цікавих особливостей: зони термічного впливу, де відбувались структурно-фазові зміни мають чіткі границі, що дозволяє досить точно здійснювати непрямий контроль розподілу температур у поверхневому шарі, проводити оцінку точності моделювання теплових процесів. Мікротвердість поверхневих шарів сталі У8, підданих лазерному опроміненню на різних режимах (як з оплавленням поверхні, так і без оплавлення) слабо залежить від вихідного стану сталі, практично не залежить від режиму опромінення, якщо температура нагрівання перевищує критичну точку A_{c1} , у тому числі й температуру плавлення. У зміцнених шарах, отриманих на режимах з

оплавленням поверхні при низьких швидкостях оброблення, $< 0,4\text{ м/хв}$, у центрі зон на поверхні спостерігаються мікротріщини, що свідчать про високі термічні напруги, що розвивалися в процесі кристалізації й охолодження розплавленого металу. Розміри зміцненого шару при рівних умовах опромінення в попередньо загартованій сталі У8 приблизно на 20-30 % більше аналогічних зон у нормалізованій сталі [15].

1.4.4 Лазерне зміцнення легованих сталей

Леговані сталі містять додаткові елементи, такі як хром, молібден, ванадій та ін. Вони розроблені для специфічних вимог і мають унікальні хімічні склади.

Лазерне зміцнення може бути застосоване до легованих сталей для збільшення їх механічних властивостей в залежності від конкретних цілей, таких як підвищення стійкості до корозії або зношування.

Важливо відзначити, що ефективність лазерного зміцнення залежить від багатьох факторів, включаючи склад матеріалу, параметри лазера та вимоги до кінцевих характеристик виробу. Тому перед застосуванням лазерного зміцнення важливо ретельно оцінити конкретний матеріал та завдання, яке необхідно вирішити.

Як приклад, було проведено дослідження та аналіз термічного впливу лазерного опромінення на подвійний модельний спеціальний сплав заліза з хромом 1,1 %. Перед обробкою на поверхню зразка наносилась обмазка у вигляді алмазної пасти. Мікроструктурний аналіз сплаву показав структуру, яка характеризувалася наявністю двох зон: шару безпосередньо біля поверхні, де після травлення спостерігалися орієнтовані смуги і розташованого нижче шару, який являв собою сукупність крупних, слабо протравлених зерен. Відносно високі значення мікротвердості свідчать про значне насичення розплаву вуглецем у результаті розчинення вуглецевовмісних компонентів формування мартенситно-аустенітної структури внаслідок надшвидкого охолодження. В області, яка прилягає до межі ванни розплаву, формується більш крупнозерниста структура. Біля поверхні спостерігається світліша

частина шару, ніж біля границі з основною зоною оплавлення. Ця границя не є прямолінійною, а має вигляд ломаної кривої. Характер вибіркового витравлення окремих ділянок матеріалу нижче “світлого” шару може свідчити про значну неоднорідність хімічного складу. У “світлому” шарі такої неоднорідності не спостерігається, не виявляються ділянки, які відрізнялися різним ступенем травлення. Це може свідчити про те, що цей шар має значну хімічну стійкість. Ці особливі властивості виявленого “білого” шару зумовлені характером його структури, сформовані в умовах надшвидкого нагрівання та охолодження і одночасного насичення елементами проникнення у вуглецевмісному середовищі. На підставі експериментальних даних можна зробити висновок про те, що використання обмазки, яка являла собою маслоподібну вуглецевмісну речовину з великою в’язкістю, призводить до підвищення мікротвердості. Рентгенофазовий аналіз виявив виникнення в зоні аустенітно-мартенситної структури з високою мікротвердістю.

Метод лазерного легування вуглецевмісними обмазками може бути використаний для зміцнення поверхні сталей, які працюють в умовах контактних навантажень [16].

1.5 Аналіз методів інтенсифікації лазерного термозміцнення сталей методами інтенсивного пластичного деформування

Інтенсифікація лазерного термозміцнення сталей методами інтенсивного пластичного деформування являє собою процес, що включає поєднання лазерного впливу на матеріал і механічної деформації. Цей підхід може покращити механічні характеристики сталі, такі як твердість, міцність, зносостійкість та стійкість до корозії (Рис. 8).

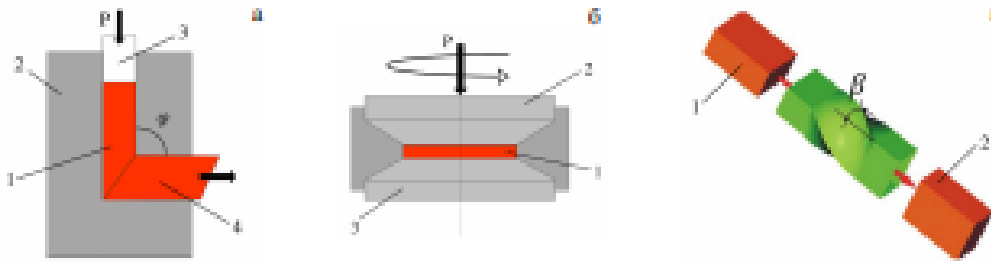


Рисунок 8 – Принципові схеми методів ІПД: а – РККП: 1 – зразок; 2 – оснащення; 3 – пуансон; 4 – в'язкопластичне середовище [3]; б – кручення під високим тиском: 1 – зразок; 2 – пуансон; 3 – оснащення [4, 5]; в – процес ГЕ: 1.2 – зразок відповідно до і після оброблення [17]

Методи інтенсивного пластичного деформування (ІПД) можна поділити на наступні:

- Об'ємне пластичне деформування - включає зміну форми зразка сталі через механічну дію із застосуванням високої деформуючої сили. Наприклад, методи, такі як кування та вальцювання, можуть бути використані для зміни форми та структури сталі.
- Ударне деформування - у цьому випадку застосовуються ударні навантаження, щоб змінити форму та структуру матеріалу. Це може бути досягнуто за допомогою молотків, пресів та іншого механічного обладнання.
- Пластична деформація під тиском - цей метод включає застосування тиску сталі для зміни її форми і структури. Прикладами є екструзія та гідравлічне формування.

Процес інтенсифікації лазерного термозміцнення проходить наступним чином: спочатку поверхня сталі опромінюється лазерним випромінюванням, що призводить до локального нагрівання. Висока потужність лазера може піднімати температуру в оброблюваній зоні до дуже високих значень.

Потім застосовуються механічні сили для деформації нагрітої області сталі. Це може включати кування, вальцювання або інші методи ПД, спрямовані на зміну форми і структури матеріалу.

Серед переваг інтенсифікації лазерного термозміцнення методами ПД хотілося б виділити [17]:

- Поліпшена глибина оброблення - інтенсивне пластичне деформування може підвищити глибину, через яку лазерне термозміцнення впливає на сталь.
- Збільшення мікротвердості - поєднання лазерного нагрівання та ПД може призвести до більш інтенсивних процесів мартенситоутворення та збільшення мікротвердості матеріалу.
- Поліпшення механічних властивостей - процес може збільшити міцність, втомну стійкість і стійкість до зносу сталі.
- Мінімізація на навколишні області - такий метод фокусується на конкретних ділянках, що мінімізує деформації та спотворення в матеріалі.

Серед недоліків хотілося б виділити [17]:

- Складність процесу - інтенсивне пластичне деформування потребує високої технічної компетентності та спеціалізованого обладнання.
- Обмеження за формою - не всі деталі можуть бути оброблені з використанням цього методу, оскільки він вимагає доступу до поверхні та можливості застосування механічних сил.

Інтенсифікація лазерного термозміцнення методами ПД є потужним методом для поліпшення механічних властивостей сталей і може бути застосована в різних галузях, де потрібно підвищення продуктивності та стійкості матеріалів.

1.6 Умови та рішення для підвищення корозійної стійкості

Корозія - це процес руйнування та розкладання матеріалів під впливом хімічних або електрохімічних реакцій із навколишнім середовищем. Основний вид корозії, який найбільш широко відомий, - це металева корозія, за якої металеві поверхні зазнають руйнівного впливу (Рис. 9, 10) [13]. Однак корозія

може впливати не тільки на метали, а й на інші матеріали, такі як полімери, кераміка та скло.



Рисунок 9 – Металева корозія на матриці

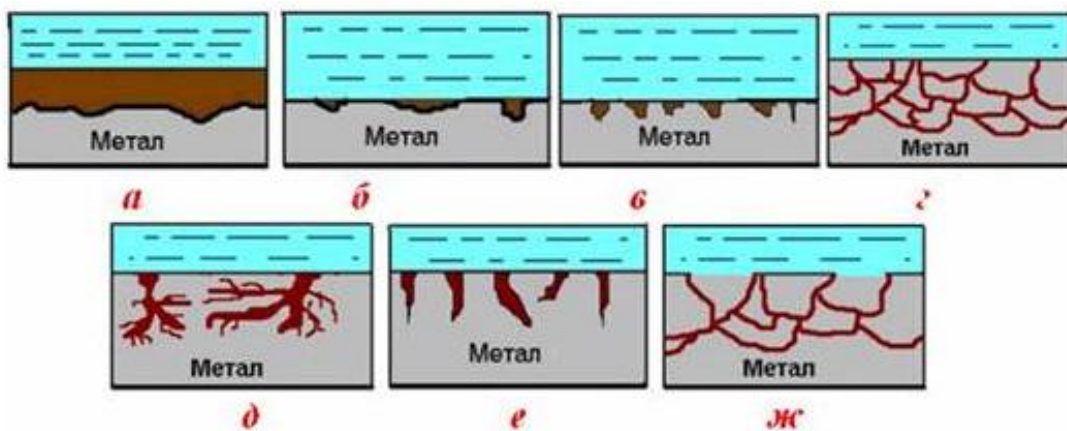


Рисунок 10 - Види корозії за характером руйнування металу: а) суцільна, б) місцева плямиста; в) місцева виразкова; г) місцева міжкристалітна; д) місцева розтріскувальна; е) місцева пітинг; ж) суцільна селективна (вибірні) [18]

Підвищення корозійної стійкості інструментальних матеріалів є надзвичайно важливим для забезпечення їх довговічності та ефективності в умовах, де вони можуть піддаватися впливу вологи, агресивних середовищ, хімічних речовин та інших факторів, здатних викликати корозію. Ось кілька методів та засобів, що використовуються для підвищення корозійної стійкості інструментальних матеріалів [19]:

- Вибір стійких до корозії матеріалів - використання інструментальних матеріалів, які за своєю природою є стійкими до корозії, таких як

нержавіючі сталі або спеціалізовані корозійностійкі сплави. Ці матеріали зазвичай містять хром, нікель, молібден та інші елементи, що забезпечують захист від корозії.

- Покриття та захисні покриття - нанесення на поверхню інструменту спеціальних захисних покриттів, таких як хромування, цинкування, нікелювання або покриття на основі наноматеріалів. Ці покриття створюють бар'єр, що запобігає контакту металу з корозійно-активними середовищами.
- Пасивація - процес пасивації включає утворення тонкого пасивуючого шару на поверхні матеріалу, що зменшує його схильність до корозії. Цей процес зазвичай застосовується до нержавіючої сталі, створюючи захисний оксидний шар.
- Модифікація хімічного складу - введення в хімічний склад матеріалу елементів, таких як мідь або алюміній, які можуть сприяти утворенню оксидних захисних шарів, зменшуючи ймовірність корозії.
- Управління тепловими обробками - контроль теплових обробок, таких як загартування та відпуск, щоб створити оптимальну мікроструктуру та фазовий склад, що сприяють підвищеній корозійній стійкості.
- Застосування антикорозійних добавок - додавання антикорозійних добавок, таких як інгібітори корозії, які можуть запобігати розвитку процесів корозії.
- Контроль довкілля - забезпечення того, щоб інструменти не зазнавали впливу агресивних хімічних середовищ або високої вологості, що може знизити ймовірність корозії.
- Регулярне технічне обслуговування - проведення регулярного технічного обслуговування, що включає очищення, використання мастила та перевірку стану поверхні інструментів, щоб своєчасно виявляти та запобігати початку процесів корозії.

Ефективні методи підвищення корозійної стійкості залежать від конкретного матеріалу, його застосування та умов експлуатації. Комбінування кількох методів може забезпечити найкращий результат.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Аналіз вихідних даних для проектування технологічного процесу

Штамп – це інструмент або пристрій, який використовується для механічного чи гідравлічного пресування матеріалу з метою надання йому певної форми. У технічному контексті штампи часто використовуються для виготовлення деталей з листового металу.

Процес штампування зазвичай включає такі етапи:

1. Підготовка матеріалу: Лист металу заготовляється з певними розмірами та товщиною, що відповідають вимогам виробництва.
2. Закріплення матеріалу: Лист металу встановлюється в пресі штампування, де його закріплюють так, щоб він не рухався під час процесу.
3. Пресування: Штамп опускається на поверхню листа металу з певною силою. Це може бути виконано або механічно, з використанням пружин, або гідравлічно, із застосуванням рідини під тиском. Штамп має форму, що відповідає бажаній кінцевій формі деталі.
4. Формування деталі: В результаті пресування матеріал піддається пластичній деформації, набуваючи форми штампу. Це може включати вирізання зайвих частин матеріалу, формування виступів, вигинання та інші операції в залежності від конкретного дизайну деталі.
5. Витяг готової деталі: Після завершення пресування, штамп піднімається, і готова деталь витягується з преса.

Штампування широко використовується у виробництві різних металевих виробів, таких як кузови автомобілів, кришки, елементи кріплення та інші деталі. Воно забезпечує високу точність та повторюваність форми деталей, що робить цей метод виробництва ефективним та економічним.

Штампи можна класифікувати за різними критеріями, включаючи тип використовуваної енергії, конструкцію, призначення та характеристики процесу. Виділяють кілька основних категорій класифікації штамів:

1. За енергією:

- Механічні штампи: Використовують механічну енергію створення сили пресування. Включають пружинні чи механічні преси.
- Гідравлічні штампи: Працюють на основі принципу передачі енергії рідини під тиском. Забезпечують більш рівномірне розподілення тиску по всій поверхні.
- Пневматичні штампи: Використовують стиснене повітря для преса. Зазвичай застосовуються у легкій промисловості.

2. За конструкцією:

- Поодинокі операційні штампи: Виробляють одну операцію за цикл. Часто використовуються для простих операцій, таких як вирізання отворів.
- Багатопозиційні штампи: Можуть виконувати кілька операцій на одному циклі. Ефективні для складних деталей, які потребують кількох етапів оброблення.

3. За призначенням:

- Штампи для згинання та вирубки: Застосовуються для формування та вирубування листового матеріалу.
- Штампи для формування: Використовуються для надання форми деталям, таким як кузовні частини автомобілів.
- Згинальні штампи: Призначені для виготовлення виробів із вигнутими поверхнями.

4. За характеристиками процесу:

- Глибокотягнуті штампи: Застосовуються для створення глибоких порожнин у деталях.
- Штампи з виштовхуванням: Використовуються для створення виступів на поверхні деталей.
- Згинальні штампи: в даному випадку призначені для згинання матеріалу без утворення вирізів.

Матриця у штампі виконує ключову роль у процесі формування. Матриця - це частина штамп, яка приймає удари від робочої частини штамп і формує

матеріал, що обробляється. Матриця має форму, що відповідає необхідній формі або вирізу деталі. Її форма визначає форму кінцевого продукту, а також впливає на точність і якість деталей, що виготовляються. Матеріали матриць зазвичай вибираються з урахуванням їхньої міцності та зносостійкості, оскільки вони піддаються багаторазовим ударам від штампу. Це можуть бути різні сталі, переважно використовують сталь Х12М або Х12МФ.

2.2 Проектування операційного технологічного процесу виготовлення деталі «Матриця» та її технічне обґрунтування

Проектування операційного технологічного процесу виготовлення деталі «Матриця» включає в себе наступні етапи:

1. Заготівельна операція.

Відбувається відрізання заготовки з листа сталі Х12МФ – 30 мм.

Розмір заготовки складає 205х105х30.

2. Фрезерна операція.

Виконується попереднє фрезерування усіх поверхонь деталі з припуском 1 мм на чистову обробку.

3. Багатоцільова операція з ЧПК

Виконується свердління та нарізання нарізі, та свердління технологічних отворів для дротовірної електроерозійної операції (Рис. 11).

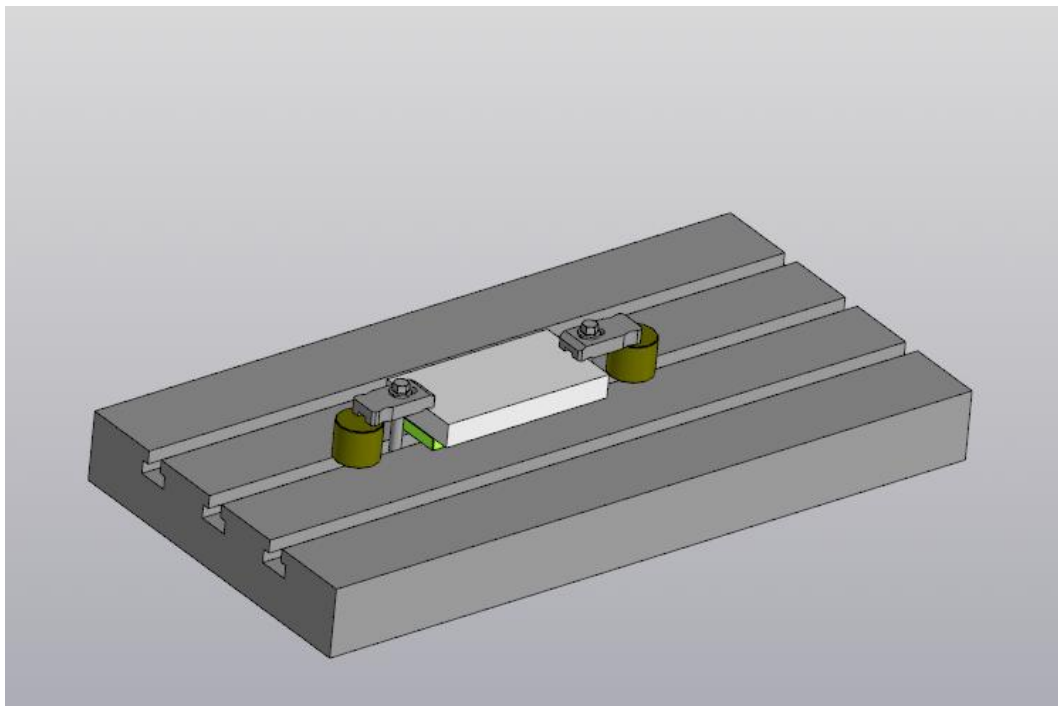


Рисунок 11 - Закріплення заготовки на столі верстата Chiron Mill800

Керуюча програма для фрезерного верстата Sinumerik 840d створена за допомогою Future Cam має наступний вигляд:

N35 G00 G17 G40 G49

N40 G91 Z0

N45 G54

N50 T1 G43 H1

N55 S200 G94 F0. M3

N60 (SPOTDRILL)

N65 G0 G90 X-185.0 Y-12.0

N70 Z50.0 M8

N75 Z28.0

N80 G81 R28.0 Z20.394 F0.

N85 G80

N90 Z50.0

N95 (DRILL)

N100 G30 G91 Z0 M09

N105 G49 G90

N110 M0

N115 T2 G43 H2

N120 S1200 G94 F0. M3

N125 G0 G54 X-185.0 Y-12.0

N130 Z50.0 M8

N135 Z28.0

N140 G83 R28.0 Z-1.201 Q3.0 F0.

N145 G80

N150 Z50.0

N155 G0 G91 G28 Z0 M09

N160 G49 G90 M0

N165 M30

4. Термічна обробка.

Проводиться об'ємне гартування до твердості 60...62 за Роквеллом.

5. Плоско-шліфувальна операція.

Проводиться чистове шліфування (Рис. 12) габаритних поверхонь матриці.

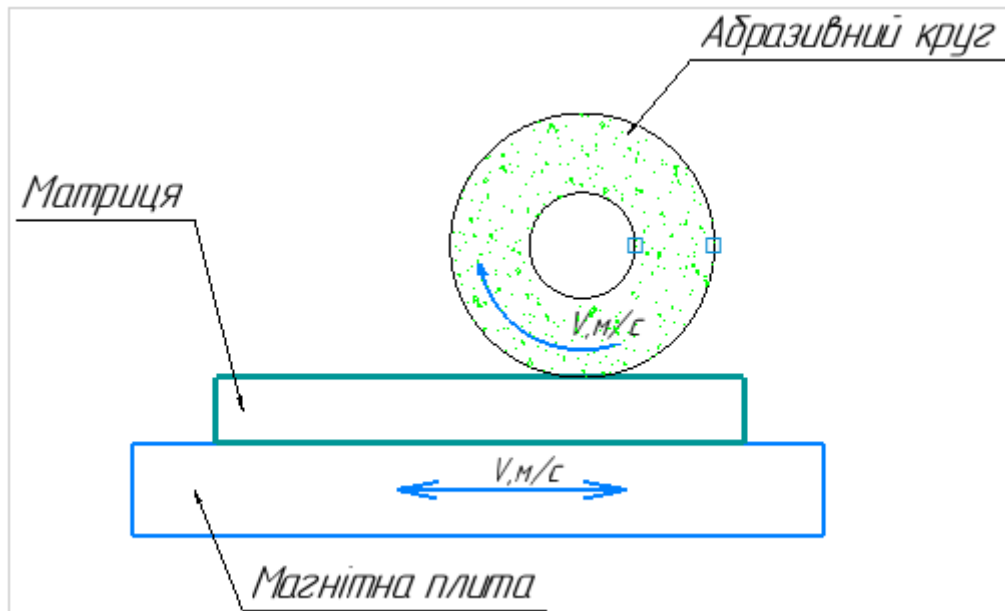


Рисунок 12 - Шліфувальна операція

6. Електроерозійна дротовирізна операція (Рис. 13, 14).

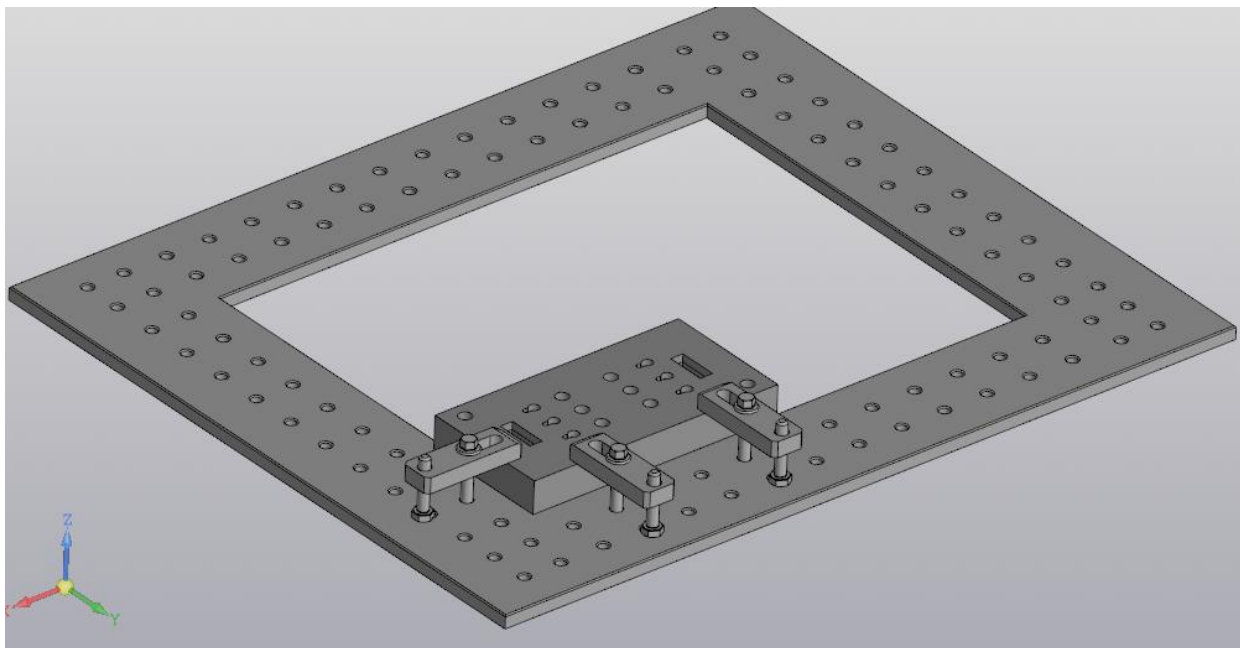


Рисунок 13 - Закріплення деталі на столі електроерозійного верстата Makino Duo43

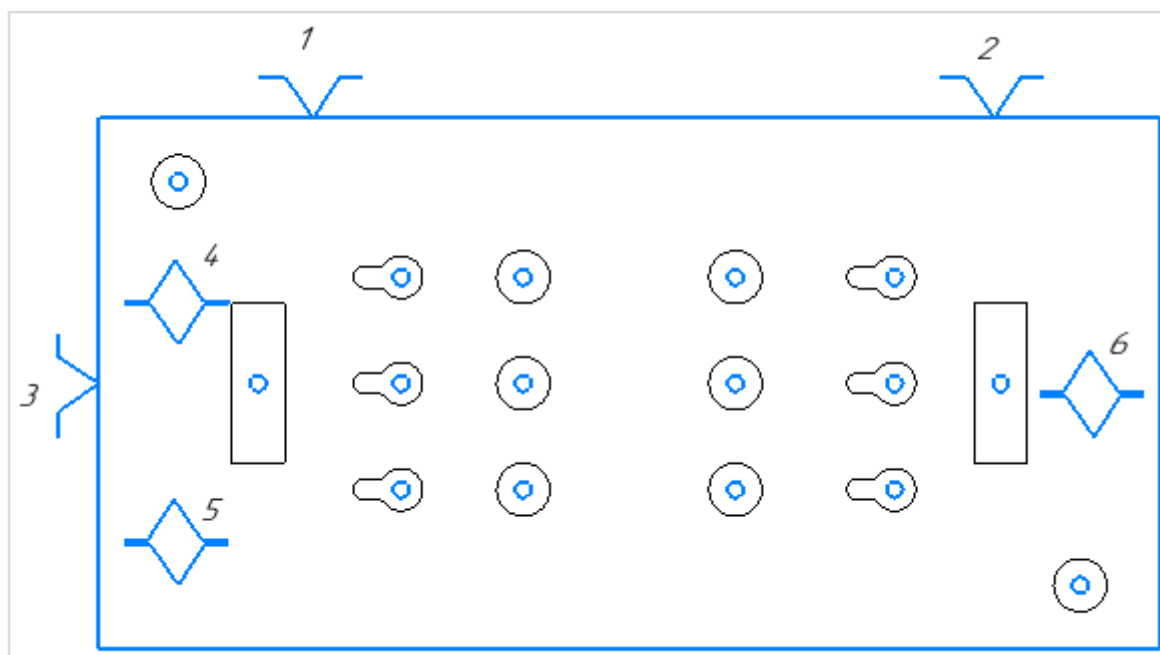


Рисунок 14 - Схема базування деталі

Керуюча програма для електроерозійного верстата створена за допомогою Future Cam має наступний вигляд:

G90
G92 X-85.0 Y38.0
E0 D0
G42 G1 X-80.0 M17
G2 X-90.0 I-5.0 J0.
X-80.0 I5.0 J0.
G40 G1 X-85.0
G0 X-65.0 Y-12.0
E0 D0
G42 G1 Y-15.0 M17
X-75.0
Y15.0
X-65.0
Y-15.0
G40 Y-12.0
G0 X-43.8 Y19.4
E0 D0
G42 G1 X-46.2 Y17.6 M17
G3 X-47.0 Y18.0 I-0.8 J-0.6
G1 X-50.0
G2 Y22.0 I0. J2.0
G1 X-47.0
G3 X-46.2 Y22.4 I0. J1.0
G2 Y17.6 I3.2 J-2.4
G40 G1 X-43.8 Y19.4
G0 X-20.0 Y20.0
E0 D0
G42 G1 X-15.0 M17
G2 X-25.0 I-5.0 J0.

X-15.0 I5.0 J0.

G40 G1 X-20.0

M30

У матриці можна виділити кілька вразливих місць (Дод. А):

- Краї та кути: робочі краї та кути матриці можуть піддаватися підвищеним напруженням та зносу, особливо при високих темпах виробництва. Тут можуть виникати тріщини та зони деформації.
- Центральна частина: якщо матриця має велику площу в центрі, вона може бути більш схильною до деформації через тиск штампу. Це може призвести до викривлення або навіть руйнування матриці.
- Поверхнєве покриття: якщо матриця має спеціальне покриття для поліпшення її зносостійкості, то ця поверхнева обробка також може бути вразливою. При зносі покриття може статися втрата якості формування або вирубування.
- Сполучні частини: якщо матриця складається з кількох частин, місця їх з'єднання можуть стати місцем для тріщин або деформацій.
- Отвори та вирізи: місця з отворами або вирізами можуть бути більш вразливими для зношування, особливо якщо вони знаходяться в зонах частого контакту з матеріалом.
- Різкі краї та переходи: різкі кути та переходи можуть стати зонами концентрації напруг, що робить їх більш уразливими для зносу та руйнування.
- Місця з високим навантаженням: там, де матриця зазнає найбільшого навантаження від штампу, можуть виникнути проблеми, такі як деформації, тріщини або зношування.

Отже, щоб дослідити матрицю на жорсткість і міцність було прийнято рішення побудувати 3Д-модель даної матриці (Рис. 15) і провести над нею аналіз на напружений деформований стан, для того, щоб виявити її проблемні ділянки наочно.

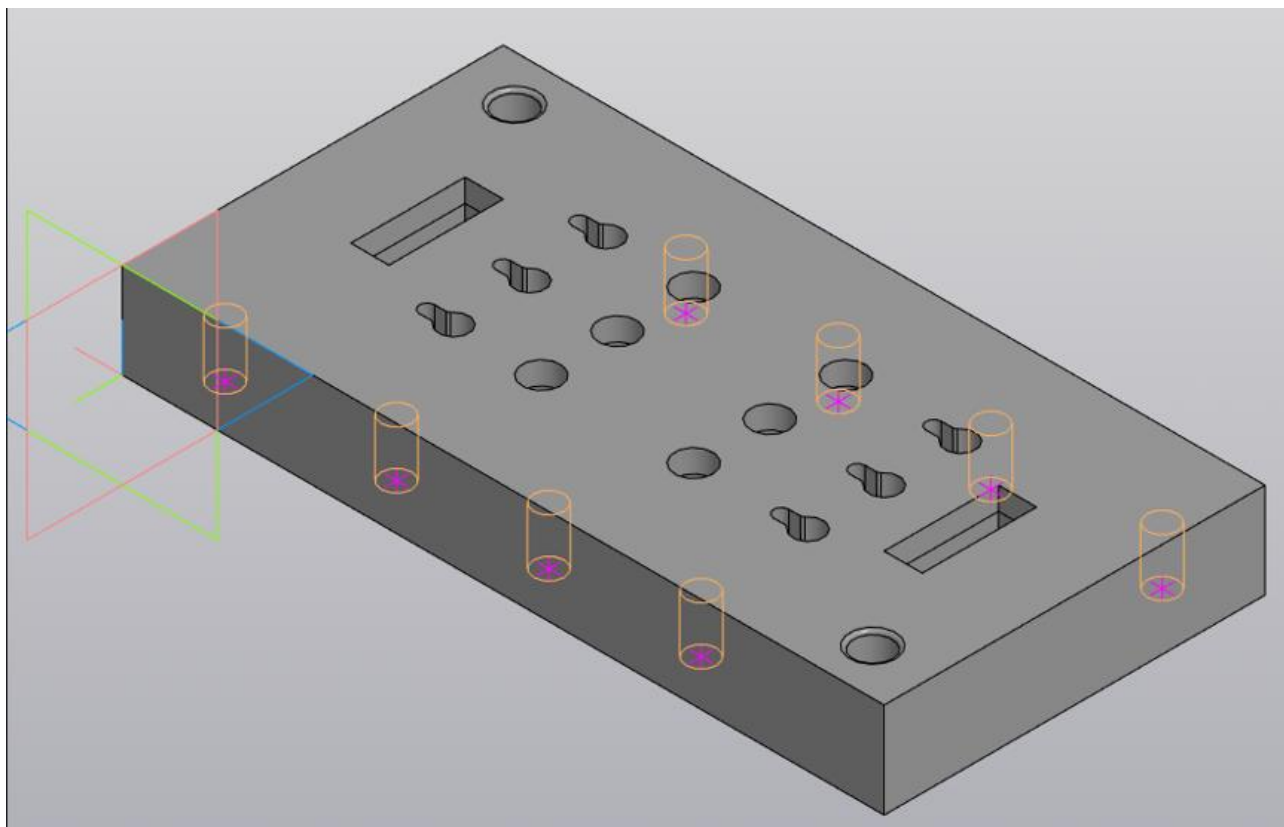


Рисунок 15 – 3D-модель досліджуваної матриці вирубного штампу

Аналізуючи карту результатів розрахунку, виявляємо проблемні ділянки матриці вздовж її контуру, які сприймають найбільше навантаження під час вирубки деталі (Рис. 16). Чим більше навантаження, тим більше отвори стають концентраторами напружень.

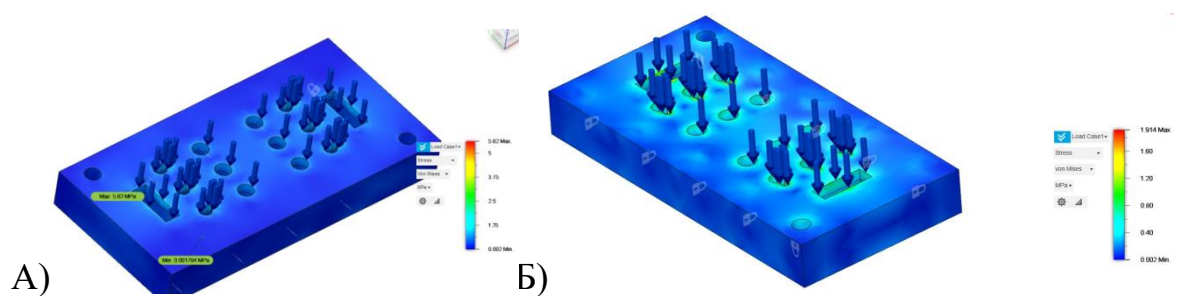


Рисунок 16 - Тривимірна модель досліджуваної матриці штампу з результатами отриманих розрахунків

Тому ця ділянка контуру матриці часто руйнується, що призводить до зупинки процесу виробництва [20, 21]. Так як розробляти простішу модель матриці не має сенсу, можна було б спробувати покращити матеріал, з якого вона виготовляється.

2.3. Термофізична модель лазерного термозміцнення штампових сталей волоконним лазером в поєднанні із сканувальною оптикою

Термофізична модель лазерного термозміцнення штампових сталей дисковим лазером з використанням сканувальної оптики являє собою складний процес, що включає взаємодію лазерного випромінювання з матеріалом, теплоперенесення, плавлення металу і швидке затвердіння (Рис. 17, 18).

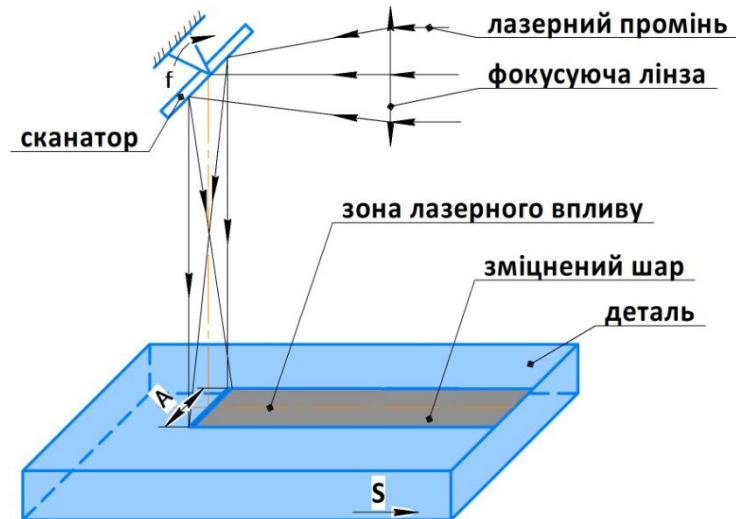


Рисунок 17 - Схематичне зображення лазерного термооброблення

Основні етапи термофізичного моделювання включають в себе:

1. Визначення фізичних властивостей матеріалу - враховуються термофізичні властивості матеріалу, такі як теплопровідність, теплоємність, щільність, температурна залежність цих параметрів та інші. Інформація про фазові переходи, такі як плавлення та твердіння, також включається в модель.
2. Розрахунок поглинання лазерного випромінювання - Використовуються рівняння для розрахунку поглинання лазерного випромінювання матеріалом залежно від довжини хвилі лазера та оптичних властивостей матеріалу. Облік зміни оптичних властивостей із підвищенням температури через плавлення.
3. Моделювання теплоперенесення - рівняння теплопровідності використовується для визначення розподілу температури у матеріалі.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

де:

ρ - щільність матеріалу,

c - теплоємність матеріалу,

T - температура,

t - час,

k - коефіцієнт теплопровідності матеріалу,

x - просторова координата.

Враховуються теплові потоки від лазерного випромінювання, конвективні потоки та тепловідведення через підкладку.

4. Облік термічної деформації – моделюється термічна деформація матеріалу внаслідок нерівномірного нагрівання та охолодження. Розглядається вплив термічної напруги на форму заготівлі.
5. Моделювання процесу плавлення та затвердіння - використовуються рівняння теплопровідності та моделі фазових переходів для визначення областей плавлення та затвердіння. Враховується зміна мікроструктури матеріалу при затвердінні.
6. Контроль процесу сканувальною оптикою - керування параметрами сканування лазерного променя для точного направлення лазерного променя відповідно до необхідної геометрії поверхні, що оброблюється. Оптимізація параметрів сканування для мінімізації деформації та максимізації якості шару.
7. Моніторинг якості зміцненого шару - використання датчиків для вимірювання температури, швидкості нагрівання та інших параметрів у режимі реального часу. Зворотний зв'язок із системою керування для корекції параметрів за потреби [22].

Цей процес вимагає інтеграції різних фізичних та математичних моделей, а також експериментальних даних для точного опису взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом та формування шару при лазерному термозміцненні.

2.4. Особливості ультразвукового ударного зміцнення великогабаритних виробів багатобойковим наконечником

Ультразвукове ударне зміцнення та оздоблювання з використанням багатобойкового наконечника є процесом, в якому ультразвукові хвилі (динамічна дія) застосовуються для інтенсифікації процес поверхнево-пластичного деформування з використанням спеціального інструменту для оброблення великогабаритних виробів (Рис. 18, 19). Цей метод може бути використаний для покращення експлуатаційних властивостей матеріалів, таких як міцність та втомна стійкість.

Нижче представлені основні етапи та особливості цього процесу:

- Вибір обладнання:
 - Вибір ультразвукового генератора та багатобойкового наконечника, що відповідають розмірам та характеристикам великогабаритних виробів.
 - Установка параметрів, таких як частота ультразвукових хвиль, амплітуда та тривалість імпульсів відповідно до вимог оброблення.
- Підготовка поверхні - очищення поверхні виробу від забруднень, оксидів та масел, які можуть вплинути на ефективність ультразвукового впливу.
- Фіксація виробу - забезпечення надійної фіксації великогабаритного виробу для запобігання його переміщенню в процесі оброблення.
- Накладання ультразвукових хвиль:
 - Напрямок багатобойкового наконечника з ультразвуковими хвилями на поверхню виробу.

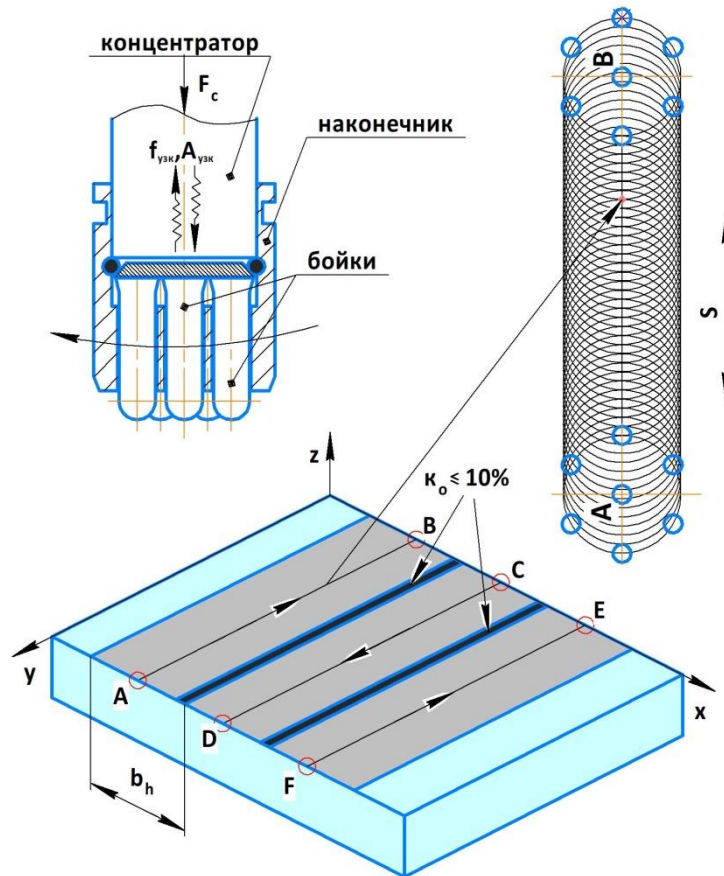


Рисунок 18 - Схематичне зображення ультразвукового оброблення багатобойковим наконечником

- Надсилання ультразвукових імпульсів через наконечник для створення ударних хвиль на поверхні.
 - Управління параметрами ударів:
- Регулювання частоти, амплітуди та тривалості ультразвукових імпульсів залежно від типу матеріалу та необхідних властивостей.
- Моніторинг параметрів у реальному часі та корекція за потреби.
 - Оброблення різних зон:
 - Поділ поверхні виробу на зони для точного оброблення.
 - Можливість фокусування ультразвукових хвиль на певних ділянках для оптимізації процесу.
 - Контроль температури - моніторинг температури оброблюваної зони для запобігання перегріву та негативного впливу на властивості матеріалу.

- Оцінка результатів - проводяться контрольні випробування для оцінки покращення металевих властивостей виробу після ультразвукового ударного зміцнення.
- Безпека - дотримання заходів безпеки під час роботи з ультразвуковим обладнанням, включаючи захист операторів від впливу ультразвукових хвиль.

Ці етапи утворюють загальний процес ультразвукового ударного зміцнення з використанням багатобойкового наконечника для оброблення великогабаритних виробів [23].

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Обладнання та методика проведення експериментальних досліджень

В рамках даної роботи, виконується експериментальне дослідження аналізу впливу лазерного поверхневого зміцнення та комбінованого лазерного-ультразвукового поверхневого зміцнення на морфологію поверхні, твердості та мікроструктуру, твердість та залишкові напруження в приповерхневих шарах високохромистої інструментальної сталі X12МФ (AISI D2 та DIN 1.2379 відповідно до американського та німецького аналогу). Дана сталь використовується для виготовлення профільних роликів, секцій кузовних штамів складної форми, матриць при формуванні листового металу, а також матриці та пуансони вирубних штамів.

Локальне лазерне зміцнення забезпечує швидке нагрівання приповерхневих шарів до температури, що перевищує температуру фазового перетворення, а потім оброблювана поверхня швидко охолоджується за допомогою процесу самогартування. Утворена зона термічного впливу зміцнюється завдяки швидкому процесу нагрівання/охолодження, що впливає на мікроструктуру, фазовий склад і карбідоутворення по глибині зміцненого шару. І навпаки, ультразвукове поверхнєве оброблення індукує множинні ударні навантаження, що забезпечують інтенсивну пластичну деформацію приповерхневих шарів, а зміцнення відбувається за рахунок дислокаційного процесу.

В даній роботі, для лазерного поверхневого зміцнення використовувався верстат Kondia Aktinos B500 з числовим програмованим керуванням і загальною робочою площею 500×300 мм (Рис. 19 а), тоді як для ультразвукового поверхневого зміцнення та оздоблювання верстат Dynamite з числовим програмованим керуванням (Рис. 19 б).

2D-сканатор Scanlab Hurry Scan 25 із загальною площею сканування у фокальній площині 120×120 мм розміщували у верстаті (оброблюваному центрі), який містить два поворотних дзеркала, які дозволяють переміщувати лазерний промінь по прямокутній області на поверхні зразка.

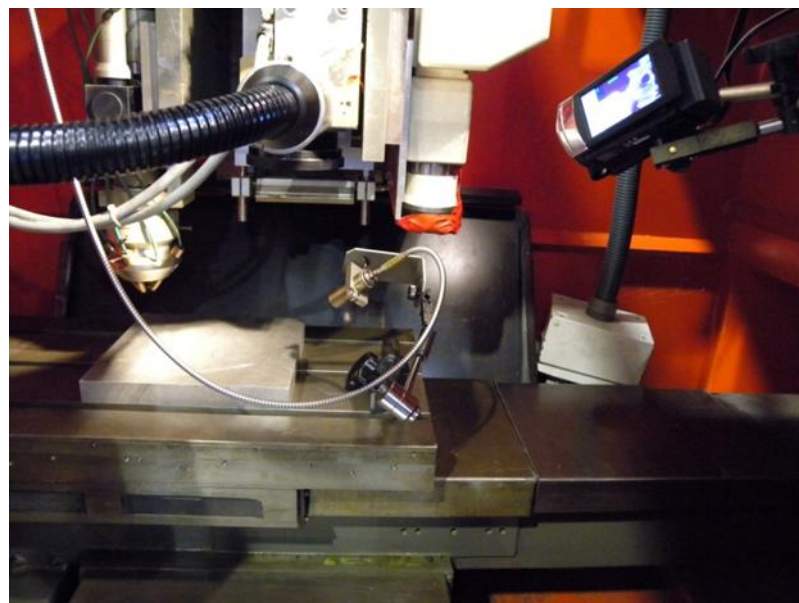


Рисунок 19 – Загальний вигляд обладнання для лазерного термооброблення (а)
та для ультразвукового ударного оброблення (б)

Лазерне випромінювання транспортувалося оптичним волокном до сканувальної головки волоконного лазера Rofin Sinar FL010, який працював у безперервному режимі з максимальною вихідною потужністю 1 кВт і довжиною хвилі $\lambda = 1,07 \text{ мкм} \pm 10 \text{ нм}$ (Рис. 20 а).



(a)



(б)

Рисунок 20 – Загальний вигляд використаного лазера Rofin Sinar FL010 (a) та сканувальної оптики і пірометра (б)

Для вимірювання температури в зоні опромінення лазерним променем використовували двоколірний пірометр Impac Igar 12LO (Рис. 20 б) і спеціальний пропорційний інтеграл.

3.1.1. Матеріал

Зразки із інструментальної сталі X12МФ, розмірами ~ 70 мм $\times$ ~ 70 мм $\times$ ~ 10 мм, нагрівали до 850 °С, а потім повільно (10 °С на годину) охолоджували в печі до 650 °С з подальшим охолодженням на повітрі. Хімічний склад і механічні властивості досліджуваної сталі наведені в Таблиці 2, де σ_Y – межа текучості при розтягуванні, σ_U – межа міцності при розтягуванні, δ – відносне

видовження, E – модуль Юнга, μ – коефіцієнт Пуассона, ρ – щільність, HB – коефіцієнт Брінелля.

Таблиця 2 - Хімічний склад і механічні властивості сталі X12МФ

Хімічний склад, %									
C	Cr	Mo	V	Mn	Si	Ni	Cu	P, S	Fe
1.55	11.3	0.8	0.8	0.4	0.3	0.4	0.3	0.03	~84
Механічні властивості									
σ_Y [MPa]	σ_U [MPa]		δ [%]	E [GPa]		μ	ρ [kg/m ³]	HB	
≥ 320	≥ 710		≥ 16	200		0.25	7700	210	

Вихідна структура досліджуваної сталі складається із легованого α -фериту і карбідних фаз. Сталі із вмістом 1,25–1,45 % вуглецю є сталями ледебуритного класу, тобто містять у литому стані карбідну евтектики. Твердість складає HRC 62–64 після гартування. Ці сталі містять високу кількість карбідоутворювальних елементів, а підвищений вміст вуглецю і хрому забезпечує утворення підвищеної кількості карбідів хрому (M7C3, M23C6). Загальна кількість карбідів складає близько 20%. Таким чином, сталь X12МФ з високим вмістом хрому відноситься до напівтеплостійких сталей, які зазвичай використовуються для виготовлення штамів, пуансонів, роликів з твердістю 45–52 HRC та при температурі експлуатації до 700°C.

3.1.2. Лазерне поверхнєве термозміцнення

У сучасному машинобудуванні розробляються та використовуються нові інноваційні методи модифікування поверхні металевих виробів для покращення експлуатаційних властивостей та продуктивності процесу. Відомо, що надійність і довговічність кінцевих (готових) виробів залежить від властивостей поверхневих шарів, які в першу чергу взаємодіють з робочим середовищем. Для вирішення цієї проблеми в машинобудуванні, суднобудуванні, літакобудуванні використовуються висококонцентровані

методи поверхневого зміцнення сталевих деталей (штампів і пуансонів, корпусів суден, лопатей гвинтів, крил, лопатей вертольотів, зубчастих коліс тощо) [26]. Процес лазерного поверхневого зміцнення в основному використовується для створення зносостійкого і корозійно-стійкого поверхневого шару, зберігаючи геометрію поверхні.

На відміну від звичайних методів термооброблення, лазерне термооброблення дозволяє вибірково нагрівати найбільш критичні ділянки на поверхні деталі з високою швидкістю нагрівання (охолодження) і коротким часом взаємодії, забезпечуючи дрібнозернисту мартенситну структуру із залишковими напруженнями стиску у приповерхневих шарах. Як результат, немає необхідності застосовувати будь-які рідкі або газоподібні середовища для гартування аустенітизованої поверхні великих виробів під час процесу лазерного структурно-фазового зміцнення поверхні.

Відомо, що поверхневе зміцнення безперервних або імпульсних лазерів здійснюється в розбіжності пучка шляхом дефокусування лазерного променя. У той же час неоднорідність щільності потужності в плямі збільшується при сильному розфокусуванні.

Попередній інтервал температур лазерного поверхневого зміцнення без плавлення визначено відповідно до потрібної системи залізо–вуглець–хром фазової діаграми [27].

Швидкість сканування лазерного променя контролювалася за допомогою програмного забезпечення сканера. Оптичне волокно забезпечило циліндричну пляму ~ 1 мм у діаметрі та багатомодовий розподіл енергії у фокальній площині. Для підтримки постійної температури в робочій зоні використовувався регулятор та спеціальне програмне забезпечення.

В даній роботі, селективне лазерне поверхневе зміцнення проводили зі швидкістю сканування $V = 1000$ мм/с шляхом утворення лазерної доріжки шириною 10 мм на поверхні зразка (Рис. 21).

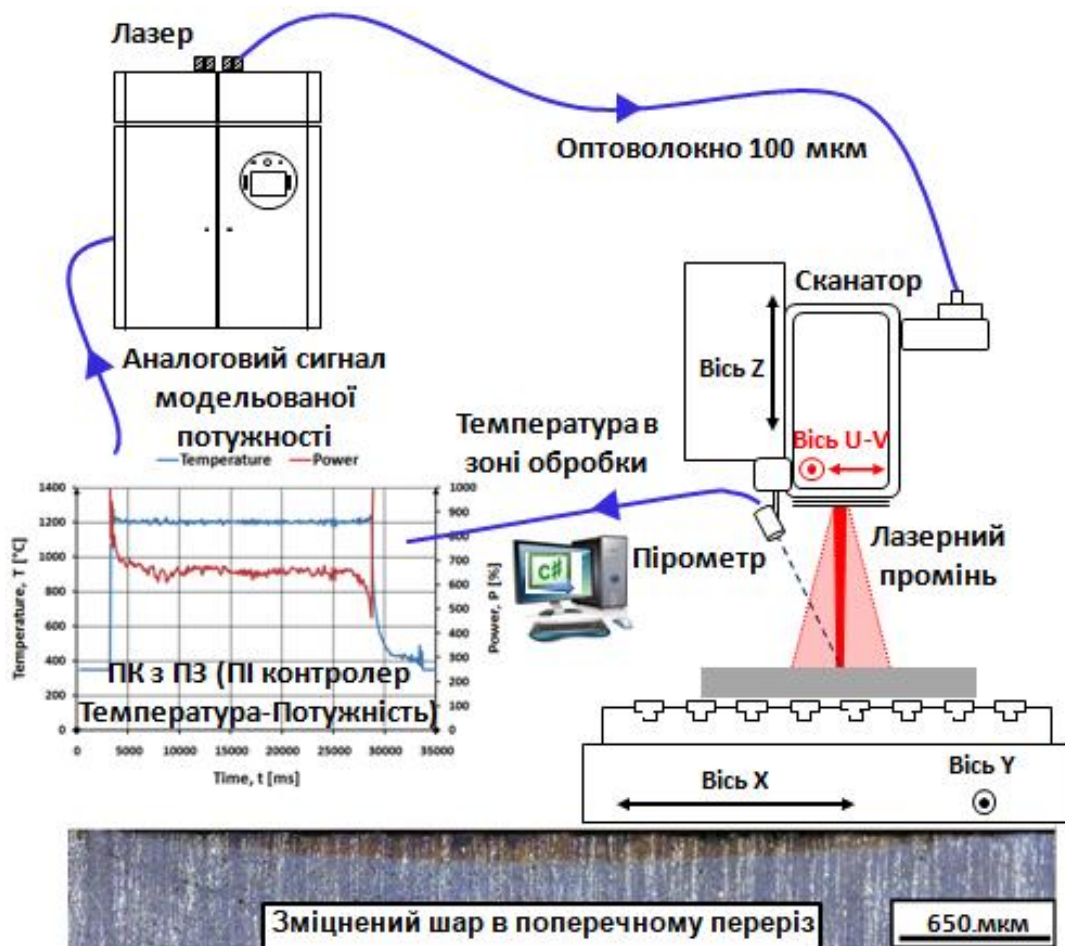


Рисунок 21 - Блок-схема процесу лазерного зміцнення за стратегією постійної температури волоконним лазером в поєднанні із 2D сканатором

Діапазон температур нагрівання – 900–1340 °C, а швидкість подачі зразка складає 40–140 мм/хв. Основні режими лазерного зміцнення, наведені в таблиці 3,

де T – температура нагріву, S – швидкість подачі зразка.

Таблиця 3 - Режими лазерного зміцнення

№	ЛТО1-6	ЛТО7	ЛТО8	ЛТО9	ЛТО10	ЛТО 11	ЛТО 12	ЛТО 13	ЛТО 14	ЛТО 15
T [°C]	900/1050	1200	1200	1200	1270	1270	1270	1340	1340	1340
S [mm/min]	40/90/140	40	90	140	40	90	140	40	90	140
Ширина (мм)	-	9.5	7.8	7.6	10.5	10.2	9.5	10.1	10.0	9.5
Глибина [μm]	-	170	140	80	380	310	240	290	270	230

Для виконання лазерного термооброблення безперервним лазерним випромінюванням використано стратегію постійної температури (Рис. 20 б),

яка є значно ефективнішою при обробці виробів складної форми в порівнянні із стратегією постійної потужності (Рис. 22 а).

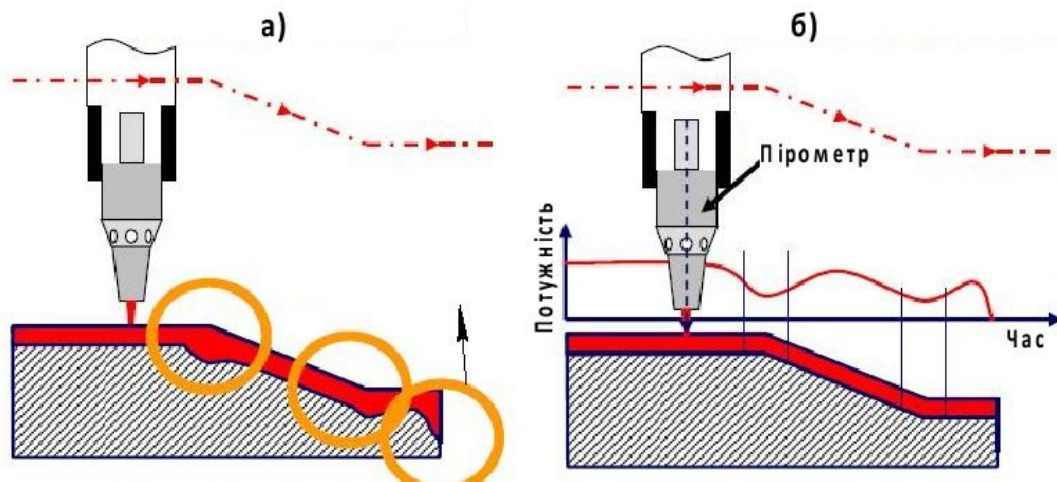


Рисунок 22 - Лазерна термічна обробка і використані в ній стратегії - постійної потужності (а) і постійної температури (б) [26]

Стратегія постійної температури дозволяє уникнути небажаного перегріву або оплавлення поверхні в місцях, де помітно змінюється геометрія поверхні зразка. Для підтримки необхідного температурного режиму необхідно розрахувати кілька параметрів, щоб правильно контролювати потужність лазерного променя. Таким чином, допустима щільність теплової енергії лазерного променя E_{lb} в $[Дж/см^2]$, в площі опромінення обробленої поверхні розраховано для безперервного режиму як [28]:

$$E_{lb} = CP/d_{lb}S,$$

де P — потужність лазерного променя в $[Вт]$, d_{lb} — діаметр лазерного променя в $[мм]$ і S — швидкість подачі зразка на оброблену поверхню в $[мм/хв]$, а $C = 6000$ є коефіцієнт розмірності. Час взаємодії лазерного променя визначається швидкістю подачі S лазерного променя на оброблену поверхню. Отримані величини густини енергії знаходяться в межах $20-90 \text{ кДж/см}^2$.

Враховуючи поглинальну здатність матеріалу, $A = 0,8$, і розміри, h_{lb} і l_{lb} , прямокутної лазерної плями, створюваної лазерним променем, температуру нагрівання для безперервного підведення енергії визначали, оцінюючи густину поглиненої потужності лазерного променя [29]:

$$W_{\text{lb}} = \frac{AP}{h_{\text{b}}l_{\text{b}}}.$$

Розрахункова щільність потужності W_{lb} знаходиться в діапазоні 10^3 – 10^4 Вт/см² за час взаємодії від 0,42 до 1,5 с, що, як відомо, забезпечує поверхневе зміцнення без оплавлення. Максимальна глибина зони теплового впливу становила прибіл. 0,3–0. 4 мм (Табл. 3).

Для автоматизації/контролю процесу лазерного оброблення були розроблені програми ЧПК залежно від коефіцієнта перекриття та розмірів заготовки. Зокрема, на Рис. 23 наведено схеми та програми ЧПК для лазерного поверхневого зміцнення заготовок з інструментальної сталі X12МФ.

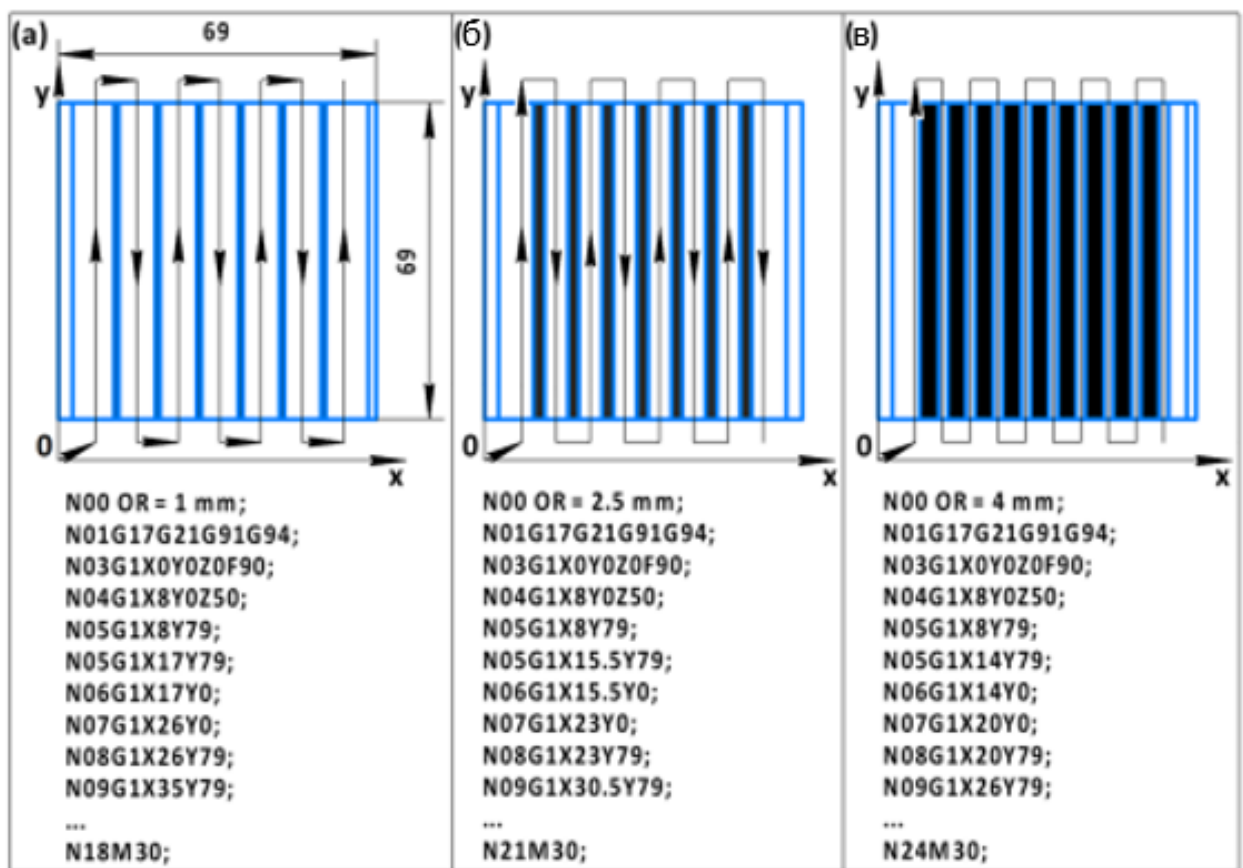


Рисунок 23 - Програми ЧПК для лазерного поверхневого зміцнення заготовок розміром 79×79 мм при коефіцієнті перекриття 10% (а), 25% (б), 40% (в) [25]

3.1.3. Ультразвукове поверхневе зміцнення

Інтенсивна пластична деформація приповерхневих шарів була викликана ультразвуковим поверхневим зміцненням. Обладнання містило ультразвуковий

генератор потужністю 0,3 кВт і частотою 21,6 кГц, акустичну систему з п'єзокерамічним перетворювачем і ступінчастим концентратором, ударну головку, яка розміщена на торці бойка концентратора (Рис. 24).

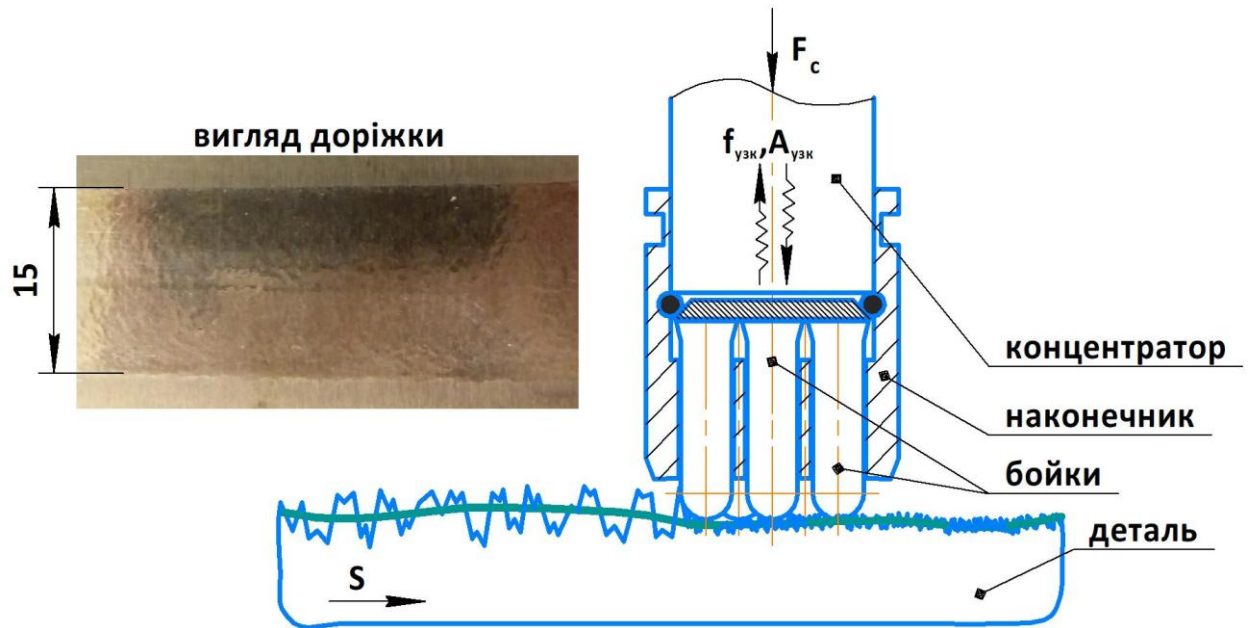


Рисунок 24 - Схеми ультразвукової ударної установки (а) і навантажувальної установки (б), вид обробленого зразка (в)

У процесі ультразвукового зміцнення використовували амплітуди A_{usv} ультразвукових коливань бойка 15 і 18 мкм, акустичну систему притискали до обробленої поверхні статичним зусиллям $F_s = 50$ Н і зміщували по поверхні зразка зі швидкістю подачі $S = 600$ мм/хв (Табл. 4), де

A_{usv} – амплітуда коливань, τ – тривалість процесу.

Таблиця 4 – Режими ультразвукового оброблення

№	УЗО1	УЗО2	УЗО3	УЗО4	УЗО5	УЗО6	УЗО7	УЗО8
A_{usv} [μm]	15	15	15	15	18	18	18	18
τ [s]	60	120	180	240	60	120	180	240

Вироблялися високочастотні ($f_i \approx 3 \pm 0,5$ кГц) удари сімома циліндричними штифтами/ударниками діаметром 5 мм, розташованими в голівці, яка примусово оберталась під час зміцнення зі швидкістю обертання $n \approx 8,8$ об/хв. Тривалість процесу ультразвукового зміцнення τ змінювалася від 60 до 240 с

Механічна енергія, що подається на оброблену поверхню ультразвуковою ударною обробкою E_{ui} може бути виражена частотою удару f_i в [с]; маса

штифта, m_p в [кг], кінетична енергія, що постачається ультразвуковим бойком E_{us} , і додаткова кінетична енергія штифта E_a , викликана обертанням наконечника [15]:

$$E_{si} = \frac{f_i E_{us}}{m_p} = \frac{f_i}{m_p} (E_{us} + E_a).$$

Основною складовою кінетичної енергії бойків, що вдаряються об поверхню, яка визначається лінійною швидкістю бойка v_p , яка дорівнює середній швидкості вібрації торця бойка. Останній безпосередньо пов'язаний з частотою, f_{usv} в $[c^{-1}]$, і амплітудою, A_{usv} в [м], коливань наконечника [16]:

$$E_{us} = \frac{m_p v_p^2}{2} \approx 2m_p \pi^2 f_{usv}^2 A_{usv}^2.$$

Додаткова кінетична енергія E_a залежить від частоти обертання наконечника, n_h в [об/хв], радіусу обертання штифтів, R_p в [м] відстань від центральних штифтів до осі наконечника, кута швидкості штифта ω_r і може бути виражена формулою [16]:

$$E_a = \alpha (n_h \pi R_p)^2 m_p.$$

Розраховані механічні енергії, прикладені до обробленої поверхні при процесі ультразвукового оброблення становили 45 і 64 кДж для амплітуд A_{usv} 15 і 18 мкм.

Підвищення температури в процесі УЗО було експериментально виміряно за допомогою термопари, вбудованої в підповерхню зразка. Отримані величини не сильно змінювалися залежно від режимів ультразвукового оброблення і не перевищували приблизно 150 °С.

3.2. Математичне планування експерименту

Математичне планування експерименту для лазерного термозміцнення сталі Х12МФ було виконано у відповідності з планом (3^2) на основі якого проведено $n = p^k = 3^2 = 9$ експериментів. Експериментальні дані оцінювали згідно квадратичної регресійної моделі:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2,$$

де y – цільова функція (якісні характеристики поверхневого шару),
 $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – коефіцієнти регресії.

Межі варіювання факторів (температура нагрівання та швидкість переміщення зразка) та матриця планування експерименту із досліджуваними вихідними параметрами (глибина зміцнення та твердість поверхні) приведено в таблиці 5 та 6 відповідно.

Таблиця 5 – Межі варіювання факторів

Фактори	Рівні факторів			
	$x_{\min} (-1)$	$x_{\max} (+1)$	$x_0 (0)$	Δx
$A(x_1)$ – температура нагрівання T [°C]	1200	1340	1270	70
$B(x_2)$ – швидкість переміщення зразка S [мм/хв]	40	140	90	50

Таблиця 6 – Матриця планування експерименту

№	№ екс.	$x_1 (T)$	$x_2 (S)$	$x_1 (T)$	$x_2 (S)$	$y_1 (h_3)$ мкм	y_3 (HRC)
1	5	0	0	1270	90	310	52.1
2	9	+	+	1340	140	240	52.7
3	6	+	0	1340	90	270	52.4
4	1	-	-	1200	40	170	47
5	7	-	+	1200	140	80	33.8
6	3	+	-	1340	40	290	51.5
7	4	-	0	1200	90	140	45.2
8	8	0	+	1270	140	230	54.8
9	2	0	-	1270	40	380	51.2

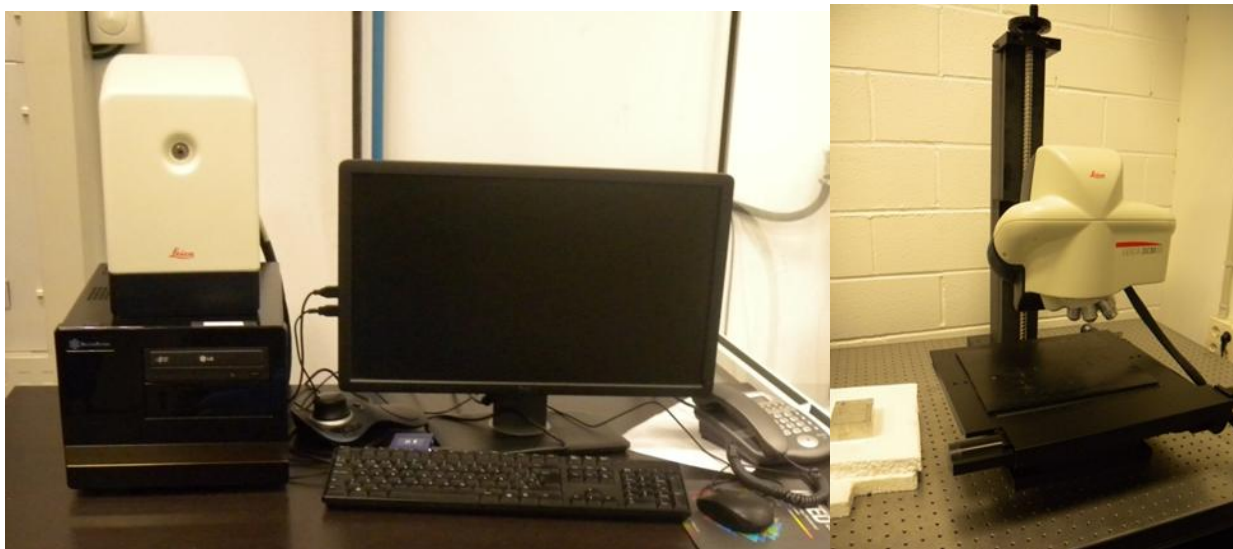
3.3. Методика експериментальних вимірювань

3.3.1. Морфологія поверхні та параметри шорсткості

Дослідження морфології поверхні та перерізу зони термічного впливу (ЗТВ) виконувалося з використанням мікроскопа Leica DCM3D (Рис. 25).

Межі вимірювання приладу Leica DCM 3D становлять від кількох нанометрів до кількох міліметрів, тому він може використовуватися для дуже широкого кола завдань.

а)



б)

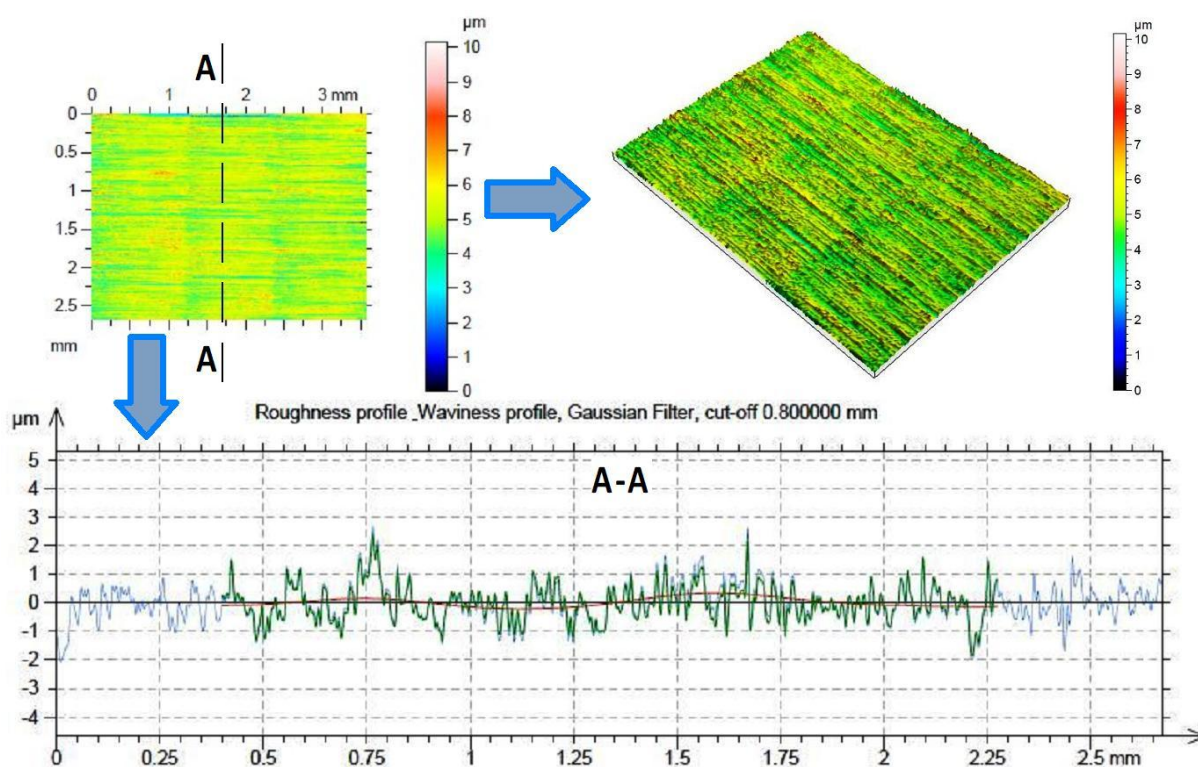


Рисунок 25 – Загальний вигляд лазерного профілометра Leica DCM3D (а) та схематичне представлення дослідження геометричних параметрів (б)

3.3.2. Дослідження структурно-фазового напруженого стану

Аналіз мікроструктури приповерхневих шарів проводили за допомогою оптичного мікроскопа Nikon Optiphot-100 (Рис. 26).



Рисунок 26 – Загальний вигляд оптичного мікроскопа Nikon Optiphot-100

Поперечні перерізи оброблених зразків були механічно відшліфовані (відполіровані) та хімічно протравлені з використанням 4% реагенту Nital для дослідження структурних складових. Рентгеноструктурний аналіз поверхневих шарів товщиною близько 10...20 мкм проводили на зразках у вихідному стані та після поверхневого оброблення. Рентгенівські вимірювання проводили на дифрактометрі ДРОН-3. Також величини макронапружень було проаналізовано методом рентгеноструктурного аналізу.

3.3.3. Твердість та інтенсивність зміцнення

Твердість поверхні зразків визначали за допомогою цифрового твердоміра Computest SC при навантаженні на індентор 10 Н (Рис. 27 а). Розподіл мікротвердості по глибині, реєстрували в приповерхневих шарах з використанням цифрового твердоміра FM800 при навантаженні на індентор Віккерса 0,5 Н (Рис. 27 б).

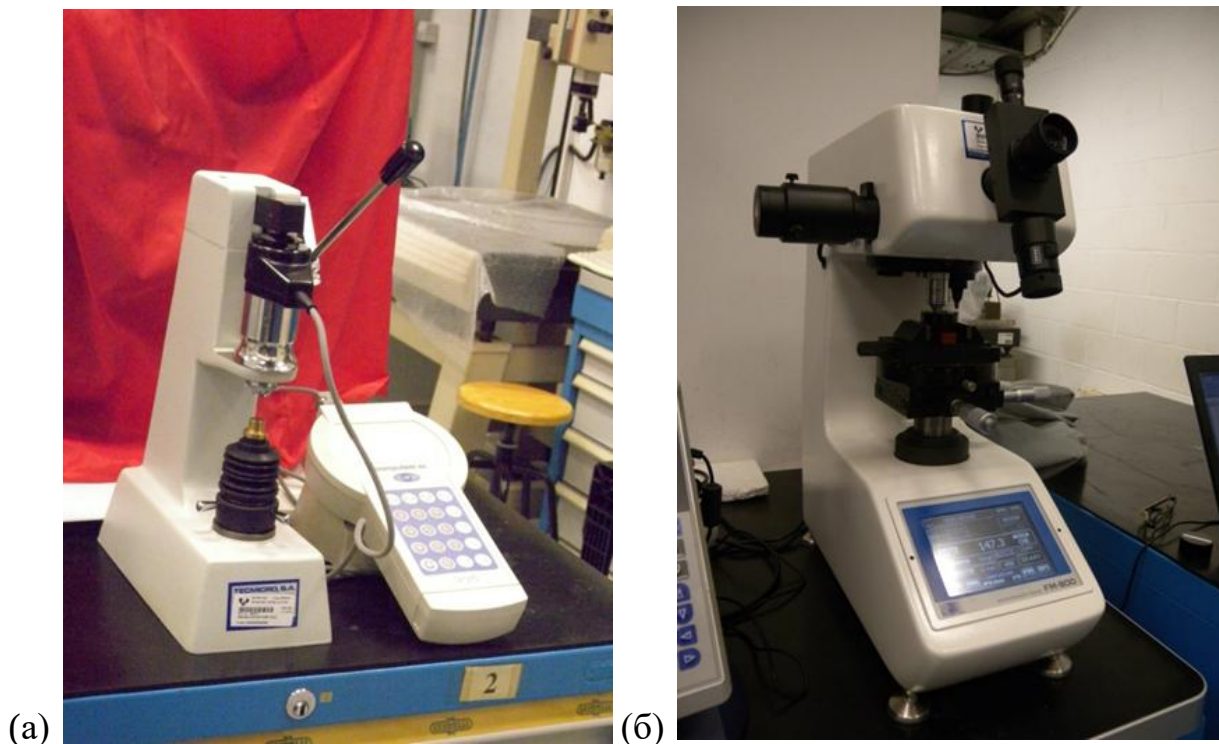


Рисунок 27 – Загальний вигляд твердоміра Computest SC (а) та FM800 (б)

3.3.4. Випробування на зносо- та корозійну стійкість

Враховуючи широке застосування досліджуваної сталі для виготовлення штампів або ріжучого інструменту, що працює, як правило, в умовах циклічного навантаження, випробування на зношування зміцнених поверхонь проводили на автоматизованому трибологічному комплексі в умовах як квазістатичного, так й динамічного навантаження (Рис. 28 а).

Квазістатичні випробування (при постійному навантаженні $F_s = 30$ Н, прикладеному до індентора W_C-C_0) проводили шляхом зворотно-поступального ковзання індентора (діаметром 8 мм) з частотою ~ 1 Гц вздовж доріжки 4 мм. Було проведено два види тестів тривалістю 15 хв (~ 950 циклів) і 45 хв (~ 2850 циклів). Було проведено вісім дублікатів для кожного досліджуваного стану зносу (кожного матеріалу), а потім статистично усереднено. Змінна методу тестування не перевищувала 4%.

У динамічних умовах випробування на зношування проводили вздовж колії однакової довжини шляхом додатку того самого статичного навантаження F_s плюс додаткове динамічне навантаження, прикладене синусоїдально (з частотою 25 Гц і амплітудою $\Delta F \sim 3$ Н).

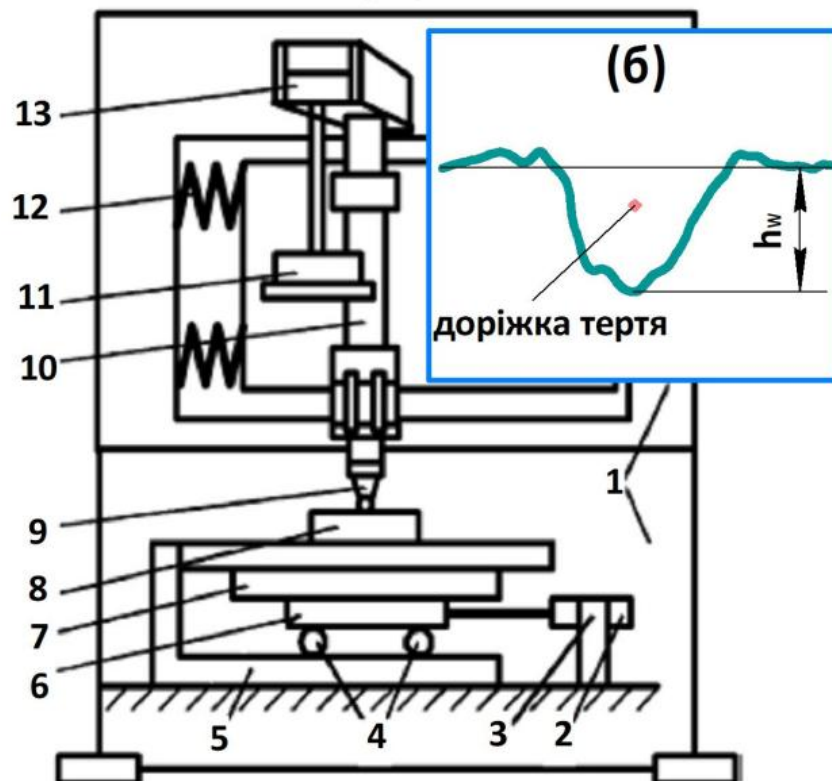
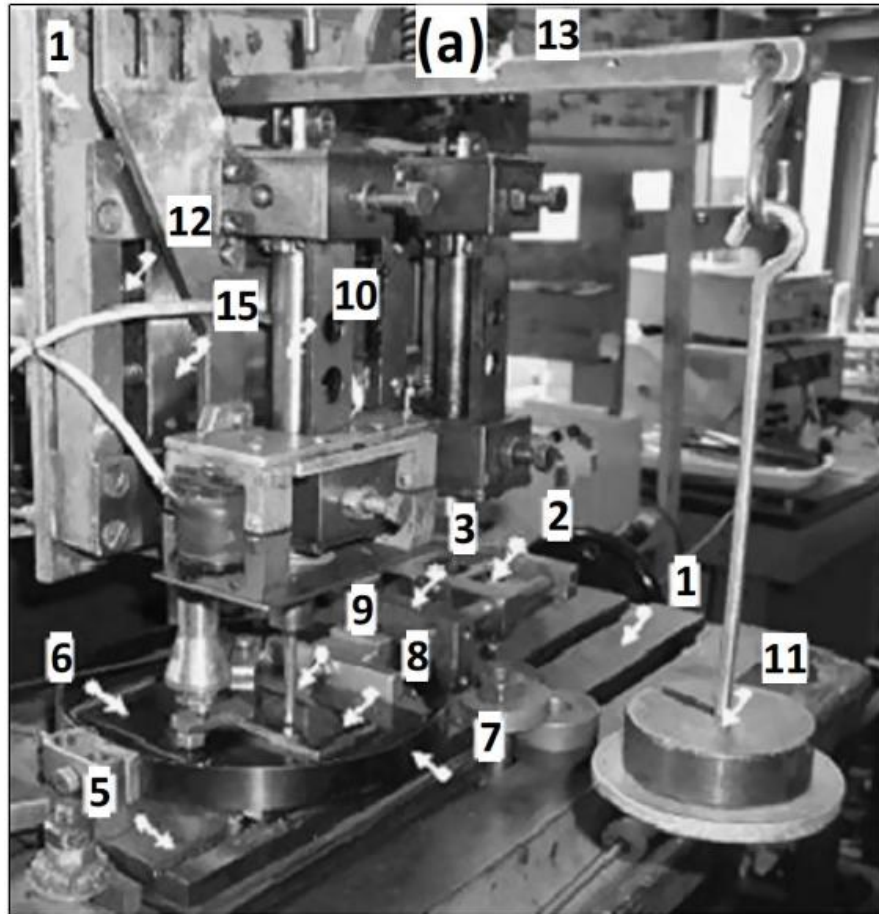


Рисунок 28 - Схема автоматизованого трибологічного комплексу (а), що складається з рами (1), перетворювача (2), обойми (3), двох пар куль (4), підставки з полозком (5), опори (6), кільцевої пружини (7), плоский зразок (8),

індентор (9), приклад (10), набір важків (11), пара пружин (12), важіль (13), кулачковий механізм (14), каретка (15), 3D-текстура (б) і 2D-текстура (в) зношеної доріжки після динамічного випробування (h_w — величина втрати на знос W_L) [33]

Усі випробування проводилися при швидкості ковзання 0,013 м/с, яка підтримувалася постійною протягом кожного напівперіоду поза перехідними стадіями навколо точок повороту завдяки використанню кулачкового механізму у формі спіралей Архімеда (14 на Рис. 28 а). Крім того, всі випробування проводилися при кімнатній температурі (20 °C) в навколишній атмосфері.

Після кожного випробування оцінювали величину втрат на знос W_L (глибину сліду зносу) шляхом вимірювання рельєфу поверхні (Рис. 28 б) і профілю поперек зношеної доріжки за допомогою оптичного профілометра Leica DCM3D [16]. Силу тертя F визначали за допомогою реєстратора, з'єданого з індукційним перетворювачем і чутливим до переміщення пружним елементом.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Оптимізація режимів лазерного зміцнення

Отримані дані показали, що оптимальний діапазон температури нагрівання 1200–1340 °С для сталі Х12МФ можна досягти при швидкості подачі зразків 40–90 мм/хв. Вид і розміри ЗТВ на поперечних перерізах оброблених зразків (Рис. 29 а) показують, що збільшення швидкості подачі зразка призводить до зменшення поглиненої енергії лазерного променя і відповідно до зменшення розмірів ЗТВ. ЗТВ була майже непомітною у зразках, оброблених лазерним зміцненням при температурах нижче 1200 °С.

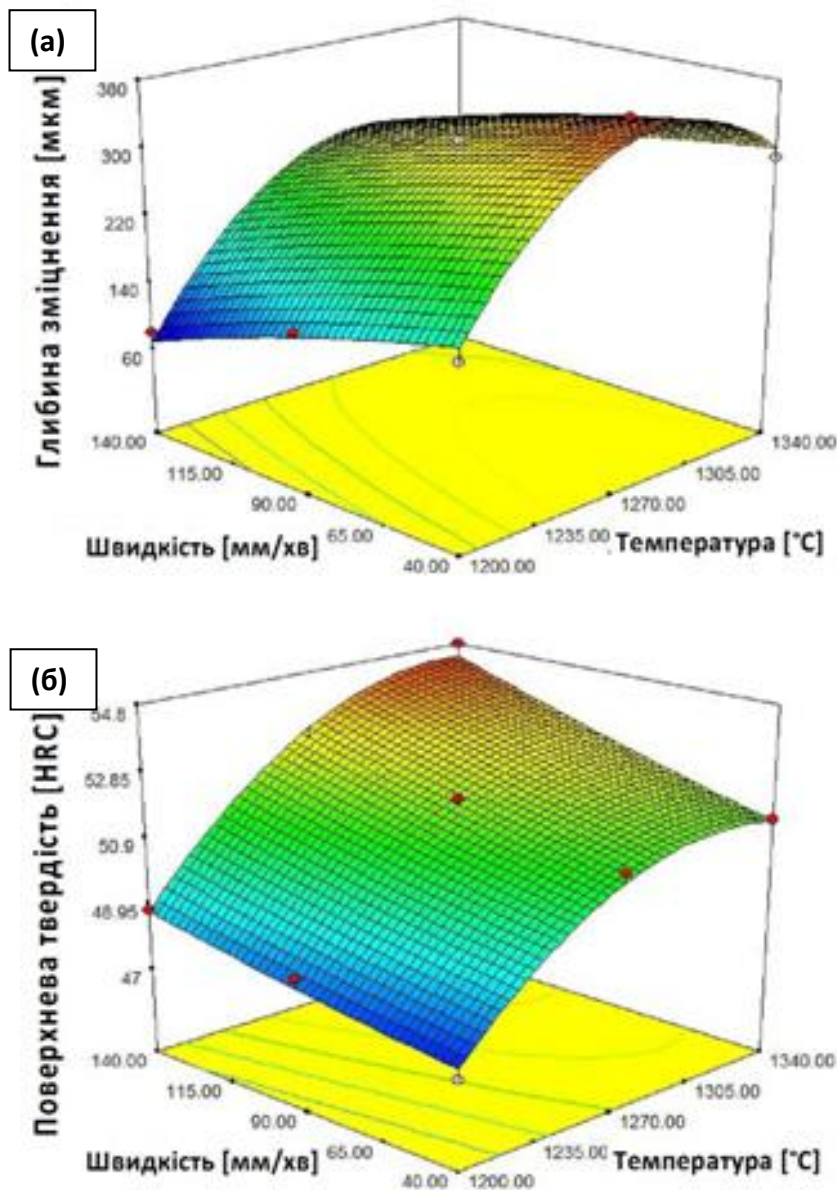


Рисунок 29 - Вплив температури нагрівання та швидкості оброблення на глибину зміцнення (а) та поверхневу твердість (б) сталі Х12МФ

При більш високих температурах глибина зміцнення збільшилися на температурах від 1200 °С до 1270 °С, а потім дещо знижувалися при температурі 1340 °С (Рис. 29 а).

У порівнянні з вихідним станом зразки зміцнені лазером демонстрували збільшення твердості поверхні в 2,7 рази (Рис. 29 б). Результати цієї серії експериментів (Рис. 29) дозволили встановити оптимальні параметри режиму лазерного поверхневого зміцнення. Найбільш ефективними вважаються такі параметри процесу ЛТО при швидкості сканування лазерного променя 1000 мм/с (режим №11 у Табл. 3): швидкість подачі зразка 90 мм/хв, амплітуда сканування 10 мм і температура нагрівання 1270 °С.

4.2. Топографія поверхні

Значної зміни параметрів профілю на лазерній обробці немає. Зокрема, лазерна обробка призводить лише до незначного зменшення параметру шорсткості R_a та параметру хвилястості W_a , що можна пояснити утворенням оксидної плівки внаслідок реакції нагрітої лазерним променем поверхні зразка з атмосферою.

Комбінована лазерно-ультразвукова обробка призвела до формування нового мікрорельєфу на поверхні, яка значно сплюснена, завдяки значно вищій твердості поверхні обробленої попередньо лазером, що перешкоджає перенапруженню та утворенню надмірних борозен, піків і долин. Зменшення параметра шорсткості R_a та параметра хвилястості W_a обробленої поверхні було досягнуто після оптимальної тривалості УЗО 120 с та більшої амплітуди ультразвукового бойка (18 мкм), що створює більш інтенсивні впливи та одночасне примусове обертання ударної головки, що створює ковзаючий удар штифтів/бойків об поверхню зразка – кожен удар має високу поперечну складову навантаження.

Крім того, зазначена висока поперечна складова навантаження сприяє ковзному характеру множинних високочастотних ударів, що спричиняє сплющування поверхні. Таким чином, покращуються параметри хвилястості та шорсткості за рахунок інтенсивної пластичної деформації поверхні,

фрагментації та видалення оксидної плівки, що утворюється під час нагрівання лазерним променем. Також, слід відзначити, що низькі висотні параметри мікронерівностей, зареєстровані за допомогою 3D лазерної мікроскопії (Рис. 30 в), також підтверджують загальну тенденцію — комбінована лазерно-ультразвукова обробка виявляється найбільш ефективним у сенсі формування сприятливого мікрорельєфу на поверхні.

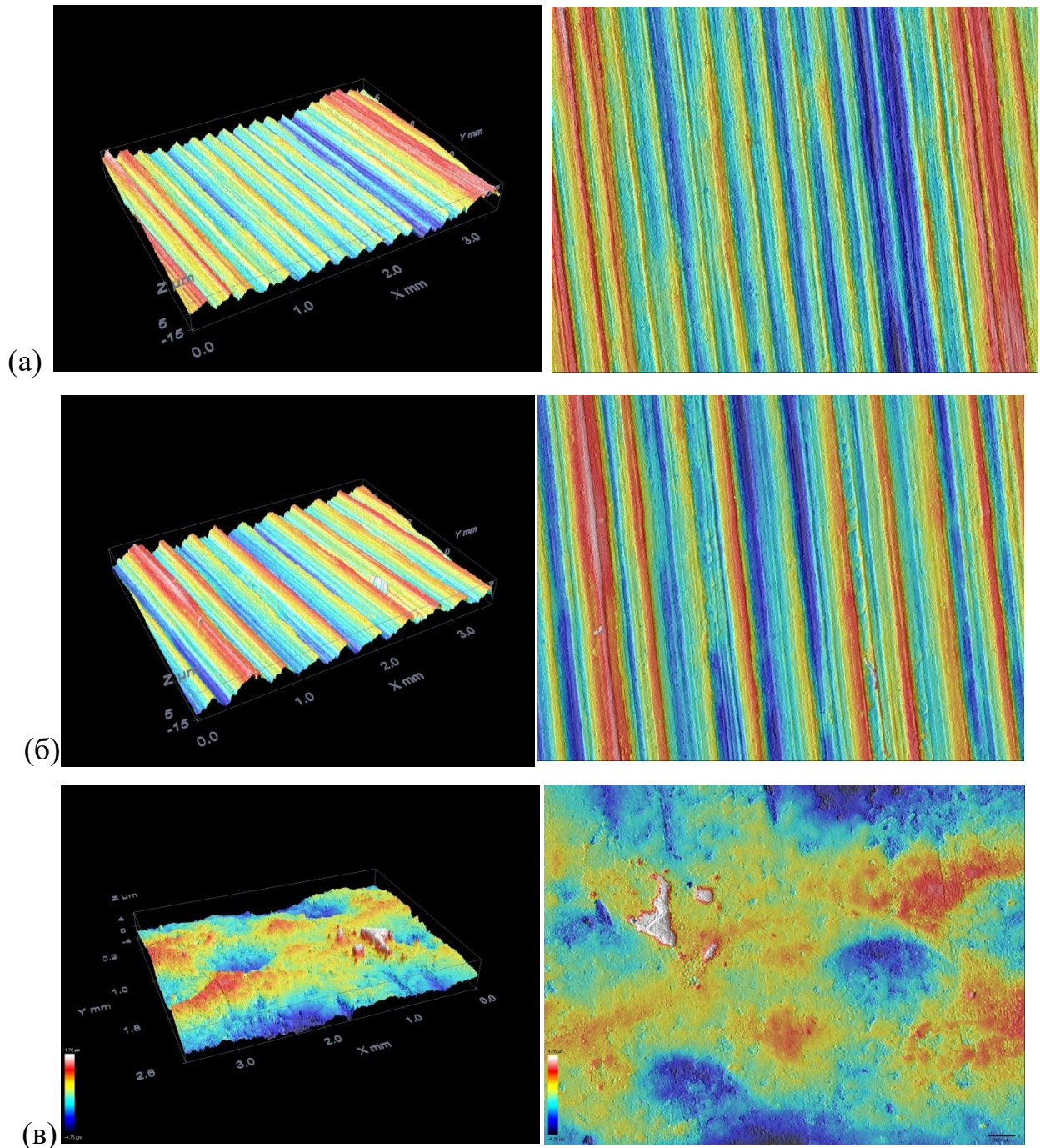


Рисунок 30 - Морфологія поверхні у вихідному стані (а) та після лазерного оброблення (б) та комбінованого лазерно-ультразвукового оброблення (в) сталі X12МФ

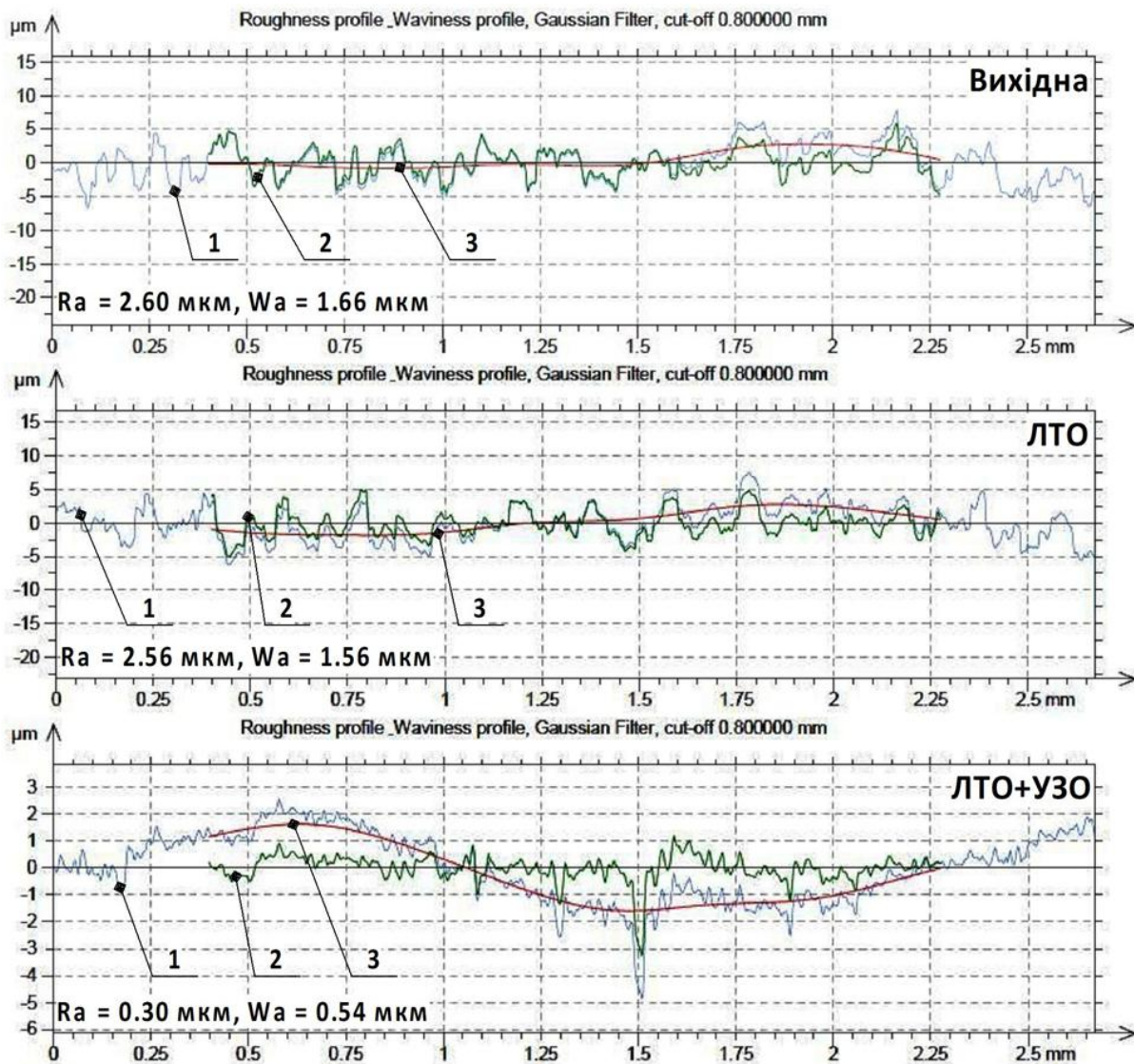


Рисунок 31 - Профілі поверхні початкового профілю поверхні (крива 1), шорсткості (крива 2) і хвилястості (крива 3) у вихідному стані та після лазерного оброблення та комбінованого лазерно-ультразвукового обробки оброблення сталі Х12МФ

На Рис. 31 показано приблизно 50–90% зменшення геометричних параметрів мікрорельєфу поверхні після комбінованого поверхневого лазерно-ультразвукового зміцнення та оздоблювання.

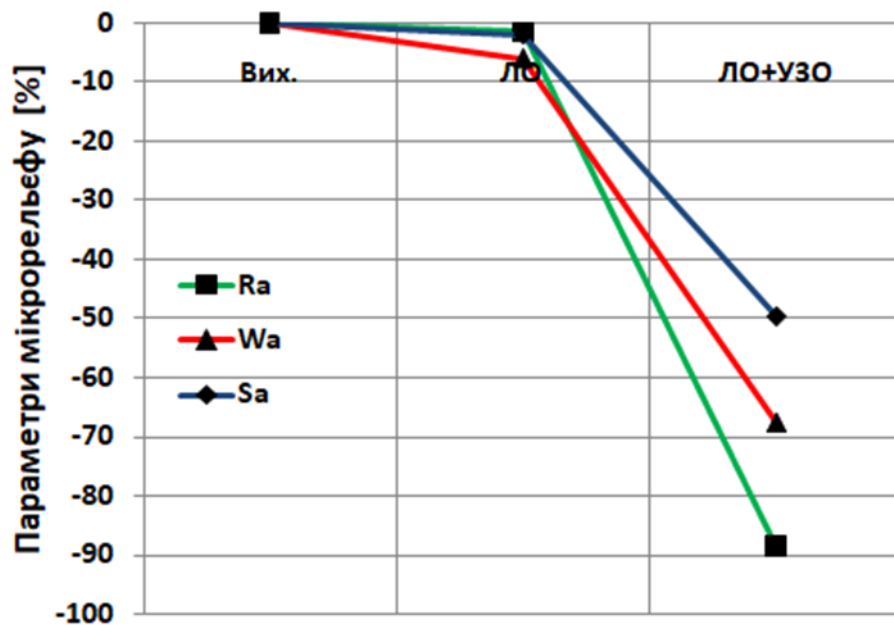


Рисунок 32 – Параметри шорсткості (Ra), хвилястості (Wa) та текстури (Sa) поверхні у вихідному стані та після лазерного оброблення та комбінованого лазерно-ультразвукового оброблення сталі X12МФ

Отримані значно знижені параметри хвилястості шорсткості та сформована хвилястість мікрорельєфу на поверхні після комбінованого лазерно-ультразвукового оброблення можуть ініціювати сприятливі умови для утримання мастила на поверхні виробів, що, у свою чергу, сприяло б підвищенню корозійної стійкості та зменшенню тертя як для статичних, так і для динамічних умов експлуатації.

4.3. Мікроструктура та фазовий склад зміцненого шару

Рентгеноструктурний аналіз показує, що необроблений зразок містить лінії α -заліза, сліди γ -заліза та лінії карбідів хрому Cr_7C_3 та $(\text{Cr},\text{Fe})_7\text{C}_3$. Об'ємна частка аустеніту менше 10%. Наявність карбідних фаз притаманна сталям класу ледебуриту, таким як досліджувана сталь X12МФ, і ці карбіди хрому різного розміру та просторового розподілу в матриці заліза переважно забезпечують різний рівень твердості та зносостійкості. Наші експериментальні результати узгоджуються з потрібною фазовою діаграмою Fe–Cr–C [28], яка свідчить про утворення хрому та карбідів хрому/заліза при охолодженні від температури оброблення. ЛТО призводить до утворення великої кількості оксидів заліза та хрому на поверхні зразка, які проявляються

появою додаткових дифракційних піків. Крім того, враховуючи той факт, що інтенсивності цих додаткових піків вищі, ніж у піків заліза, можна стверджувати, що індукований лазерною обробкою оксидний шар має достатньо велику товщину (Рис. 33).

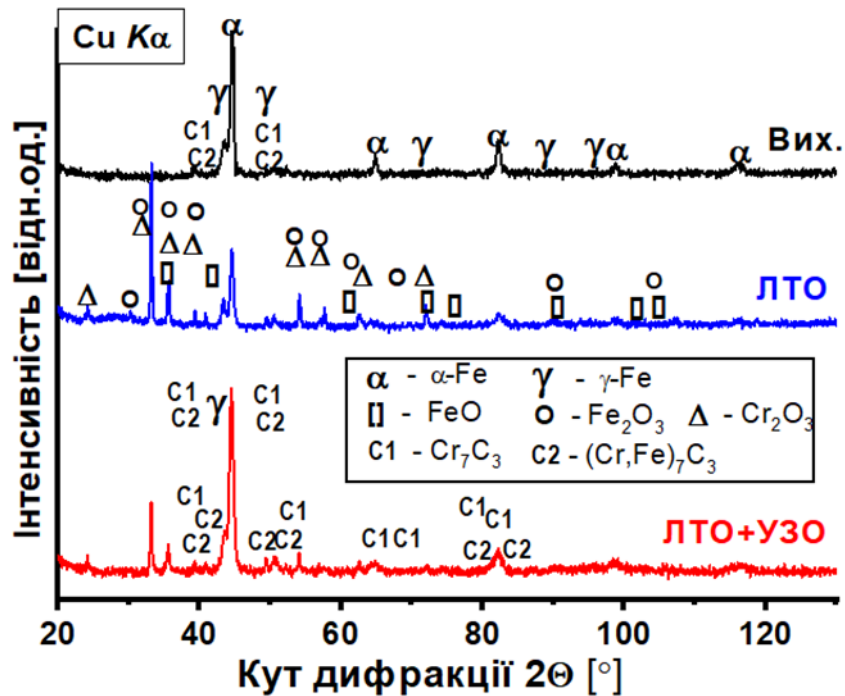


Рисунок 33 - Рентгеноструктурний аналіз сталі X12МФ до та після поверхневого зміцнення

Комбіноване лазерно-ультразвукове оброблення призводить до зменшення інтенсивності піків оксиду, до значного розширення піків заліза, які також зміщуються в бік менших кутів дифракції. Зменшення інтенсивності ліній оксидів пов'язане з їх руйнуванням і видаленням з поверхні в процесі УЗО корелює зі зменшенням розміру зерна/субзерна. Мікродеформація ґратки може бути збільшена за рахунок двох факторів: (і) збільшення щільності дислокацій і (іі) розчинення вуглецю в решітці заліза шляхом розкладання карбідів (переважно цементиту).

Мікроструктура зміцненого верхнього шару ЛТО сталі X12МФ (Рис. 34) містить дрібногочастий мартенсит з дисперсними частинками карбідів хрому та заліза з мікротвердістю ~ 6.5 ГПа.

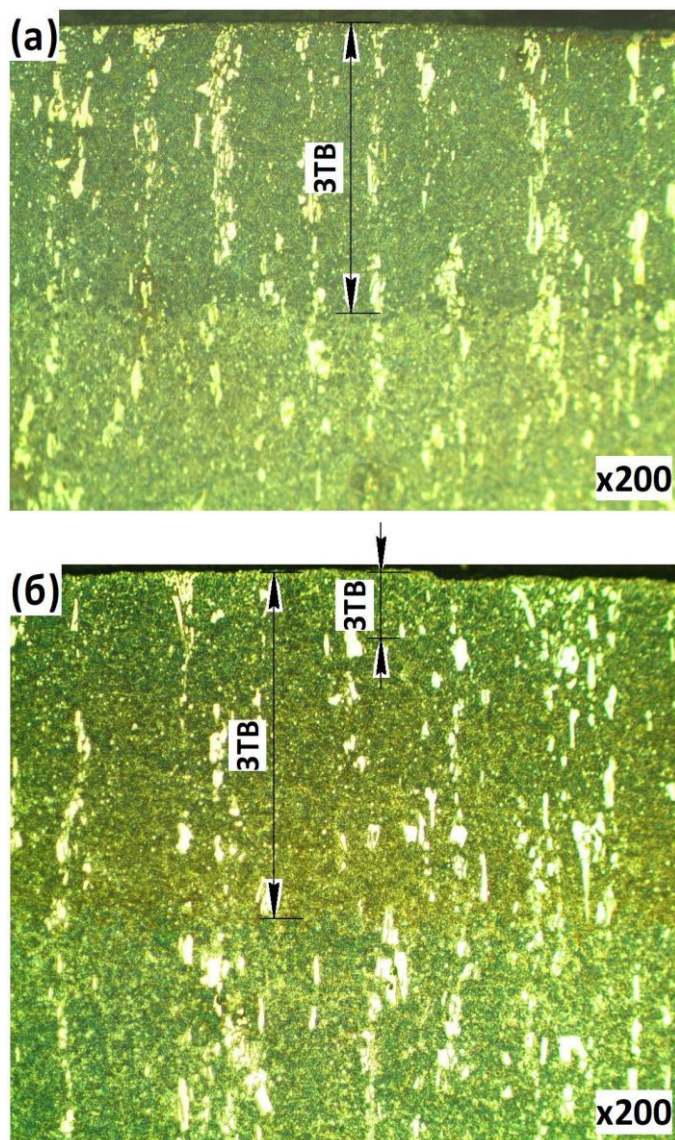


Рисунок 34 - Мікроскопічні зображення мікроструктури в приповерхневому шарі сталі X12МФ після лазерного оброблення (а) та комбінованого лазерно-ультразвукового оброблення (б)

4.4 Мікротвердість та інтенсивність зміцнення зміцненого шару

Нагрівання та подальше самогартування на лазерній обробці сталі X12МФ підвищує твердість поверхні (HRC) та мікротвердість (HV) в приповерхневому зміцненому шарі у $\sim 2,5$ та $\sim 2,0$ рази відповідно в порівнянні із необробленим зразком. Видно, що розподіл мікротвердості після комбінованого лазерно-ультразвукового оброблення є неоднорідним по глибині поверхневого шару, зокрема з різкою зміною в приповерхневому та нижньому шарах 3ТВ (Рис. 35).

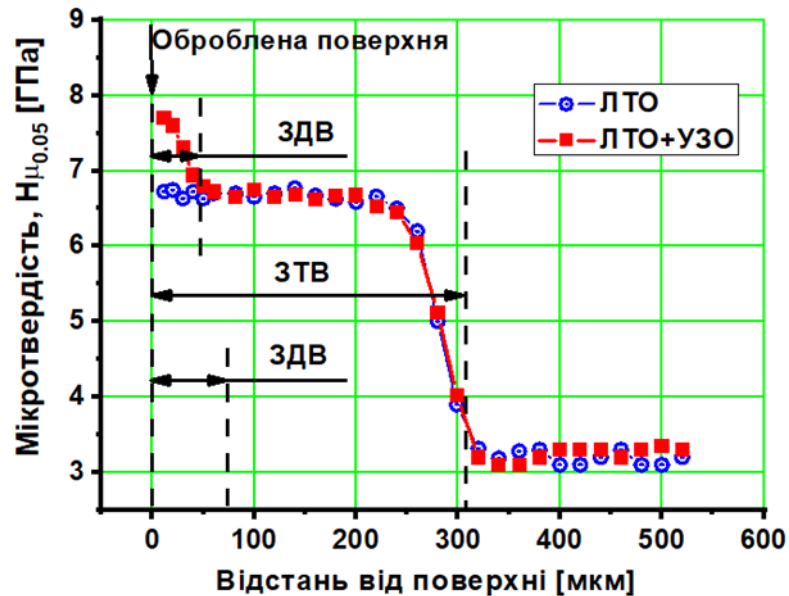


Рисунок 35 - Мікротвердість сталі X12МФ після лазерного термооброблення та комбінованого лазерно-ультразвукового оброблення

Важливо, що в порівнянні з окремою лазерною обробкою, комбінована лазерно-ультразвукова обробка сприяє подальшому збільшенню мікротвердості приповерхневого шару на 15–25% за рахунок деформаційної фрагментації мартенситних зерен і карбідів хрому. При цьому, порівняно з вихідним станом, мікротвердість підповерхневого шару підвищується більш ніж у 2 рази за рахунок сформованої ультрадрібнозернистої мікроструктури (~80–250 нм), межі зерен якої блокуються великою кількістю дрібних вторинних карбідів (~20 нм). Отже, щільні межі зерен стають складнішими перешкодами для внутрішніх дислокацій. Існування багатьох сильно розорієнтованих зерен у структурі поверхневого шару підтверджується значною азимутальною дисперсією феритових дифракційних плям. Таким чином, комбінована обробка призводить до мікроструктури, яка характеризується оптимальним поєднанням зміцнення твердого розчину вуглеця і хрому, незважаючи на часткове розчинення первинних карбідів [19]. Отже, така рівноважна мікроструктура сприяє зниженню коефіцієнта тертя та підвищенню зносостійкості [8, 12].

Результати рентгеноструктурного аналізу показали, що в порівнянні з вихідним станом усі застосовані методи поверхневого зміцнення призводять до розширення основних піків α -фази, що свідчить про зменшення розміру

кристалітів та/або формування решітки. мікродеформацій, а також збільшення щільності дислокацій у мікроструктурі досліджуваної сталі [9]. Найбільше розширення рентгенівських ліній було виявлено після комбінованого зміцнення. Зокрема, розмір кристалітів і щільність дислокацій були оцінені як 84 нм і $5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ відповідно. [19].

Крім того, рентгенофазовий аналіз підтверджує, що ультразвукове оброблення після обробки лазером спричиняє руйнування та майже повне видалення оксидів заліза з поверхні, а також утворення залишкових макронапружень стиснення (-409 МПа) у приповерхневому шарі (Рис. 36).

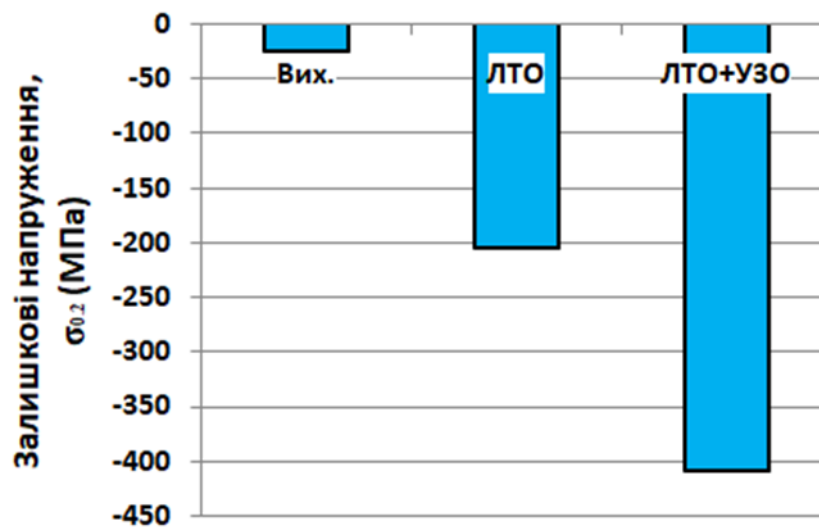


Рисунок 36 - Залишкові напруження сталі Х12МФ до та після поверхневого зміцнення

Оцінки макронапружень проводили за допомогою рівняння [11]:

$$\sigma_R = (\sigma_1 + \sigma_2) = -\Delta dE / \mu d,$$

де $(r_1 + r_2)$ – плоске напруження, яке є паралельним поверхні зразка; d і D_d – відповідно міжплощинні відстані в ненапруженому та обробленому станах, ν – коефіцієнт Пуассона.

На відміну від процесу ЛТО, УЗО виявляється більш ефективною у зменшенні шорсткості (Табл. 6), де R_a – середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості (ISO4287), W_a – середнє арифметичне відхилення профілю хвилястості (ISO4287), HRC – число твердості за Роквеллом, $H_{\mu 0,05}$ – мікротвердість поверхневого шару, h_{hard} – глибина загартування, σ_R – залишкове макронапруження в поверхневому шарі.

Таблиця 6 - Геометричні параметри морфології поверхні та механічні властивості поверхневого шару сталі Х12МФ після поверхневого оброблення

Стан	Геометричні параметри			Механічні властивості							
	Ra		Wa	Sa	HRC [%]	H _{μ0.05} [GPa]	h _{hard} [μm]	σ _R [MPa]			
	[μm]	[%]	[μm] [%]	[μm] [%]							
Вих.	2.60	–	1.66	–	3.91	–	19.6	–	3.2	–	0
ЛТО	2.56	1.5	1.56	6.0	3.83	2.0	52.1	156.8	6.75	310	–205
ЛТО+УЗО	0.30	88.5	0.54	67.5	1.98	49.3	58.5	200	7.8	310	–409

Результати цієї роботи чітко вказують на позитивний ефект комбінованого оброблення поверхні у формуванні сприятливого мікрорельєфу на поверхні із низькою шорсткістю, підвищенні мікротвердості сталі Х12МФ та забезпеченні залишкових напружень стиску в приповерхневих шарах.

4.5 Зносостійкість зміцненого шару комбінованим обробленням

Трибологічні випробування зміцнених поверхонь інструментальної сталі Х12МФ проводили за різних режимів (квазістатичний та динамічний) протягом 45 хв. Експериментальні величини зношування були визначені шляхом аналізу профілю поверхні та топографії зношених доріжок за допомогою лазерної конфокальної мікроскопії.

На Рис. 37 наведено 3D мікрофотографії зношених доріжок на модифікованих поверхнях інструментальної сталі Х12МФ при різних режимах випробувань (квазістатичні/статичні та динамічні випробування).

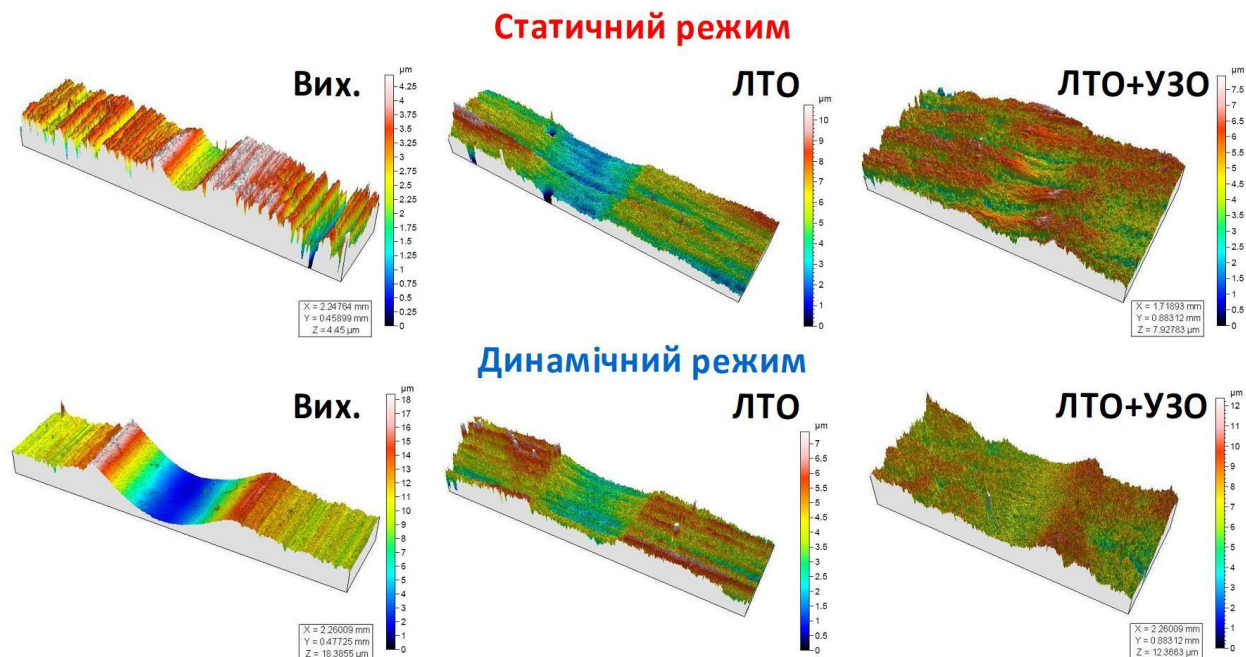


Рисунок 37 – 3D мікрофотографії зношених доріжок сталі Х12МФ протягом 45 хв до та після поверхневого зміцнення

Видно, що після динамічного випробування глибина зношених слідів завжди більша незалежно від досліджуваного стану. Крім того, глибина зношених доріжок зменшується після лазерного оброблення та комбінованого оброблення (Рис. 37) у порівнянні із необробленим зразком.

Експериментально зареєстровані втрати на зношування W_L після квазістатичних і динамічних випробувань тривалістю 15 і 45 хв наведені на Рис. 38. Загалом результати випробувань на зношування обох типів демонструють, що всі використані оброблення поверхні призводять до зниження W_L порівняно з початковим станом. Це спостереження добре корелює з поведінкою твердості. Найнижчі величини W_L були зареєстровані після комбінованого лазерно-ультразвукового оброблення. Виміряні в квазістатичному та динамічному випробуваннях, вони відповідно в 2 та 4 рази менші, ніж у вихідному стані. При динамічному випробуванні величини зношування W_L природно вищі, ніж після квазістатичного випробування через додаткову імпульсну складову навантаження, що прикладається до індентора під час випробувань.

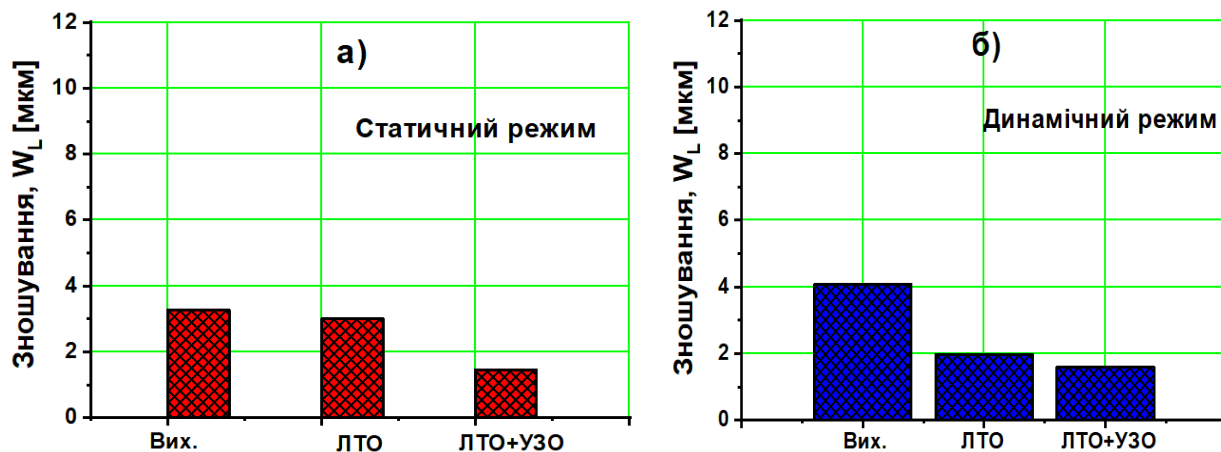
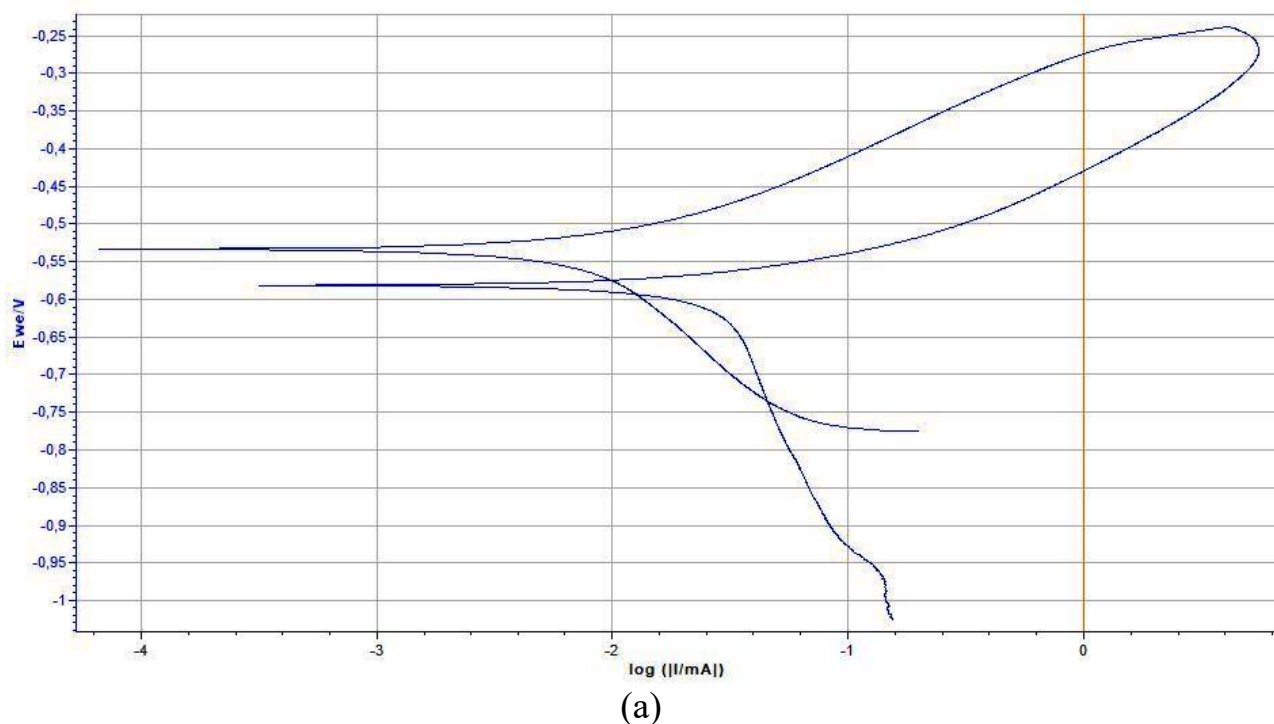


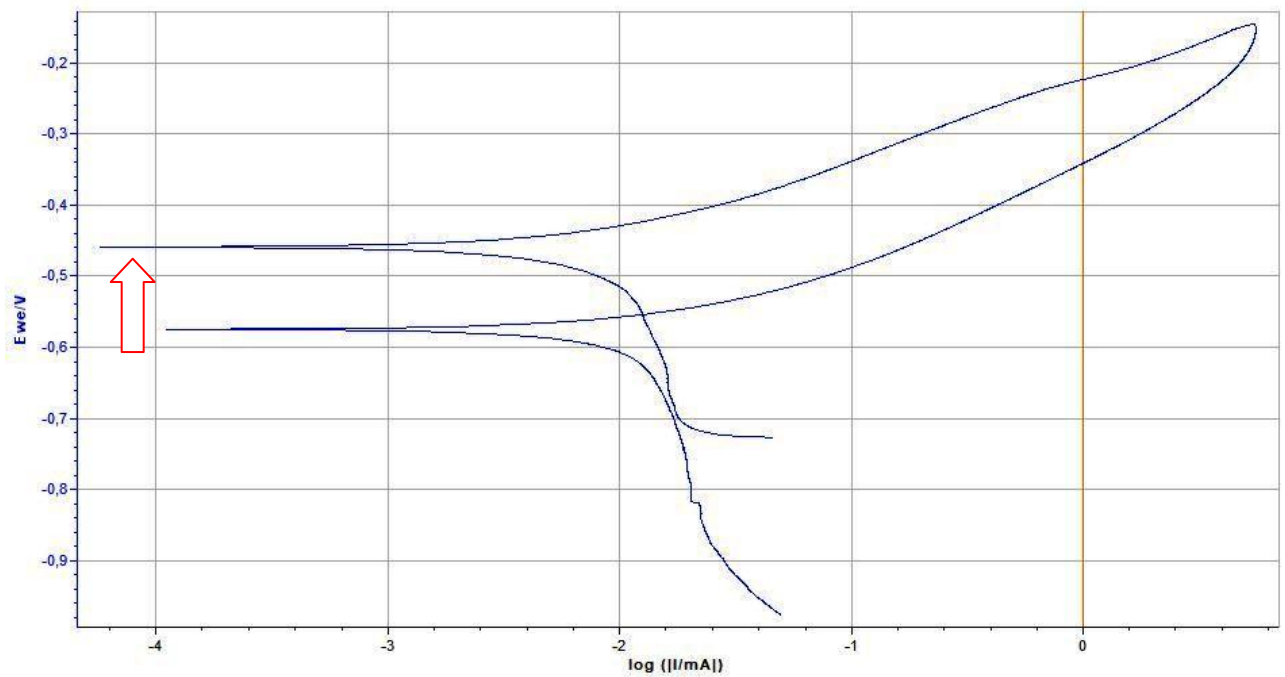
Рисунок 38 - Величини зношування сталі Х12МФ до та після поверхневого зміцнення ЛТО+УЗО: а – статичний режим; б – динамічний режим

При цьому динамічно випробувана величина W_L для зразка, обробленого ультразвуком комбінованим методом, нижча, ніж у початкового зразка, випробуваного в квазістатичних умовах, і в чотири рази нижча, ніж у динамічно випробуваного початкового зразка.

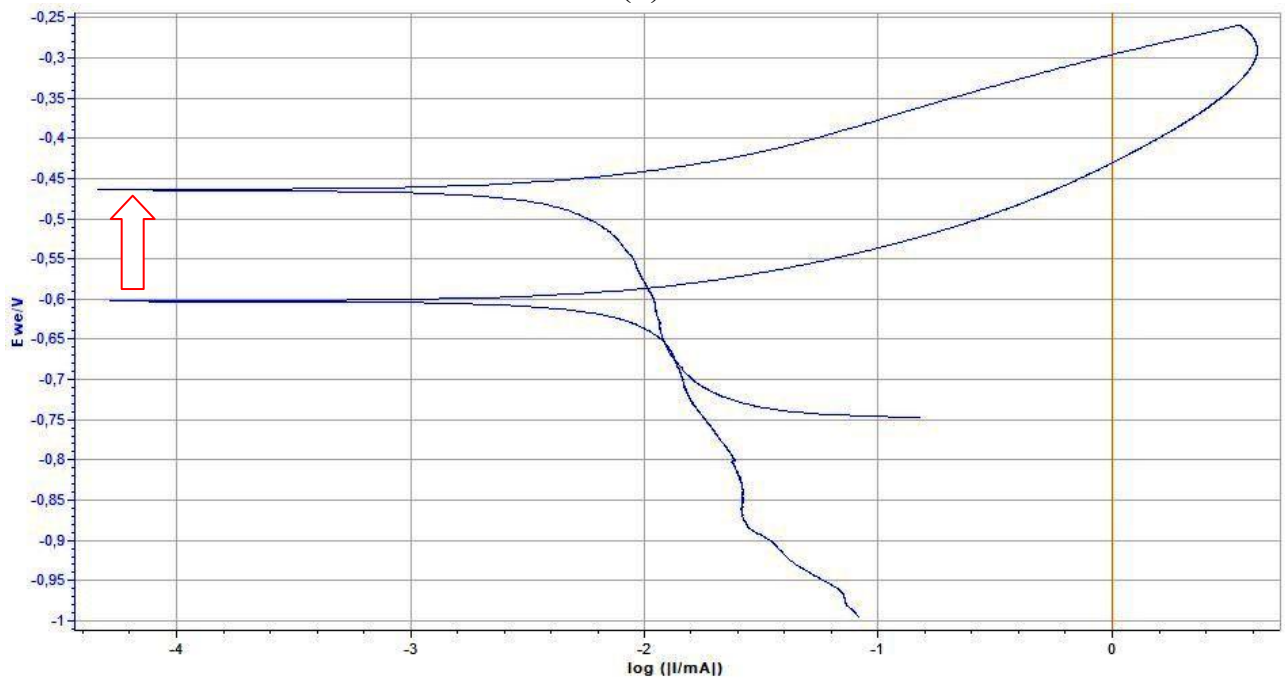
4.6 Корозійна стійкість зміцнених зразків

Випробування зміцнених поверхонь сталі Х12МФ на корозійну стійкість виконували у 3,5% розчині NaCl, оцінивши циклічні поляризаційні криві (Рис. 39).





(б)



(в)

Рисунок 39 – Циклічні поляризаційні криві інструментальної сталі X12МФ у вихідному стані (а) та після ЛТО (б) та ЛТО+УЗО (в)

Результати показують, що оброблені поверхні ЛТО або комбінованим ЛТО+УЗО є більш корозійностійкими (величини потенціалів корозії зменшуються) в порівнянні із необробленими поверхнями досліджуваної сталі.

5. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

5.1 Алгоритм керування комбінованим лазерно-ультразвуковим процесом поверхневого зміцнення та оздоблювання штампових сталей

На основі результатів експериментальних та теоретичних досліджень, розроблено алгоритм визначення вхідних технологічних режимів комбінованого лазерно-ультразвукового оброблення інструментальних сталей за роздільною схемою (Рис. 40). Слід зазначити, що в даній роботі пропонується процес лазерного термозміцнення (волоконний лазер в поєднанні із сканувальною оптикою) досліджуваних сталей з підтриманням постійної температури нагрівання ($A_{C3} < T_n < T$). Розміри лазерного променя, температура нагрівання, швидкість лазерного оброблення та швидкість/амплітуда сканування лазерного променя є найбільш впливовими параметрами.

Попереднє визначення температури нагрівання лазерним променем здійснюється з урахуванням хімічного складу сталі згідно діаграми стану Fe–C (Fe–C–Cr для досліджуваної сталі X12МФ), обмежуючи діапазон температури надмірного нагрівання ($A_{C3} < T_n < T_{пл}$). Для звуження діапазону температури повної аустенізації досліджуваних сталей, критичні точки температури структурно-фазових перетворень при нагріванні (охолодженні) визначаються згідно термкінетичної моделі, обмежуючи тривалість лазерного впливу ($0.01 \text{ с} < t_l < 1.5 \text{ с}$). На даному етапі також визначаються об'ємні частки складових структури та мікротвердість в приповерхневому шарі залізовуглецевих сплавів з використанням експериментальної моделі. Виміряна температура нагрівання на поверхні лазерним пірометром узгоджується із температурою, визначеною за допомогою термофізичної моделі.

Наступний процес ультразвукового фінішного оброблення може бути застосований якщо параметри поверхневого шару (глибина зміцнення, твердість) задовольняють необхідні значення (Рис. 40).

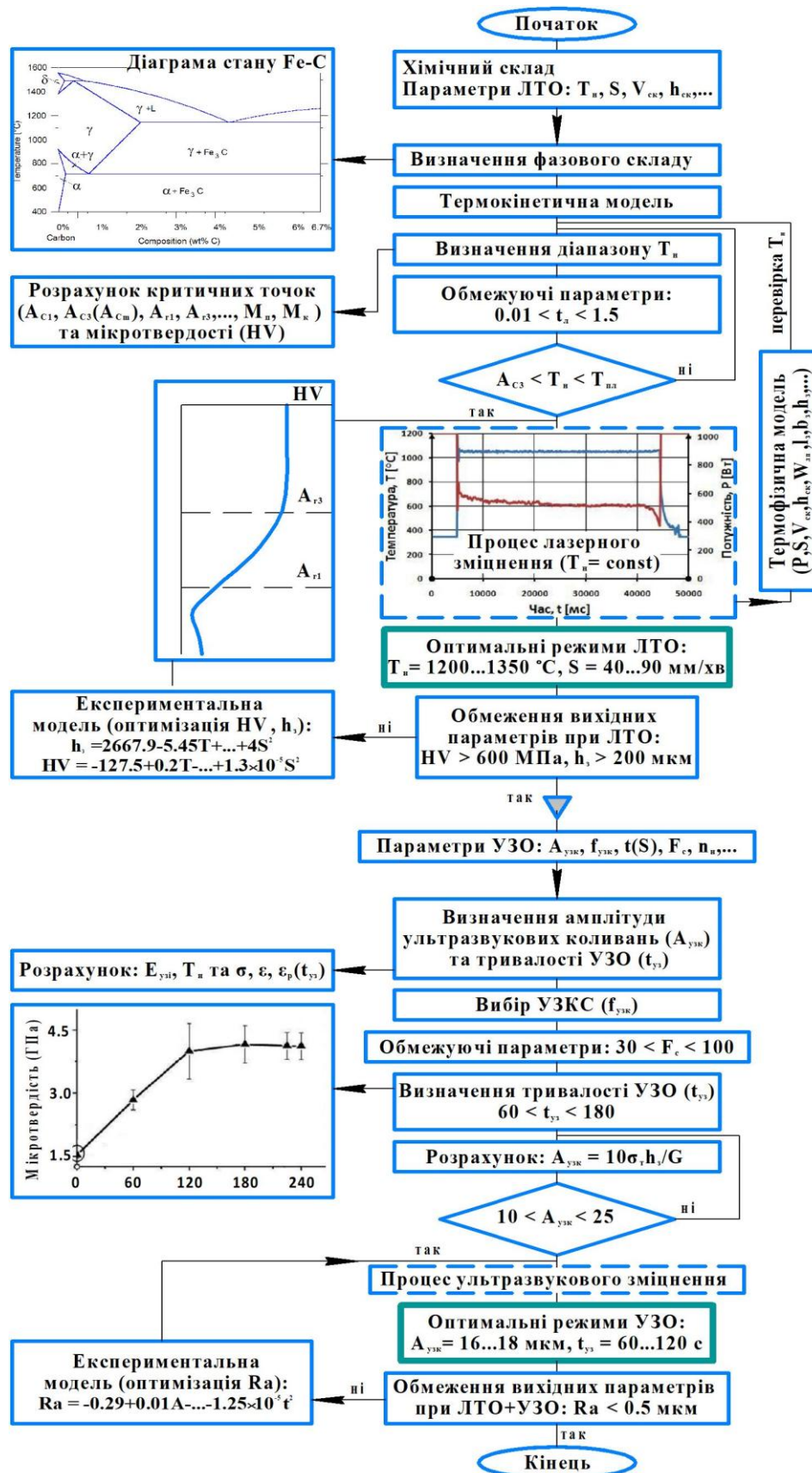


Рисунок 40 - Алгоритм керування технологічних режимів комбінованого лазерно-ультразвукового оброблення штампованих сталей

Амплітуда ультразвукових коливань концентратора ($10 \text{ мкм} < A_{\text{узк}} < 25 \text{ мкм}$) та тривалість оброблення ($60 \text{ с} < t_{\text{уз}} < 180 \text{ с}$) є найбільш важливими параметрами при ультразвуковому обробленні. Діапазон тривалості ультразвукового оброблення досліджуваних сталей визначено на основі попередніх досліджень, обмежуючи статичне навантаження ультразвукового інструменту ($30 \text{ Н} < F_c < 100 \text{ Н}$).

Для отримання максимальної глибини зміцнення, твердості та мінімальної шорсткості поверхні рекомендується використати швидкість лазерного термооброблення 40–90 мм/хв і температуру нагрівання 1270–1340 °С. При цьому швидкість сканування лазерного променя 1000 мм/с та амплітуду сканування лазерного променя 10 мм слід обрати постійними. Оптимальні режими ультразвукового оброблення є наступні: статичне навантаження ультразвукової коливальної системи (УЗКС) 50 Н, швидкість обертання наконечника 76 об-1, амплітуда ультразвукових коливань 16–18 мкм та тривалість УЗО 60–120 с.

5.2 Інші рекомендації

Хотілося б також зазначити, що ультразвукова ударна обробка не обов'язкова з багатобойковим наконечником. Якщо говорити про обробку одnobойковим наконечником, то хотілося б виділити такі його переваги для поверхневого оброблення малогабаритних виробів або виробів складної форми:

1. Точність оброблення: Одnobойкові наконечники дозволяють забезпечити більш точну і місцеву обробку. Це особливо важливо, якщо потрібно впливати на конкретні ділянки поверхні металу, уникнути взаємодії з сусідніми деталями або деталями з іншого матеріалу.
2. Контроль над процесом: Одnobойкові наконечники можуть забезпечити оператору більший контроль над обробкою, оскільки вони дозволяють визначити конкретну точку дії ультразвуку. При цьому, ультразвуковий інструмент може легко бути встановлений в руці робота, сформувавши при необхідності регулярні мікрорельєфи на оброблюваній поверхні.

3. Менший ризик пошкоджень: Оскільки однобойковий наконечник має менший об'єм та активну частину, ймовірність випадкового пошкодження частини металевої поверхні, яка не підлягає обробці, може бути зменшеною.

Також, якщо говорити про матеріал, то сталь X12M є більш розповсюдженою для виготовлення штампового інструменту ніж сталь X12MФ. Різниця між ними пов'язана з їхнім хімічним складом та властивостями.

X12M:

- Містить приблизно 1,2% вуглецю.
- Легована хромом (до 0,6% хрому).
- Застосовується для виготовлення різальних інструментів, таких як ножі, свердла, фрези і т.д.
- Має високу твердість і стійкість до зносу.

X12MФ:

- Має більший вміст хрому (до 1,5%) і молібдену (до 0,4%).
- Містить менше вуглецю, порівняно з X12M.
- Має високу твердість, але додатково володіє підвищеною стійкістю до ударних навантажень і втоми матеріалу.
- Використовується у виробництві інструментів, які піддаються інтенсивному зносу, таких як матриці для гарячого пресування

ВИСНОВКИ

Розроблено 3D-модель досліджуваної матриці вирубного штампу для настільного кріплення, для якої було розроблено керуючі програми в системі Future Cam для технологічних операцій на фрезерному верстаті Sinumerik 840d та електроерозійному верстаті на базі приватного підприємства «Райнпласт Україна». Крім того, відповідні пристрої та схеми базування матриці було спроектовано та запропоновано, виконавши теоретичні дослідження напруженого стану матриці виробного штампу в умовах її експлуатації для забезпечення необхідної надійності.

На основі огляду передових методів поверхневого зміцнення, було обрано методи лазерного термооброблення (вископотужний волоконний лазер + сканувальна 2D оптика) та комбінованого лазерно-ультразвукового оброблення в якості фінішної операції для поверхневого зміцнення матриці вирубного штампу. Особливості лазерного термозміцнення сканувальним лазерним променем за стратегією постійної температури нагрівання та ультразвукового ударного зміцнення багатобойковим наконечником було проаналізовано.

Проведено експериментальне дослідження впливу лазерного термооброблення та комбінованого лазерно-ультразвукового оброблення на геометричні параметри мікрорельєфу поверхні, твердість і мікроструктуру приповерхневих шарів високохромистої інструментальної сталі X12МФ. Для отримання мартенситної мікроструктури з дрібнодисперсними вторинними карбідами хрому високої твердості/міцності рекомендовано проводити комбінований процес поверхневого зміцнення інструментальної сталі волоконним лазером у поєднанні зі сканером при температурі нагріву 1270–1340 °С, швидкість подачі зразка 60–90 мм/хв., швидкості сканування лазерного променя 1000 мм/с та амплітуді сканування 10 мм. Для УЗО рекомендуються такі параметри: навантаження ультразвукового інструменту 50 Н, швидкість обертання багатобойкового наконечника 8,8 об/хв, амплітуда ультразвукових коливань 18 мкм і тривалість оброблення 120 с. Режими ЛТО було оптимізовано із використанням математичного планування експерименту.

Використовуване лазерне термооброблення призвело до достатньо високого зміцнення (~ 52 HRC) приповерхневого шару (300–350 мкм) за рахунок структурно-фазового перетворення. Це також створювало помірні залишкові напруження стиску (приблизно -200 МПа) у зоні теплового впливу товщиною близько 350 мкм. Ультразвукове оброблення викликало підвищення величин твердості (~ 58 HRC) та залишкових напружень стиску (приблизно -400 МПа) в приповерхневому шарі, а також значне зменшення шорсткості поверхні після ЛТО ($R_a = 0,3$ мкм) за рахунок інтенсивної пластичної деформації.

Процес фінішної обробки ультразвуком, який послідовно застосовується після лазерного термооброблення, призводить до подальшого подрібнення зерен/субзерен та утворення вторинних карбідів в приповерхневому шарі сталі Х12МФ, що призводить до підвищення зносостійкості та корозійної стійкості.

ДОДАТКИ

Додаток А

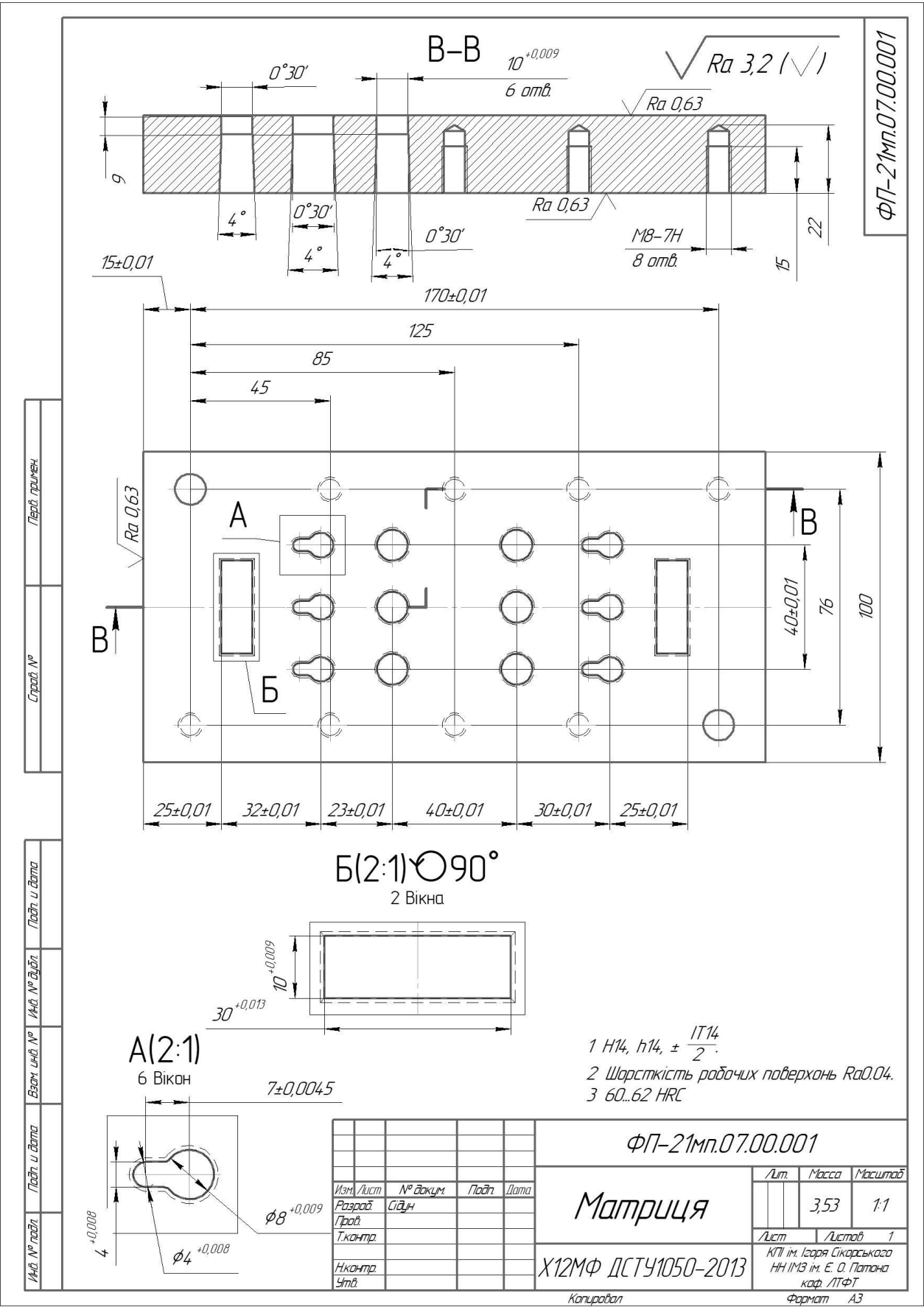


Рисунок А.1 – Кресленник деталі «Матриця»

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

УЗО – ультразвукове оброблення

ЛТО – лазерна термооброблення

ПД – інтенсивна пластична деформація

УЗКС – ультразвукова коливальна система

ISO – міжнародна організація по стандартизації

ПІ – пропорційно інтегральний

HRC – твердість за Роквеллом

ЗТВ – зона термічного впливу

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ремонтне зварювання. Конспект лекцій для студентів напряму підготовки 6.050504 «Зварювання» / Укладачі: С. М. Гетманець, Д. В. Степанов – К.: НТУУ «КПІ», 2012. -60 с.
2. <https://pstu.edu.uk/innovacziyi/plazmove-poverhneve-zmicznennya-instr-2/>
3. Ультразвукова обробка технологічної сировини полімерних композиційних матеріалів [Електронний ресурс]: навчальний посібник для підготовки аспірантів, які навчаються за спеціальністю «Галузеве машинобудування» / О. П. Колосова, В. В. Ванін, О. Є. Колосов, В. І. Сівецький; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 7,68 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 188 с.
4. Ультразвуковая ударная обработка металлоконструкций. А. А. Новик ООО «Ультразвуковая техника – ИНЛАБ», 2016
5. Снижение остаточных сварочных напряжений. А. А. Антонов, к.т.н. доцент РГУ Нефти и газа им. Губкина, Москва А. П. Летуновский, генеральный директор ООО "МАГНИТ плюс", № 5. – С. 113–121, 2012
6. Структура і властивості сталі 20ГЛ після електроіскрового легування ніклем і молібденом та ультразвукового ударного оброблення, Г. І. Прокопенко, Б. М. Мордюк, П. Ю. Волосевич, С. П. Ворона, Т. В. Попова, Н. О. Піскун, 2017
7. <https://www.ipgphotonics.com/ru/applications/obrabotka-materialov/termicheskaya-obrabotka>
8. Конспект лекцій з дисципліни „Формування структури і властивостей при лазерній поверхневій обробці” для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 132 «Матеріалознавство» усіх форм навчання / Укл.: Косинська О.Л. - Кам'янське, ДДТУ, 2019 р., 47 с.
9. Погребна Н.Е., Куцова В. З., Котова Т. В. Способы зміцнення металів: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. - 89 с.
10. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Неруйнівні методи контролю: Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2016. - 192 с.

- 11.Майборода Віктор Станіславович; Гейчук Володимир Миколайович; Степанов О. В. Спосіб магнітно – абразивної об'ємної обробки: Патент, МПК В24В31/112, 2007.01
- 12.Panin V. E. Multilevel wave model of a deformed solid in physical mesomechanics / Panin V. E., Grinyaev Yu. V., Panin A. V., Panin S. V. // Proceedings of the Sixth International Conference for Mesomechanics «Multiscaling in Applied Science and Emerging Technology. Fundamentals and Applications in Mesomechanics», 2004. – P. 335 – 342.
- 13.Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування [Електронний ресурс] : підр. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології», спеціалізації «Електрохімічні технології неорганічних та органічних матеріалів» / М. В. Бик, О. І. Букет, Г. С. Васильєв – Електронні текстові дані (1 файл: 8,81 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 318 с.
- 14.A Comparative Study of High-Power Diode Laser and CO2 Laser Surface Hardening of AISI 1045 Steel / Ruifeng Li, Yajuan Jin, Zhuguo Li, and Kai Qi, 2014
- 15.Особливості процесу лазерного зміцнення інструментів для обробки матеріалів Л.Ф. Головка / Бехраван Фарзад, Хаджиха Хамед, 2008
- 16.Є.В. Іващенко, О.П. Красавін, Н.В. Франчік, А.С. Ходаківський, Модифікування поверхні сплаву заліза з хромом при насиченні вуглецем з обмазок у процесі лазерної обробки, 2010
- 17.Вплив гвинтової екструзії та наступного вальцювання на текстуру та мікроструктуру сталі / О. І. Соколенко, Н. М. Шкатуляк, 2015
- 18.https://elearning.sumdu.edu.ua/free_content/lectured:c025ee0d1cacd40c9b6db4f8ec2bad8c5184bb2c/latest/472197/index.html
- 19.Погребова І. С. Інгібітори корозії металів: Навчальний посібник. – К.: «Хай-Тек Прес», 2012. – 296 с.
- 20.Велика О.Т. Розрахунок прямокутної матриці прес-форми на міцність і жорсткість / О.Т. Велика, В.Г. Топільницький, М.В. Бойко, Р.В. Лампіка

// Автоматизація виробничих процесів в машинобудуванні та приладобудуванні : Міжгалузевий зб. наук. праць. – 2010. – Вип. 44. – С. 74-79

- 21.Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч.2. Параметри лазерного випромінювання: монографія / Ю. П. Мачехін, О. С. Гнатенко; Харків : ФОП Панов А.М., 2021. – 145 с.
- 22.Lesyk D. A. Selective surface modification of complexly shaped steel parts by robot-assisted 3D scanning laser hardening system / D. A. Lesyk, M. Hruska, O. O. Danyleiko, M. Honner, V. V. Dzhemelinskyi // In: Karabegović I. (eds) New Technologies, Development and Application IV. NT 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 472. Springer, Cham. – 2022. – P. 30–36, https://doi.org/10.1007/978-3-031-05230-9_3
- 23.Morduyk B. N. Ultrasonic impact peening for the surface properties management / B. N. Morduyk, G. I. Prokopenko // J. Sound and Vibr. – 2007. – Vol. 308. – P. 855-866
- 24.Kovalenko, V, Zhuk, R. (2004). Systemized approach in laser industrial systems design. J. Mater. Proc. Technol., 149, 1, 553-556. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.020>
- 25.Enhancing hardness in overlapping scanner-based laser area of carbon and tool steel by multi-pin ultrasonic impact peening D. A. Lesyk, W. Alnusirat, S. Martinez, V. V. Dzhemelinskyi, B. N. Morduyk, A. Lamikiz. 20
- 26.Surface microrelief and hardness of laser hardened and ultrasonically peened AISI D2 tool steel D.A. Lesyk, S. Martinez, V.V. Dzhemelinskyy, A. Lamikiz, B.N. Morduyk, *, G.I. Prokopenko, 2015
- 27.S. Santhanakrishnan, N.B. Dahotre, Laser surface hardening, ASM Handbook on Heat Treating Irons and Steels, American Society for Materials (ASM) International, Materials, Park, Ohio, 2013.
28. Y. Lv, L. Lei, L. Sun, Effect of shot peening on the fatigue resistance of laser surface melted 20CrMnTi steel gear, Mater. Sci. Eng. A 629 (2015) 8–15.

29. E. Ukar, A. Lamikiz, L.N. Lopez de Lacalle, S. Martinez, F. Liebana, I. Tabernero, Thermal model with phase change for process parameter determination in laser surface processing, *Phys. Procedia* 5 (2010) 395–403.
30. S. Santhanakrishnan, F. Kong, R. Kovacevic, An experimentally based thermo-kinetic phase transformation model for multi-pass laser heat treatment by using high power direct diode laser, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 64 (2013) 219–238.
31. C. Suryanarayana, M.G. Norton, *X-ray Diffraction: A Practical Approach*, Plenum, New York, 1998.
32. Microstructure related enhancement in wear resistance of tool steel AISI D2 by applying laser heat treatment followed by ultrasonic impact treatment D.A. Lesyk, S. Martinez, B.N. Mordyuk, *, V.V. Dzhemelinskyi, A. Lamikiz, G.I. Prokopenko, Yu. V. Milman, K.E. Grinkevych. 2017
33. Lesyk, D.A., Martinez, S., Mordyuk, B.N., Dzhemelinskyi, V.V., Danyleiko, O.O.: Effects of the combined laser-ultrasonic surface hardening induced microstructure and phase state on mechanical properties of AISI D2 tool steel, In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lect. Notes Mech. Eng.* 188–198 (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_19
34. Ismail, M.I.S., Taha, Z.: Surface hardening of tool steel by plasma arc with multiple passes. *Mech. Eng.* 5, 53332250 (2014). <https://doi.org/10.14716/ijtech.v5i1.156>
35. V. Kostov, J. Gibmeier, A. Wanner, Laser surface hardening of steel: effect of process atmosphere on the microstructure and residual stresses, *Mater. Sci. Forum* 772 (2014) 149–153.
36. S.J. Hindus, S.H. Kumar, S.X. Arockiyaraj, M.V. Kannan, P. Kuppan, Experimental investigation on laser assisted surface tempering of AISI D2 tool steel, *Proc. Eng.* 97 (2014) 1489–1495.