

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Підвищення фізико-механічних властивостей поверхневого шару сталевих деталей лазерно-ультразвуковою обробкою

Рівень вищої освіти: другий магістерський

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Відновлення та технічний сервіс автомобілів

Шифр: КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу,
група МТВАм -24-1

 Максим ЖУНЬОВ

Керівник, д.т.н., професор

 Олександр ДИХА

Нормоконтролер, к.т.н., доцент

 Олег БАБАК

До захисту допускаю:
завідувач кафедри ТАМ

 Олександр ДИХА

7 12 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра: трибології, автомобілів та матеріалознавства
Рівень вищої освіти: другий магістерський
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 132 Матеріалознавство
Освітня програма: Відновлення та технічний сервіс автомобілів

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ

Олександр ДИХА

" 15" жовтня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Жуньов Максим Русланович

1. Тема роботи: Підвищення фізико-механічних властивостей поверхневого шару сталевих деталей лазерно-ультразвуковою обробкою

ерівник роботи: Диха Олександр Володимирович, д.т.н., проф.

Затверджено наказом університету від 25.08.2025р. № 65

2. Строк подання студентом роботи на кафедру: 15.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

- 1) Дані про умови роботи устаткування для ультразвукового зміцнення
- 2) Технічні умови на ремонт та відновлення деталей автомобільної техніки
- 3) Матеріали переддипломної практики.
- 4) Нормативно – технологічна документація по лазерним та ультразвуковим методам обробки
- 5) Результати літературного огляду і патентного пошуку.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Обґрунтування актуальності впровадження технології комбінованої лазерно-ультразвукової обробки деталей машин

2. Огляд літературних джерел та патентно-інформаційних матеріалів щодо особливостей лазерного та ультразвукового поверхневого зміцнення деталей

3. Дослідження якості поверхневого шару деталей машин при обробці комбінованою лазерно-ультразвуковою обробкою

4. Розробка способу і установки для комбінованої лазерно-ультразвукової обробки деталей машин

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра: трибології, автомобілів та матеріалознавства
Рівень вищої освіти: другий магістерський
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 132 Матеріалознавство
Освітня програма: Відновлення та технічний сервіс автомобілів

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ

Олександр ДИХА

" 15" жовтня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Жуньов Максим Русланович

1. Тема роботи: Підвищення фізико-механічних властивостей поверхневого шару сталевих деталей лазерно-ультразвуковою обробкою

ерівник роботи: Диха Олександр Володимирович, д.т.н., проф.

Затверджено наказом університету від 25.08.2025р. № 65

2. Строк подання студентом роботи на кафедру: 15.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

- 1) Дані про умови роботи устаткування для ультразвукового зміцнення
- 2) Технічні умови на ремонт та відновлення деталей автомобільної техніки
- 3) Матеріали переддипломної практики.
- 4) Нормативно – технологічна документація по лазерним та ультразвуковим методам обробки
- 5) Результати літературного огляду і патентного пошуку.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Обґрунтування актуальності впровадження технології комбінованої лазерно-ультразвукової обробки деталей машин
2. Огляд літературних джерел та патентно-інформаційних матеріалів щодо особливостей лазерного та ультразвукового поверхневого зміцнення деталей
3. Дослідження якості поверхневого шару деталей машин при обробці комбінованою лазерно-ультразвуковою обробкою
4. Розробка способу і установки для комбінованої лазерно-ультразвукової обробки деталей машин

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра: трибології, автомобілів та матеріалознавства
Рівень вищої освіти: другий магістерський
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 132 Матеріалознавство
Освітня програма: Відновлення та технічний сервіс автомобілів

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ

Олександр ДИХА

" 15" жовтня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Жуньов Максим Русланович

1. Тема роботи: Підвищення фізико-механічних властивостей поверхневого шару сталевих деталей лазерно-ультразвуковою обробкою

ерівник роботи: Диха Олександр Володимирович, д.т.н., проф.

Затверджено наказом університету від 25.08.2025р. № 65

2. Строк подання студентом роботи на кафедру: 15.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

- 1) Дані про умови роботи устаткування для ультразвукового зміцнення
- 2) Технічні умови на ремонт та відновлення деталей автомобільної техніки
- 3) Матеріали переддипломної практики.
- 4) Нормативно – технологічна документація по лазерним та ультразвуковим методам обробки
- 5) Результати літературного огляду і патентного пошуку.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Обґрунтування актуальності впровадження технології комбінованої лазерно-ультразвукової обробки деталей машин
2. Огляд літературних джерел та патентно-інформаційних матеріалів щодо особливостей лазерного та ультразвукового поверхневого зміцнення деталей
3. Дослідження якості поверхневого шару деталей машин при обробці комбінованою лазерно-ультразвуковою обробкою
4. Розробка способу і установки для комбінованої лазерно-ультразвукової обробки деталей машин

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки – 90 сторінок, кількість рисунків - 21, таблиць - 10, додатків - 1, кількість джерел згідно із переліком посилань - 20.

Студент гр. МТВАм-24-1 Жуньов М.Р.

Тема «Підвищення фізико-механічних властивостей поверхневого шару сталевих деталей лазерно-ультразвуковою обробкою»

Комбіноване лазерно-ультразвукове зміцнення та оздоблювання є одним із ефективних способів підвищення якості поверхневого шару. Подальший розвиток та впровадження комбінованої технології ЛО+УЗО стримується відсутністю системних досліджень впливу режимів обробки на зміну мікрорельєфу і фізико-механічних властивостей поверхневого шару.

Мета роботи полягає в поліпшенні мікрорельєфу та підвищення фізико-механічних властивостей поверхневого шару сталевих зразків комбінованою лазерно-ультразвуковою обробкою.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі задачі:

1. Розробка способу лазерної обробки з підтриманням постійної температури нагрівання та наступної ультразвукової обробки бойковими наконечниками.

2. Проведення теоретичних та експериментальних досліджень режимів дії лазерного променя і ультразвукового інструменту та дослідити вплив на параметрами якості поверхневого шару.

3. Дослідження особливостей мікрорельєфу і фізико-механічних властивостей поверхневого шару, а також визначити зносо- та корозійну стійкість поверхонь сталевих зразків.

4. Розробка пристроїв для практичного використання технологічних процесів комбінованої лазерно-ультразвукової зміцнювально-оздоблювальної обробки сталевих деталей.





Перелік ключових слів: лазерна обробка, ультразвукова обробка, зносостійкість, мікрорельєф, комбінована технологія

Зміст

Вступ

6

| | |
|--|----|
| 1. ОБҐРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ МАШИННИХ ДЕТАЛЕЙ | 7 |
| 1.1. Основи та особливості застосування лазерних технологій у матеріалообробці | 7 |
| 1.2. Основи організації та технологія технічного обслуговування і ремонту машин | 12 |
| 1.3. Обґрунтування теми та формулювання задачі досліджень | 15 |
| 2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ Й ПАТЕНТІВ ЩОДО ЛАЗЕРНОГО ТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ | 18 |
| 2.1. Лазерне та ультразвукове поверхнєве зміцнення | 18 |
| 2.2. Комбіноване лазерне термомодеформаційне зміцнення | 33 |
| 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПІД ЧАС КОМБІНОВАНОЇ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБРОБКИ | 37 |
| 3.1. Теоретичні дослідження | 37 |
| 3.2. Методика експериментальних досліджень | 45 |
| 3.3. Результати експериментальних досліджень | 48 |

| | | | | | | | | |
|----------|--------|---|--------|------|--|------------------------|-------|---------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | Підвищення фізико-механічних властивостей поверхневого шару сталевих деталей лазерно-ультразвуковою обробкою | Літ. | Аркуш | Аркушів |
| Розроб. | Жульов |  | | | | | 4 | 82 |
| Перевір. | Диха |  | | | | ХНУ, гр. МТВАм-24-1 | | |
| Н.контр. | Бабак |  | | | | | | |
| Затвер | Диха |  | | | | | | |

| | |
|--|----|
| 4. РОЗРОБКА УСТАНОВКИ І СПОСОБУ ДЛЯ КОМБІНОВАНОЇ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН | 58 |
| 4.1. Обґрунтування необхідності розробки | 58 |
| 4.2. Вимоги, які ставляться до розробки | 59 |
| 4.3. Опис способу і установки для комбінованої лазерно-ультразвукової обробки деталей машин | 6 |
| | |
| 5. ЗАХОДИ З БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ УСТАТКУВАННЯ З ВІДНОВЛЕННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ | 70 |
| | |
| Висновки | 77 |
| | |
| Список використаних джерел | 80 |
| | |
| Додатки | 82 |

| | | | | | | |
|-----|------|---------|--------|------|---------------------------|-----|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Ст. |
| Зм. | Арк. | № докум | Підпис | Дата | | 5 |

ВСТУП

У сучасних виробничих умовах важливим чинником виходу українських підприємств на міжнародний ринок є виготовлення продукції з високими експлуатаційними характеристиками та оптимальним енергоспоживанням, що досягається завдяки впровадженню новітніх технологічних процесів. Традиційні методи поверхневої обробки часто не дозволяють досягнути бажаної якості поверхневого шару, а застосування високоміцних матеріалів не завжди виправдане з точки зору вартості та технічних характеристик.

З метою підвищення надійності та довговічності деталей, що експлуатуються в умовах інтенсивного зношування, агресивного середовища, високих температурних коливань та великих швидкостей, перспективними є комбіновані та гібридні методи термодформаційної обробки. Особливо ефективним є поєднання лазерного термічного зміцнення (ЛО) з наступним ультразвуковим деформаційним зміцненням (УЗО), яке дозволяє підвищити твердість, забезпечити дрібнозернисту структуру та стабілізувати напружено-деформований стан поверхневого шару. Крім того, це сприяє покращенню мікрогеометрії обробленої поверхні.

Втім, широке впровадження такого комбінованого способу зміцнення й оздоблення металевих деталей (ЛО+УЗО) гальмується недостатністю комплексних досліджень, що вивчають вплив режимів обробки, особливо з урахуванням лазерного сканування та застосування багатобойкових ударних інструментів, на зміну властивостей поверхневого шару, зокрема його рельєфу та фізико-механічних характеристик.

Таким чином, удосконалення методів комбінованої лазерно-ультразвукової обробки сталевих деталей з метою покращення якості поверхні є актуальним науково-практичним завданням.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 6 |

1. ОБҐРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ МАШИННИХ ДЕТАЛЕЙ

1.1. Основи та особливості застосування лазерних технологій у матеріалообробці

Поява перших лазерів наприкінці 1950-х — на початку 1960-х років започаткувала новий етап в обробці матеріалів. Станом на сьогодні, лазери використовуються у понад 350 прикладних сферах — від медицини до промисловості. Одним із найбільш розповсюджених напрямів стало використання лазерів у технологіях обробки матеріалів.

Лазерна обробка швидко перетворилася на самостійну й високотехнологічну галузь у машинобудуванні та приладобудуванні, яка забезпечує багатомільярдні обороти в промисловості. Найбільш ефективним вважається застосування лазерного випромінювання у таких процесах: мікрообробка, різання, зміцнення поверхонь, зварювання, гравіювання, очищення матеріалів, 3D-формування, маркування, а також виготовлення деталей складної конфігурації з листового металу.

Основні типи лазерного обладнання

Існує кілька типів лазерних систем, які класифікують залежно від робочого середовища:

1. **Твердотільні лазери**
2. **Газові лазери**, серед яких особливо виділяються CO₂-лазери
3. **Напівпровідникові лазери**

Також розроблено лазери на барвниках і твердотільні системи на активованих скляних матеріалах.

Серед усіх довготривалих джерел лазерного випромінювання найбільшу практичну цінність мають електророзрядні CO₂-лазери. Вони забезпечують високий ККД перетворення електроенергії у лазерне випромінювання і демонструють потужні імпульси, що робить їх

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 7 |

незамінними в таких операціях, як різання, зварювання металів та поверхневе термічне зміцнення.

Ці лазери також використовуються для ініціювання нетипових хімічних реакцій, розділення ізотопів та експериментальних енергетичних систем. Існують навіть проекти з використання CO₂-лазерів для бездротової передачі енергії між Землею та космічними об'єктами, а також ідеї створення лазерно-реактивних двигунів.

Інші типи лазерів:

- **Електророзрядні лазери низького тиску**, побудовані на основі благородних газів (наприклад, He-Ne або He-Xe), характеризуються малою потужністю, але високою спрямованістю і монохроматичністю. Їх використовують у спектроскопії, метрології, налаштуванні оптичних систем.
- **Аргонові іонні лазери** безперервної дії, що випромінюють у зеленому спектральному діапазоні. Вони застосовуються у медичних технологіях, наукових дослідженнях та нелінійній оптиці.
- **Хімічні лазери** працюють за рахунок енергії, яка виділяється внаслідок хімічних реакцій. Вони можуть працювати як в імпульсному, так і в безперервному режимі. Завдяки широкому спектру випромінювання в інфрачервоній області та високій потужності, ці системи використовуються у спектроскопії, аналітичній хімії, моніторингу атмосферного складу.
- **Напівпровідникові лазери** — це найпоширеніший тип сучасних лазерних джерел. Вони характеризуються компактними розмірами, високим ККД, можуть функціонувати в імпульсному або безперервному режимі. Незважаючи на відносно низьку потужність, вони знайшли широке застосування у таких сферах, як: телекомунікації, вимірювання деформацій, лазерна спектроскопія, робототехніка, оптоелектроніка та системи безпеки.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 8 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

У побутовому сегменті напівпровідникові лазери використовуються в сканерах, лазерних відео- і аудіосистемах, а також у системах сигналізації. Завдяки своїй мініатюрності вони також широко застосовуються в медицині, зокрема в хірургії, дерматології, офтальмології.

Крім того, лазери з електронним накачуванням розглядаються як перспективна технологія для розвитку систем проєкційного лазерного телебачення.

Використання рубінового лазера та перспективи лазерної обробки в промисловості.

Рубінові лазери: особливості та застосування

Рубіновий кристал, що використовується як активне середовище в лазерах, характеризується високим енергетичним порогом запуску генерації випромінювання, через що ефективність його роботи (ККД) не перевищує 0,5%. Крім того, продуктивність такого лазера значно залежить від температури навколишнього середовища, що обмежує частоту повторення імпульсів до 10 Гц або нижче. Проте рубінові лазери відзначаються високою термостійкістю і стійкістю до перегріву.

Широке промислове використання обмежується через значну вартість вирощених спеціальним чином рубінових кристалів, особливо великого розміру. Зазвичай ці лазери застосовують там, де потрібна довжина хвилі випромінювання 694 нм, або де вимоги до вихідної енергії та ККД не є критичними. Наприклад, рубінові лазери активно використовуються в голографії, оскільки забезпечують точне формування зображення завдяки малому фокусному плямі.

Попри прогнози щодо їх застарілості, рубінові лазери досі знаходять застосування. Так, у мікрозварюванні напівпровідникових пристроїв на основі арсеніду галію (GaAs) використовують короткі імпульси рубінового лазера (тривалість — близько 100 наносекунд), що значно скорочує

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 9 |

тривалість процесу порівняно з традиційними методами (5–30 хвилин). Така технологія є актуальною у виготовленні електроніки для супутників, реактивних двигунів, енергетики, ядерної техніки, радіолокаційних пристроїв, мікрохвильових інтегральних схем тощо.

Основні напрями лазерної обробки матеріалів

Мікрообробка

Із самого початку появи лазерних систем вони почали активно використовуватись для високоточної мікрообробки. Висока щільність енергії лазерного променя дозволяє точно й керовано видаляти незначні об'єми матеріалу. Сьогодні стало можливим створення мікроотворів у різноманітних матеріалах незалежно від їх фізико-хімічних властивостей.

Розкрій та різання

Лазерне різання набуло широкого застосування завдяки високій точності обробки і мінімальній втраті матеріалу. У порівнянні з традиційними методами, лазер забезпечує вузьку ширину різку та оптимізовану схему розкрою. Цей підхід особливо ефективний при обробці складних контурів.

Технологія лазерного різання активно впроваджується в автомобілебудуванні, аерокосмічній галузі, суднобудуванні, електротехніці, текстильній промисловості та аграрному машинобудуванні. Специфічні завдання — зокрема дистанційне різання у зонах підвищеної радіації — вирішуються за допомогою лазерного обладнання, наприклад, під час демонтажу елементів на об'єкті "Укриття" Чорнобильської АЕС.

Зварювання

Завдяки точності та керованості лазерного випромінювання, воно ефективно використовується для нероз'ємного з'єднання різноманітних матеріалів. Можливе зварювання як мікроплівок, так і товстостінних сталевих конструкцій (понад 10 см завтовшки). Лазер відмінно підходить

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 10 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

для з'єднання алюмінієвих, титанових сплавів, а також комбінованих листових матеріалів різної товщини.

Гравіювання та маркування

Лазерна технологія дає змогу швидко та безконтактно маркувати різноманітні поверхні з високою точністю. Це можна робити як на поверхні, так і всередині прозорих матеріалів. Цей метод широко використовується у ювелірному виробництві, виготовленні сувенірів, технічному маркуванні металів, скла, дерева тощо.

Завдяки лазеру також стало можливим створення багат шарових носіїв інформації, наприклад, компакт-дисків, де дані записуються в кілька шарів із можливістю зчитування з будь-якого з них.

Динамічне балансування

Вироби з високими обертами, як-от гіроскопи, турбіни чи двигуни, потребують точного динамічного балансування. Лазер дозволяє видалити надлишкову масу з надзвичайною точністю, що забезпечує стабільність роботи пристрою.

Очищення поверхонь

Лазери ефективно застосовуються для безконтактного очищення металевих поверхонь від забруднень, старих покриттів, оксидів. Раніше лазери використовувалися здебільшого для зняття ізоляції з проводів, однак сьогодні спектр задач значно розширився. Це особливо важливо для мікроелектроніки, де важлива точність і відсутність механічного впливу.

Формування просторових форм

Контрольоване теплове впливання лазера дає змогу змінювати форму листового металу без використання прес-форм або матриць. Таким чином можна отримати складні конструкції, трубчасті деталі, гнуті поверхні, не вдаючись до дорогого інструментарію. Ця технологія ідеальна для обробки малих партій деталей.

Комбіновані методи та спеціалізовані технології.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 11 |

Поєднання лазерного нагріву з механічною обробкою відкриває нові можливості — наприклад, для обробки твердих і надтвердих матеріалів. Комбіновані процеси підвищують продуктивність і знижують знос інструменту.

Лазерні технології в промисловості України.

На сьогодні лазерні технології впроваджуються в українське виробництво, проте темпи розвитку залишаються помірними. Найбільше поширення отримали установки для лазерного різання, які здатні розрізати сталь завтовшки до 20 мм зі швидкістю понад 10 м/хв, забезпечуючи при цьому високу якість обробки. Лазерні верстати з числовим програмним управлінням дозволяють оперативно змінювати програму для обробки нових деталей, що особливо важливо для дрібносерійного виробництва.

Лазерне поверхнєве зміцнення також активно розвивається в Україні. Зокрема, його застосовують у турбінобудуванні для локального підсилення критичних зон, таких як робочі поверхні лопаток. Цей метод потребує врахування понад 30 параметрів, що ускладнює повний контроль, але забезпечує унікальні технологічні результати.

Деякі українські підприємства вже впровадили лазерні комплекси — зокрема, завод "Більшовик" у Києві, "Зоря" у Миколаєві, а також концерн "Лан" в Олександрії.

Щодо обладнання, то вітчизняне виробництво має значний потенціал. Вартість українських лазерних систем у 2–3 рази нижча, ніж іноземних аналогів. Ще у 1990-х роках в Україні розробили установку "Лазурит-2,5" потужністю 2,5 кВт, холодильники для лазерів, оптичні системи. Проте більшість цього обладнання вже морально застаріла і потребує оновлення.

1.2. Основи організації та технологія технічного обслуговування і ремонту машин

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 12 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Система технічного обслуговування (ТО) машин являє собою сукупність взаємопов'язаних організаційно-технологічних заходів, спрямованих на забезпечення справного технічного стану техніки під час експлуатації.

Такий підхід до обслуговування класифікується як планово-попереджувальний, оскільки його головна мета — запобігання відмовам і поломкам. Усі види ТО виконуються у визначені заздалегідь терміни згідно з планом. Ремонтні роботи, хоча й передбачаються заздалегідь, проводяться лише за наявності фактичної потреби, відповідно до технічного стану машини. Запобіжний характер системи полягає у здійсненні діагностичних та профілактичних дій, що дозволяють уникнути несправностей протягом інтервалу між обслуговуваннями.

У сільськогосподарських підприємствах технічне обслуговування енергетичних засобів і аграрної техніки виконується за встановленим циклом, залежно від типу машини. ТО-1, ТО-2 і ТО-3 для тракторів здійснюються на спеціально обладнаних стаціонарних постах виробничої бази. Проведення кожного виду обслуговування регламентується технічною документацією та включає:

- виявлення і усунення всіх виявлених несправностей;
- дотримання екологічних вимог — уникнення забруднення ґрунтів і водою паливно-мастильними матеріалами;
- діагностику допоміжних систем двигуна при ТО-1;
- перевірку робочих механізмів, особливо тих, що впливають на безпечність та економічність експлуатації (наприклад, оцінка стану зчеплення — при зношенні натискного диска може знадобитися механічне відновлення).

Комбайни та інші складні машини потребують технічного обслуговування на постійній основі — перед кожною зміною, планово та після завершення сезону.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 13 |

З метою підвищення ефективності функціонування машинно-тракторного парку в сільському господарстві впроваджуються сучасні ґрунтозахисні, енергоефективні та трудозберігаючі технології, які адаптовано під умови конкретного господарства, його організаційну структуру та систему управління технікою.

До основних процедур ТО МТП (машинно-тракторного парку) входять:

- технічний огляд і діагностика;
- забезпечення необхідними ПММ та матеріалами;
- оперативне усунення несправностей у процесі експлуатації;
- організація правильного зберігання техніки.

Оскільки навантаження на трактори упродовж року є нерівномірним, планування періодичності ТО повинне здійснюватися з урахуванням сезонної специфіки.

Річне планування ТО включає:

- визначення графіку та кількості обслуговувань і ремонтів по кожній одиниці техніки;
- розрахунок трудових витрат;
- планування фінансових витрат на ТО та ремонт.

План-графік ТО формується на підставі затверджених обсягів тракторних і механізованих робіт, прогнозованого завантаження кожної машини, даних щодо технічного стану техніки на початок року, а також регламентованих інтервалів між ТО і ремонтами.

Зберігання техніки

Сільськогосподарські машини розміщуються на зберігання як у відкритих майданчиках, так і в ангарних приміщеннях. При цьому потрібно дотримуватися таких норм розміщення:

- мінімальна відстань між машинами в одному ряду — не менше 0,7 м;
- між рядами — не менше 6 м.

Підготовка техніки до тривалого зберігання включає:

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 14 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

- повне очищення та миття;
- заміну масла та змащення підшипників;
- демонтаж агрегатів і вузлів, що потребують зберігання у спеціальних складських приміщеннях.

Особливі вимоги до зберігання окремих елементів:

- гумові та гумово-текстолітові деталі — у сухому, добре провітрюваному приміщенні;
- акумуляторні батареї — в окремому приміщенні з вентиляцією та зниженою температурою.

Контроль стану техніки на зберіганні здійснюється щомісячно.

Перевіряється:

- правильність установки та фіксації машин;
- стійкість конструкцій;
- відсутність деформацій довгих деталей;
- комплектність агрегатів;
- тиск повітря в шинах;
- відсутність витоків мастил;
- герметизація отворів;
- стан захисних покриттів і пристроїв.

1.3. Обґрунтування теми та формулювання задачі дослідження

Лазерне термозміцнення сталей, подібно до класичних методів гартування, базується на утворенні аустенітної фази в процесі швидкісного нагрівання з подальшим її перетворенням у мартенсит під час інтенсивного охолодження. У той же час, зміна фізико-механічних властивостей кристалічних матеріалів при ультразвуковому (УЗ) деформаційному зміцненні зумовлена складними процесами розмноження, перерозподілу та взаємодії точкових і лінійних дефектів кристалічної решітки.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 15 |

Аналіз наявних підходів до використання лазерного термічного зміцнення із застосуванням скануючого променя засвідчив його ефективність при обробці великогабаритних сталевих деталей. Крім того, перспективним напрямком є поєднання цього методу з УЗ ударною обробкою багатобойковими інструментами, що дозволяє отримати високі показники міцності та зносостійкості поверхневого шару.

Дослідження показали, що комбіноване застосування лазерної обробки (ЛО) та ультразвукового оздоблення (УЗО) є одним з ефективних способів формування зміцненого шару з покращеним мікрорельєфом. Водночас широке впровадження даної технології стримується відсутністю системних досліджень, спрямованих на встановлення зв'язків між параметрами режимів обробки та властивостями сформованого поверхневого шару, зокрема мікрорельєфом, мікротвердістю та зносостійкістю.

З аналізу теоретичних основ та результатів експериментів у сфері лазерного й ультразвукового зміцнення та обробки можна зробити висновок, що актуальними залишаються такі проблеми:

- уникнення перегріву або оплавлення елементів складної геометрії при безперервному скануванні променем;
- оптимізація перекриття лазерних доріжок з метою забезпечення однорідності властивостей зміцненого шару.

Таким чином, обрана тематика дослідження є актуальною й перспективною, оскільки її результати сприятимуть подальшому розвитку технологій зміцнення деталей, що знаходять широке застосування у машинобудуванні та ремонтному виробництві.

Мета дослідження

Поліпшення мікрогеометрії та підвищення фізико-механічних характеристик поверхневого шару сталевих виробів шляхом реалізації комбінованої лазерно-ультразвукової обробки.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 16 |

Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі науково-технічні завдання:

1. **Розробити методику реалізації лазерної обробки з підтриманням стабільної температури у зоні дії скануючого лазерного променя, із подальшим застосуванням ультразвукової оздоблювальної обробки за допомогою багатобойкових наконечників.**

2. **Провести теоретичне та експериментальне дослідження взаємозв'язків між вхідними технологічними параметрами (інтенсивністю лазерного нагріву, швидкістю переміщення променя, частотою УЗ ударів тощо) та вихідними характеристиками якості поверхневого шару.**

3. **Дослідити вплив комбінованої дії ЛО та УЗО на формування мікрорельєфу та зміну фізико-механічних властивостей поверхні сталей марок 45 та Х12МФ, зокрема на зносостійкість і корозійну стійкість в умовах циклічного навантаження.**

4. **Розробити конструктивно-технологічні рекомендації і пристрої для практичної реалізації комбінованої лазерно-ультразвукової обробки, а також створити алгоритми керування процесом із можливістю формування на поверхні регулярного мікрорельєфу заданої топографії.**

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 17 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ Й ПАТЕНТІВ ЩОДО ЛАЗЕРНОГО ТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ

2.1. Лазерне та ультразвукове поверхнєве зміцнення

Згідно з джерелами [1-3], існує шість основних категорій методів зміцнення металевих матеріалів. Серед них виділяють: формування захисної плівки на поверхні виробу, зміну хімічного складу та структури поверхневого шару, коригування енергетичного стану поверхні, зміну її шорсткості, а також трансформацію структури всього металевого об'єму. Хоча ця класифікація має умовний характер, вона є корисною для вибору й розробки нових технологічних підходів до зміцнювальної обробки, орієнтованих на конкретні вимоги до експлуатаційних характеристик виробу [2,3]. Особливу увагу в поліпшенні якості і надійності деталей приділяють методам поверхневого зміцнення, що базуються на зміні структури поверхневого шару — зокрема, термічному та деформаційному способам. Традиційні термічні методи, які використовують різні джерела нагріву і середовища для охолодження, успішно застосовуються в промисловості протягом тривалого часу [1].

Останнім часом активно розвиваються і впроваджуються новітні технології поверхневого термічного зміцнення та легування робочих поверхонь із застосуванням висококонцентрованих енергетичних потоків плазми, електронного пучка і лазерного випромінювання [4,5].

У машинобудівній галузі з 1980-х років поширене використання поверхневого термозміцнення сталевих виробів із застосуванням низькотемпературної плазми. Процес базується на локальному нагріванні верхнього шару за допомогою плазмової дуги з густиною потужності в межах 10^3 – 10^5 Вт/см² та наступному охолодженні шляхом тепловідведення у глибину матеріалу. Плазмова обробка здійснюється через вплив енергії плазмового струменя, який виникає внаслідок пропускання плазмоутворювальних газів через дуговий розряд. Ефективність нагріву в

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 18 |

цьому процесі становить близько 40–80%. Така обробка металевих деталей, без оплавлення їхньої поверхні (див. рис. 2.1), дозволяє отримати зміцнений шар глибиною від 0,5 до 2,5 мм, залежно від встановлених параметрів і типу поверхні. В результаті твердість поверхні підвищується до значень HRC 50–61 [6], а мікротвердість шару досягає приблизно 8,5 ГПа [7], що суттєво покращує зносостійкість — у 2–4 рази. При цьому показники мікрорельєфу практично залишаються незмінними. Плазмова технологія широко застосовується для зміцнення поверхонь коліс залізничного транспорту, прокатних валів, роликів, пуансонів, матриць, втулок, штампів, бурового інструменту та інших деталей.



Рис. 2.1. Плазмова обробка деталей із сталі без оплавлення поверхні

Електронно-променева обробка на відміну від плазмової обробки (див. рис. 2.2) має менш широке застосування у промисловості для поверхневого зміцнення через обмежену кількість системних теоретичних і практичних досліджень, що вивчають вплив технологічних параметрів на якість поверхневого шару металевих деталей. Крім того, висока вартість та складність конструкції обладнання обмежують її впровадження [8,9].

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 19 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Водночас, ця технологія забезпечує стабільну глибину зміцнення в двох напрямках, виключає забруднення і формування оксидних плівок на поверхні, а також характеризується високим коефіцієнтом корисної дії (до 98%) і високою продуктивністю.

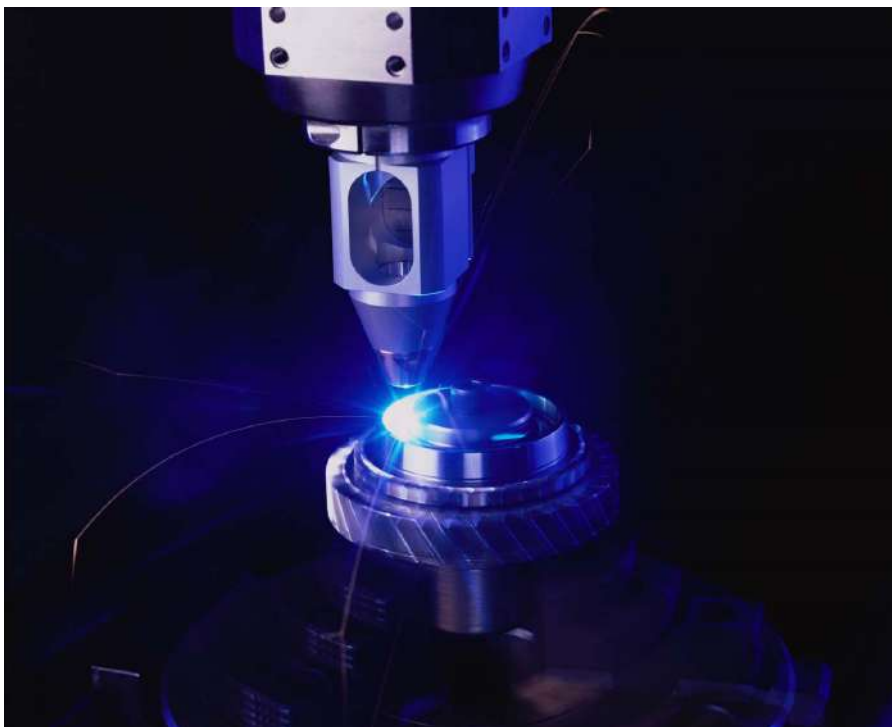


Рис. 2.2. Метод електронно-променевої обробки

Електронно-променева обробка полягає у використанні енергії сфокусованого електронного пучка, який створюється електронною гарматою. При термічному зміцненні сталевих поверхонь без оплавлення електронний промінь з густиною потужності в межах 10^2 – 10^4 Вт/см² та часом нагрівання від 1 до 10 секунд у вакуумі дозволяє отримати зміцнений шар товщиною від 0,1 до 2 мм залежно від типу матеріалу. Твердість оброблених сталей (конструкційних, інструментальних, підшипникових) може досягати значень HRC 65–68 [9, 10].

Лазерне поверхнєве зміцнення (див. рис. 2.3) завдяки розвитку потужних та високоякісних лазерних систем стало одним із ефективних методів, що знаходить широке застосування у виробничих процесах [11–17]. У промисловості використовують лазерне термозміцнення, ударне зміцнення,

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 20 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

а також лазерний відпал і відпуск найбільш навантажених зон, де потрібно забезпечити високу твердість і стійкість до зносу. Ключовим фактором є густина енергії лазерного променя та тривалість його впливу на матеріал, що визначають тепловий цикл поверхні [16, 18]. В свою чергу, ці параметри впливають на остаточні фізико-механічні характеристики зміцненого шару.

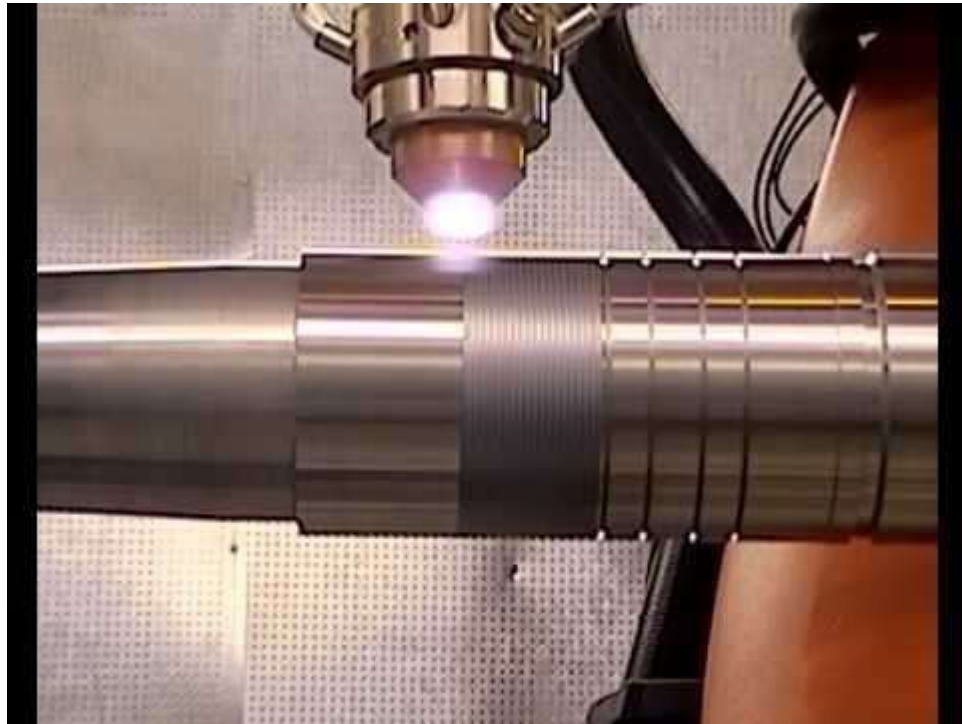


Рис. 2.3. Лазерне поверхнєве зміцнення деталей машин

Лазерне поверхнєве зміцнення металевих матеріалів, зокрема сталей і сплавів, включає кілька різновидів, серед яких термозміцнення без розплавлення поверхні [12,18-21], зміцнення з локальним оплавленням [18,19,22,23], а також ударне лазерне зміцнення [13,24,25]. Аналогічно іншим способам загартування, ці методи базуються на формуванні аустенітної фази, яка виникає під час високошвидкісного нагріву з розчиненням карбідних фаз у поверхневому шарі, і наступному її перетворенні у мартенсит у процесі охолодження. Основним чинником є передача висококонцентрованої енергії до тонкого поверхневого шару, що забезпечує надзвичайно швидкі темпи нагрівання і охолодження в діапазоні від 10^8 до 10^{10} °C/с. Саме такі умови

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 21 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

сприяють формуванню унікальної мікроструктури, яка визначає покращені фізико-механічні властивості обробленої поверхні [15,17].

При лазерному термозміцненні без оплавлення поверхні, структурні зміни в поверхневому шарі відбуваються при рівнях густини потужності лазерного випромінювання, що зазвичай становлять 10^3 – 10^4 Вт/см², не досягаючи температури плавлення матеріалу. Тривалість лазерного впливу і хімічний склад металу визначають, чи відбувається розплавлення поверхні, якого тут уникають, забезпечуючи збереження цілісності опромінюваної зони [12,15].

Глибина зміцненого шару, що формується у цьому режимі, коливається від 0,02 до 0,5 мм, тоді як мікротвердість поверхневого шару може сягати приблизно 10 ГПа. При цьому на ефективність тепловідведення і швидкість охолодження значний вплив має об'єм деталі, що безпосередньо позначається на кінцевих властивостях зміцненого шару [17,18].

Сталеві матеріали залишаються найбільш поширеними для лазерного поверхневого зміцнення завдяки їхній широкій сфері застосування та технологічній доступності [14]. Для обробки широких поверхонь із шириною сканування до 60 мм використовують спеціалізовані оптичні системи-сканатори, які формують лазерний промінь лінійної конфігурації з рівномірним розподілом густини енергії.

Лазерне зміцнення з оплавленням поверхні передбачає локальне розплавлення металу в зоні дії променя, що спричиняє більш значні структурні і хімічні трансформації, включаючи утворення нової мікрорельєфної топографії поверхні [18,26,27]. Цей метод вимагає більш високих показників густини потужності – близько 10^4 – 10^5 Вт/см². Завдяки локальному плавленню можливо збільшити глибину зміцненого шару до 0,2–2,5 мм. При цьому формується приповерхневий шар з відносно нижчою мікротвердістю (близько 4–8 ГПа), що контрастує із більш глибоким шаром зміцнення твердої фази, твердий стан якого характеризується мікротвердістю в межах 7–11 ГПа

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 22 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

[28]. Цей вид зміцнення широко застосовується для інструментальних легованих сталей з карбідними включеннями, такими як хром (Cr), вольфрам (W), молібден (Mo), ванадій (V) тощо [29,30].

Лазерна імпульсна обробка (ЛІО) є інноваційним методом, при якому зміцнення поверхні досягається за рахунок використання випромінювання з надвисокою густиною потужності – від 10^8 до 10^9 Вт/см², із застосуванням імпульсів надкороткої (приблизно 20–100 нс) або короткої (1–5 мс) тривалості [31,32]. Залежно від параметрів імпульсів та швидкості руху лазерного променя по поверхні, у матеріалі можуть виникати різноманітні фазові перетворення і структурні зміни, що впливають на кінцеві характеристики зміцненої поверхні [31].



Рис. 2.4. Лазерна імпульсна обробка для поверхневого зміцнення

Лазерна імпульсна обробка (ЛІО) з тривалістю імпульсу в межах 20–100 нс викликає утворення плазми у тонкому поверхневому шарі матеріалу, що супроводжується генеруванням ударних хвиль. Ці хвилі створюють залишкові напруження стиску на поверхні [33–38]. В процесі ЛІО оплавлення

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 23 |

матеріалу не відбувається, а структурні й фазові зміни зумовлені як локальним нагрівом, так і механічними деформаціями, спричиненими проходженням ударних хвиль [31,39–41]. У разі застосування імпульсів із тривалістю в межах мілісекунд, поверхня сталевих зразків нагрівається до температур, які можуть перевищувати температури фазових перетворень A_{c1} та A_{c3} із переходом у аустенітний стан або навіть до температури плавлення, залежно від величини енергії, що подається [37,38].

Перспективні сфери застосування цих методів зосереджені в аерокосмічній, авіаційній та автомобільній промисловостях [42]. Незважаючи на позитивні результати використання ЛІО для зміцнення поверхонь таких деталей, як лопатки турбін і компресорів, елементи двигунів автомобілів, крила літаків, деталі ракет і супутників, шестерні та вали редукторів гвинтокрилів, ця технологія характеризується низькою продуктивністю, невеликою глибиною зміцненого шару та нерівномірністю властивостей зміцненого покриття.

Для подолання цих недоліків розробляються системи автоматизації процесу нанесення поглинаючих покриттів, збільшення частоти імпульсів і автоматизовані засоби контролю якості поверхневого шару. Впровадження таких рішень здатне знизити вартість технології зміцнення на 50–70 % [12].

На відміну від лазерного загартування, лазерний відпал спрямований на отримання більш однорідної структури поверхневого шару, що володіє підвищеною пластичністю та зниженими показниками твердості [12,15]. Важливою умовою процесу лазерного відпалу є повільне охолодження після нагрівання до температури аустенізації, що вимагає додаткових заходів щодо зменшення тепловідведення. Лазерний відпал може здійснюватися як із оплавленням, так і без нього.

Натомість лазерний відпуск виконується за рахунок локального нагріву (без оплавлення) окремих зон попередньо загартованих металевих виробів до різних температур, що залежать від виду відпуску. Для залізовуглецевих

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 24 |

сплавів ця температура не повинна перевищувати критичну точку A_{c1} . Відпуск знижує внутрішні напруження, сприяє переходу метастабільних фаз у стабільні, а також зменшує вплив концентрації напружень на фізико-механічні характеристики деталей, які працюють у умовах циклічних навантажень.

Порівняно з традиційними термічними методами, лазерне поверхнєве зміцнення відзначається високою швидкістю обробки, можливістю отримання зміцнення без подальшого загартування, мінімальними змінами мікрорельєфу поверхні при обробці без оплавлення, а також здатністю локально впливати на важкодоступні ділянки із складною геометрією. Також лазерне зміцнення може застосовуватися для обробки внутрішніх (тонких) поверхонь та дрібних деталей. Технологія має широкий спектр застосування, легко інтегрується в автоматизовані гнучкі виробничі системи, допускає автоматизоване керування та характеризується низьким негативним впливом на довкілля [16].

Разом із цим, використання лазерного зміцнення має й певні обмеження: більшість процесів вимагає рівномірного розподілу енергії лазерного променя, а зони перекриття обмежені, що може призводити до локального зниження міцності у багатократних проходах. Регулювання температурного поля для отримання цілеспрямованих змін мікроструктури, особливо на поверхнях із складною формою, залишається складним завданням. Крім того, поглинальна здатність металевих поверхонь до лазерного випромінювання відносно низька, а вартість обладнання суттєво вища у порівнянні з іншими способами зміцнення [13,14]. Лазерні системи також характеризуються значним енергоспоживанням та порівняно низьким коефіцієнтом корисної дії (6–40 %, залежно від типу лазера).

Проте в останнє десятиліття відбувається активний технічний прогрес у сфері машинобудування, зокрема у створенні компактних, високоефективних лазерів з підвищеним ККД та автоматизованих технологічних комплексів із комп'ютерним керуванням. Це дозволяє підвищити густину потоку енергії, поліпшити продуктивність процесу і

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 25 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

суттєво замінити традиційні методи поверхневого зміцнення при виробництві та ремонті деталей.

Окрім того, для відновлення і зміцнення поверхонь широко застосовується газове напилення (рис. 2.5).

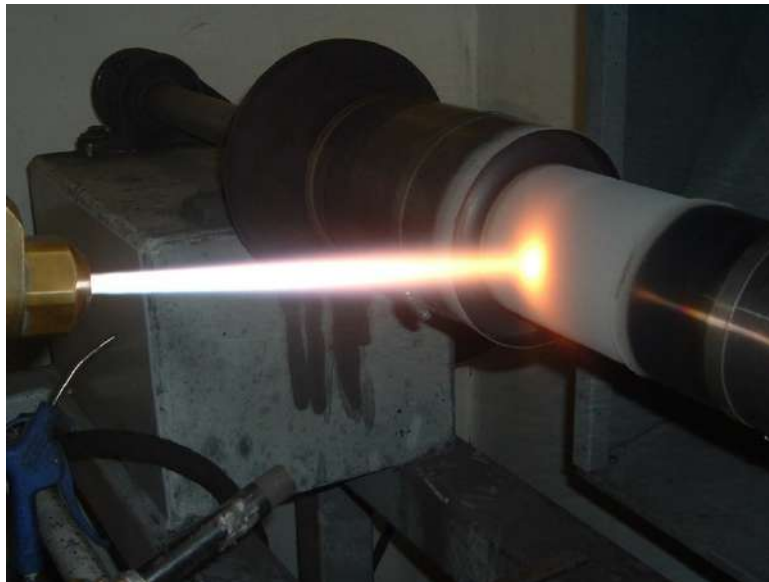


Рис. 2.5. Відновлення поверхонь методом газового напилення

Використання лазерної енергії з високою концентрацією як джерела тепла стало однією з перших сфер застосування лазерної обробки матеріалів. Історично відомо, що перші експерименти з лазерного поверхневого зміцнення металів датуються початком 1960-х років [33]. Протягом наступних років були проведені численні дослідження, присвячені зміцненню сталей та їх сплавів із застосуванням CO₂-лазерів та Nd:YAG-лазерів [34-37].

Останнім часом з'явилися потужні діодні лазери, які відрізняються рівномірним розподілом потужності, компактністю та можливістю інтеграції з робототехнічними системами для обробки деталей зі складною геометрією [28-30]. Довжина хвилі випромінювання Nd:YAG та діодних лазерів (близько 0,8–1 мкм) забезпечує вищу ефективність поглинання металами у порівнянні з CO₂-лазерами, довжина хвилі яких становить 10,6 мкм. Завдяки цьому відпадає потреба у застосуванні діелектричних покриттів (наприклад,

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 26 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

оксидів чи металевих солей), що значно спрощує технологічний процес і зменшує виробничі витрати.

Водночас, як відзначено у джерелі [15], поглинання випромінювання з довжиною хвилі 1,06 мкм більшою мірою залежить від шорсткості поверхні ($R_a \approx 0,5$ мкм), ніж випромінювання з довжиною хвилі 10,6 мкм. При підвищенні шорсткості поверхні ($R_a > 1$ мкм) зростає частка поглинання, тоді як відсоток відбитого випромінювання зменшується. Потужні Nd:YAG та діодні лазери широко застосовуються у різних технологіях обробки сталей та їх сплавів [21-23]. Для формування оптимальних розмірів та форм зони лазерного опромінення розроблено спеціальні оптичні системи, що забезпечують рівномірний розподіл енергії.

За останнє десятиліття активно розвиваються високопотужні волоконні лазери, які відрізняються простотою конструкції, високим коефіцієнтом поглинання (25–35 %) та ефективністю перетворення енергії (20–30 %) [17]. Їхня надійність і відносно низькі експлуатаційні витрати роблять їх перспективним інструментом у галузі обробки металів. Введення лазерів потужністю до 50 кВт створює нові можливості для швидкого впровадження лазерних технологій у машинобудівне виробництво [24, 25].

Порівняльний аналіз висококонцентрованих джерел енергії для поверхневого термозміцнення сталевих виробів показує, що плазмове зміцнення забезпечує найбільші глибину та ширину зони зміцнення, при цьому характеризується високою продуктивністю та відносно низькою вартістю. З іншого боку, поверхнєве зміцнення за допомогою електронного або лазерного випромінювання відзначається високою локалізацією та стабільністю теплового впливу. Значною перевагою лазерного методу є відсутність необхідності у вакуумній камері, що суттєво спрощує процес у порівнянні з електронно-променевою технологією. Крім того, застосування сучасних лазерних комплексів (зокрема діодних та волоконних лазерів зі

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 27 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

скануючими пристроями) дозволяє досягти високої якості зміцненого шару, забезпечуючи точність і високу продуктивність обробки.

Підвищення експлуатаційних характеристик поверхневого шару деталей машин значною мірою пов'язане з процесом поверхнево-пластичної деформації (ППД), що спричинює подрібнення мікроструктурних елементів шару. Це веде до зростання твердості поверхні, формування залишкових стискальних напружень і зниження рівня мікрорельєфу.

До найпоширеніших методів статичної ППД належать обкатування кулькою або роликком [1,26,27,28], а серед динамічних – дробоструминна, гідроабразивна обробка [29-31] і ультразвукові технології, такі як безабразивна ультразвукова фінішна обробка та ультразвукова ударна обробка (УЗО) [1,32-36].

Метод обкатування кулькою або роликком (рис. 2.6) реалізується за допомогою значних статичних навантажень на інструмент (750–1000 Н і більше), що дозволяє підвищити мікротвердість поверхні на 40–60 % і знизити шорсткість R_a до 0,04–0,63 мкм [1,2,37]. Альтернативним підходом є вигладжування поверхні кулькою або роликком із застосуванням меншого навантаження за допомогою струменя рідини, що спричинює незначну ППД (менше 5 %) і формування залишкових стискальних напружень шляхом пружно-пластичних деформацій на межі плинності. Такий спосіб дозволяє досягти більш глибокого поширення залишкових напружень (до 1 мм), які зберігаються при тривалому нагріванні до 370 °С, у порівнянні з обкатуванням під великим навантаженням і дробоструминною обробкою (до 0,2 мм) [56].

Порівняння з вихідним станом поверхні сталі 45 ($R_a = 3,56$ мкм) показало, що після вигладжування кулькою значення R_a знизилось до 0,24–0,31 мкм, а твердість поверхні збільшилась приблизно на 60 %. Формування залишкових стискальних напружень позитивно впливає на втомну міцність і зносостійкість виробів [37].

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 28 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |



Рис. 2.6. Обкатка роликом

Згідно з даними [2, 39], дробоструминна та гідроабразивна обробка використовується для поверхневої модифікації малогабаритних і складноформованих деталей, таких як лопатки турбін, компресорів, а також елементів з обмеженою жорсткістю — пружин, мембран, ресор тощо. Оброблення здійснюється за допомогою спрямованого потоку суспензії, що містить абразивні частинки, який подається на поверхню через спеціалізовані установки. Така обробка забезпечує проникнення пластичної деформації в поверхневий шар на глибину приблизно 0,5–0,8 мм. При цьому досягається підвищення поверхневої твердості й утворення залишкових стискальних напружень, що позитивно впливають на зносостійкість та довговічність деталей [30, 37]. Варто зазначити, що шорсткість поверхні в процесі не змінюється істотно.

Попри технічну простоту реалізації дробоструминних, гідроабразивних і піскоструминних методів фінішної обробки, вони мають суттєві недоліки: високу витратність енергоресурсів та матеріалів, потребу в обладнанні,

здатному витримувати високий тиск, значні обсяги використання води та абразивів.

У контексті пошуку більш ефективних рішень було запропоновано альтернативну технологію — оздоблювально-зміцнювальну обробку за допомогою аерозольного надзвукового потоку [31]. Такий потік формується шляхом ультразвукового розпилення абразивної суспензії і її прискорення під дією обертального руху стислого повітря.

Ультразвукова обробка (УЗО) має низку суттєвих переваг над традиційними методами поверхнево-пластичної обробки (ППО) [32, 33, 37]. Зокрема, вона базується на імпульсному режимі навантаження високотривким інструментом, що дає змогу ефективно обробляти навіть крихкі матеріали при відносно невеликих навантаженнях (до 200 Н). Метод також дозволяє формувати регулярний мікрорельєф, який сприяє утриманню мастила, та легко інтегрується у автоматизовані технологічні процеси з можливістю контролю стану поверхневого шару. УЗО є єдиним динамічним методом зміцнення, який поєднує зниження шорсткості, формування високих залишкових напружень стиску та значне підвищення довговічності деталей [1].

За інформацією [32, 38], основою УЗО є генератори, які перетворюють електричний струм із частотою 50–60 Гц в ультразвукові коливання діапазону 18–90 кГц, із потужністю 0,25–2,5 кВт. У якості збуджуючих елементів використовують магніострикційні (18–22 кГц) або п'єзокерамічні перетворювачі (20–90 кГц), які створюють механічні коливання з амплітудою 3–5 мкм. Завдяки застосуванню концентраторів (конічного чи експоненційного типу), ці коливання можуть бути підсилені до 80–100 мкм.

Зміцнення поверхні в рамках УЗО може бути реалізоване за двома основними підходами: методом вигладжування (безабразивна ультразвукова фінішна обробка) та методом ударної дії (ультразвукова ударна обробка) [32–36, 48–51]. У першому випадку інструмент жорстко закріплюється на торці концентратора, і під дією статичного навантаження величиною приблизно

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 30 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

100–200 Н здійснюється контакт із поверхнею заготовки. Це забезпечує ефективне усунення мікронерівностей — параметр Ra може зменшитися у 6–7 разів за один прохід — та сприяє формуванню регулярного мікрорельєфу. При цьому в оброблюваному шарі (до 100 мкм) відбувається зростання мікротвердості на 30–150 %, залежно від типу матеріалу та його початкового стану.

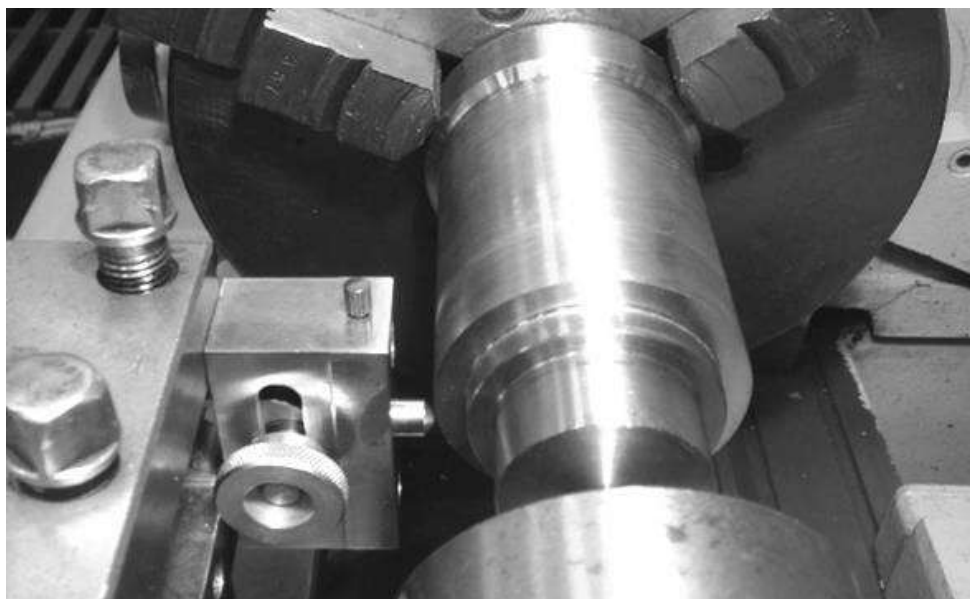


Рис. 2.7. Метод зміцнення вигладжуванням

Окрім того, створений у процесі обробки регулярний мікрорельєф (RMP) забезпечує покращену здатність поверхні до утримування мастильних матеріалів, що знижує рівень тертя й інтенсивність зношування під час зворотно-поступального руху спряжених елементів. Крім того, наявність RMP сприяє підвищенню корозійної стійкості обробленої поверхні [47, 49].

Разом з тим, під час обробки високоміцних матеріалів спостерігається явище відскоку інструмента від поверхні заготовки, що знижує ефективність процесу. Тому для досягнення належної якості обробки необхідно застосовувати підвищені зусилля навантаження, а також оптимізовані параметри ультразвукової коливальної системи (УЗКС).

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 31 |

У випадку ультразвукового ударного зміцнення конструкція обробного інструмента має відмінності: бойок (у вигляді кулі або циліндричного стрижня) не фіксується жорстко з концентратором, а утримується у спеціально сконструйованих наконечниках. Для деформування поверхні застосовуються як однобойкові, так і багатобойкові наконечники з визначеним радіусом робочої частини, які монтуються на торці УЗКС (рис. 2.8) [40].

У цьому методі навантаження системи на поверхню здійснюється зі значно меншою силою (порядку 30–50 Н), порівняно з безабразивною ультразвуковою фінішною обробкою. У результаті формуються вимушені коливання проміжного елемента — бойка — в межах малого зазору (близько 0,01 мм), який автоматично встановлюється в процесі генерації ультразвукових коливань. Наявність такого зазору є критичною умовою для реалізації ударного режиму обробки, оскільки саме вона забезпечує зниження частоти коливань бойка до 1–3 кГц, що відрізняє цей метод від інших варіантів ультразвукового зміцнення.



Рис. 2.8. Апарат ультразвуково-ударної обробки

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 32 |

Дослідження свідчать, що під час ультразвукової ударної обробки (УЗУО) реалізується інтенсивна пластична деформація поверхневого шару оброблюваного матеріалу, яка досягається за рахунок імпульсної передачі енергії від ударного інструмента до поверхні [44]. У випадку використання багатобойкових наконечників (зазвичай від 3 до 7 і більше ударників), сумарна частота ударів може бути суттєво вищою, оскільки коливання бойків не є синхронізованими, а їх переміщення у межах контактного зазору має випадковий, стохастичний характер [41].

Перші наукові розробки, в яких ультразвукову ударну обробку було запропоновано як метод інтенсивної пластичної деформації, з'явилися ще у 1970-х роках [44, 45–47]. З того часу зазнали значного розвитку конструкції обробних установок і схем навантаження ультразвукових коливальних систем (УЗКС) [44, 48], що дало змогу адаптувати технологію для ефективної обробки як габаритних, так і дрібних елементів складної геометрії.

Забезпечення рівномірності параметрів поверхневого шару, зокрема структури, твердості, шорсткості та хвилястості мікрорельєфу, досягається завдяки поєднанню багаторазових високочастотних ударів бойків та одночасного переміщення УЗКС або оброблюваного зразка. Оптимальні результати спостерігаються при реалізації схем із обертанням наконечника або зразка, а також за рахунок низькочастотного зворотно-поступального руху останнього. Така багатонаправлена динамічна дія сприяє активному подрібненню зерен у поверхневому шарі, покращуючи його експлуатаційні характеристики [50].

2.2. Лазерне термо-деформаційне зміцнення

Відомо [1, 40], що ефективність та рентабельність сучасних комбінованих методів зміцнення поверхневого шару досягається шляхом інтеграції лазерного поверхневого зміцнення (ЛО) з іншими технологіями обробки. Поєднання фізично різнорідних методів (теплових, деформаційних,

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 33 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

динамічних) дозволяє досягти синергетичного ефекту, що проявляється у підвищенні міцності, твердості, зносо- та втомостійкості, а також довговічності елементів машин. Вибір оптимального варіанту комбінованого зміцнення залежить від аналізу їхніх переваг і недоліків.

На сучасних машинобудівних підприємствах лазерні технології широко застосовуються для модифікації фізико-механічних властивостей поверхневих шарів деталей. Висока ефективність лазерного зміцнення обумовлена можливістю точного локального впливу з високою щільністю енергії. Водночас, окреме використання ЛО має низку обмежень, пов'язаних зі складністю досягнення необхідної дисперсності структури, глибини зміцнення, рівня залишкових напружень стиску та забезпечення стабільності обробки деталей складної форми [12–15].

Одним із перспективних підходів до подолання цих обмежень є **комбіноване лазерно-деформаційне зміцнення (ЛТДО)** — поєднання локального високошвидкісного лазерного нагрівання із наступною пластичною деформацією поверхні. Такий підхід дозволяє формувати в поверхневому шарі металу структури з високим ступенем дисперсності, стабільними залишковими напруженнями стиску та покращеними показниками шорсткості і мікротвердості.

Схеми реалізації ЛТДО

Комбіноване ЛТДО може реалізовуватись за:

- **суміщеною схемою**, при якій лазерне нагрівання поверхні до температури аустенізації (~900–1100 °С) супроводжується негайним її пластичним деформуванням на етапі охолодження (до ~450–650 °С);
- **роздільною схемою**, коли пластична обробка проводиться після повного охолодження зони впливу лазера до температури навколишнього середовища.

Дослідження [15] показали, що використання суміщеної схеми (лазер безперервної дії + обкатка роликком) для сталі 45 сприяє глибшому

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 34 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

подрібненню зерен, зростанню щільності дислокацій і формуванню залишкових напружень стиску до -400...500 МПа. Це забезпечує підвищення малоциклової втомної міцності на 30–80% та зносостійкості до 10 разів порівняно з ЛО або необробленим станом.

Крім того, зростання статичного навантаження деформуючого інструменту зменшує розмір зерен і додатково підвищує мікротвердість поверхневого шару.

Переваги імпульсного лазерного випромінювання в ЛТДО

При використанні імпульсних лазерів забезпечується висока локалізація теплового впливу, що дозволяє точно контролювати глибину термічного проникнення та інтенсивність деформаційного процесу. Обкатка розігрітої поверхні роликком або кулькою у фазі охолодження сприяє покращенню мікрорельєфу, зниженню шорсткості та формуванню гомогенного зміцненого шару.

Гібридні методи ЛТДО

Для обробки габаритних і тонкостінних деталей були запропоновані **гібридні методи ЛТДО** (лазер + кулька/ролик), у яких лазерне випромінювання фокусується безпосередньо в зону контакту з деформуючим інструментом [42, 43]. У результаті термодформаційний вплив реалізується одночасно у розігрітому стані, що забезпечує підвищену пластичність матеріалу та покращення властивостей поверхні.

Однак особливий інтерес становлять **комбіновані технології лазерного нагріву та ультразвукової деформації (ЛО + УЗО)** [46–53].

Комбіноване зміцнення ЛО + УЗО

Поєднання ультразвукової обробки з лазерним зміцненням дозволяє:

- підвищити глибину зміцнення на 15–25%,
- збільшити мікротвердість на 20–30% порівняно з окремим ЛО,
- знизити енерговитрати за рахунок зменшення потужності лазерного випромінювання.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 35 |

УЗО, проведене перед ЛО, готує структуру до подальших фазових перетворень. Зокрема, субструктура, сформована при УЗО, спадково передається аустеніту, що сприяє дрібнозернистому мартенситу після гартування. Це супроводжується інтенсивним виділенням дисперсних карбідів та підвищенням густини дислокацій [42].

У режимі ЛО → УЗО (суміщена обробка без охолодження) мартенсит утворюється з деформованого аустеніту, який зберігає спадкову структуру. Оптимальна температура деформації в цьому випадку відповідає області стабільного аустеніту [44, 45].

При цьому досягаються:

- мікротвердість поверхневого шару: 8,0–9,5 ГПа (ЛО+УЗО), 4,0–4,5 ГПа (УЗО), 7,0–8,0 ГПа (ЛО);
- зниження шорсткості до 0,25 мкм (при вихідному значенні 0,63 мкм);
- формування термостабільної структури з гарантованими залишковими напруженнями стиску.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 36 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПІД ЧАС КОМБІНОВАНОЇ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБРОБКИ

3.1 Теоретичні дослідження

Процес термодформаційного зміцнення та фінішного оздоблення поверхонь деталей за допомогою комбінованої лазерно-ультразвукової обробки (ЛО+УЗО) може реалізовуватись за двома основними схемами — **суміщеною** та **роздільною** (рис. 3.1). У межах даного дослідження застосовано **роздільну схему обробки** (рис. 3.1, б), що забезпечує більш гнучке керування параметрами кожного з впливів.

З метою побудови адекватних математичних моделей процесу комбінованого впливу було визначено **функціональні взаємозв'язки та обмеження вихідних параметрів** лазерної та ультразвукової обробки. Це дозволило встановити залежність між технологічними режимами, енергетичними характеристиками впливів і показниками якості поверхневого шару деталей.

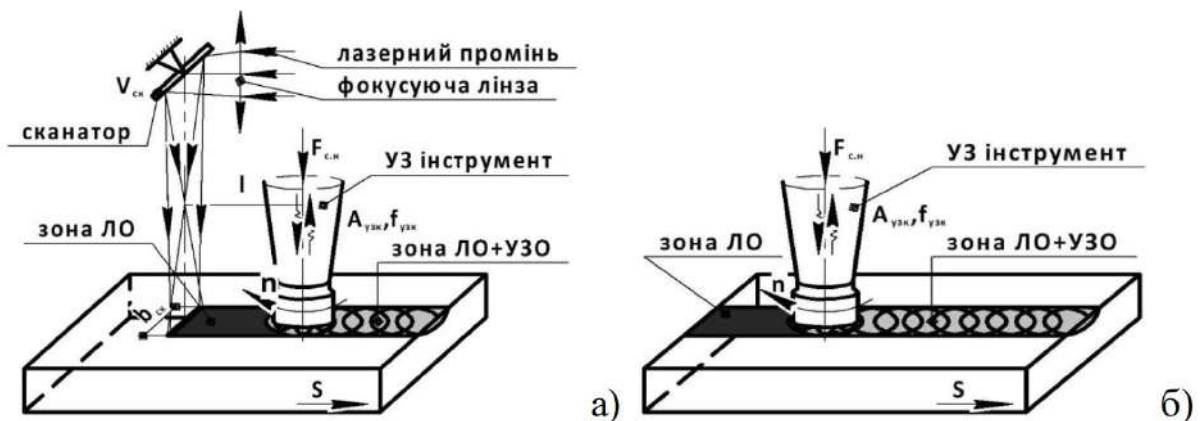


Рис. 3.1. Схеми комбінованої лазерної та ультразвукової обробки:

а - суміщена; б - роздільна

Відомо, що лазерне поверхневе термозміцнення може реалізовуватись за двома основними методами:

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 37 |

1. із підтриманням постійної потужності лазерного випромінювання,
2. із підтриманням сталої температури поверхні в зоні впливу лазерного променя (рис. 3.2).

З метою підвищення ефективності технологічного процесу було запропоновано удосконалений спосіб лазерного поверхневого зміцнення, що передбачає використання волоконного лазера в комбінації зі сканувальним пристроєм (сканатором). Для реалізації цього підходу розроблено спеціальне програмне забезпечення, яке забезпечує стабілізацію температури нагріву в зоні впливу лазерного випромінювання (рис. 3.2, в).

Такий технічний підхід дозволяє уникнути локального перегріву або оплавлення поверхонь складної геометрії, а також крайових ділянок деталі. Це досягається завдяки автоматизованій системі контролю температури, що включає пірометр, пропорційно-інтегральний регулятор (ПІ-регулятор) і спеціалізовану плату збору та обробки даних. Система в режимі реального часу коригує параметри лазерного впливу, забезпечуючи рівномірність нагрівання та стабільність процесу зміцнення.

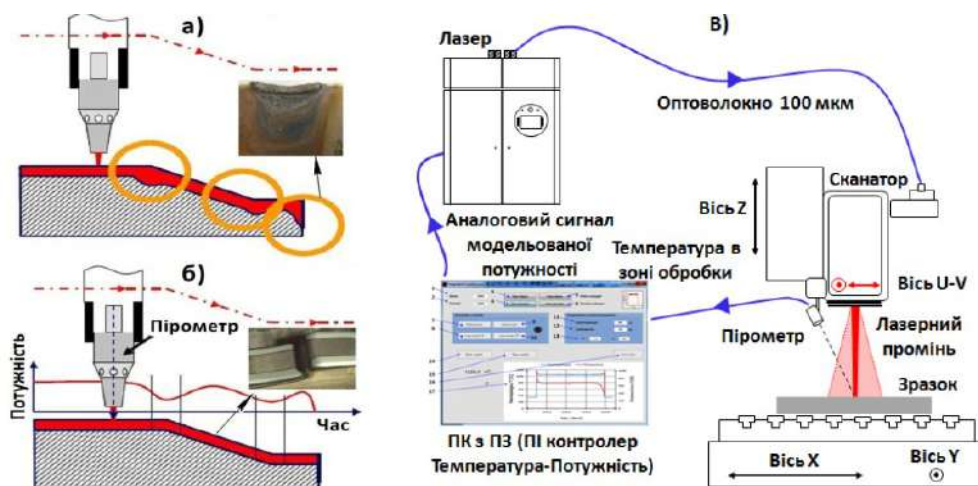


Рис. 3.2. Схеми лазерного термозміцнення:

- а - підтримання постійної потужності лазера; б - підтримання постійної температури; в - з використанням волоконного лазера і сканатора

Пропорційно-інтегральний контролер регулює різницю між вимірною температурою нагрівання T_6 в зоні дії лазерного променя і заданою температурою $T_3(e(t_i) = T_3 - T_B(x(t_i), t_i))$, змінюючи потужність лазера:

$$P(t_{i+1}) = k_p e(t_i) + k_i \int_{t_0}^{t_i} e(t) dt, \quad (3.1)$$

де P – потужність лазера;

k_i – константа інтегрування;

k_p – коефіцієнт пропорційності;

$e(t)$ – різниця між сигналом зворотного зв'язку і заданим.

Під час лазерної обробки (ЛО), з метою забезпечення стабільності температури в зоні впливу, температурні показники, зафіксовані пірометром, у режимі реального часу передавалися через пропорційно-інтегральний контролер (ПІ-контролер) на спеціалізовану плату збору та обробки даних. Остання здійснювала перетворення цифрових сигналів в аналогові та навпаки, забезпечуючи двосторонній обмін інформацією між вимірювальним і керувальним модулями.

Отримані аналогові сигнали, пропорційні потужності лазерного випромінювання, подавалися безпосередньо до системи керування лазером, що давало змогу автоматично регулювати інтенсивність випромінювання залежно від фактичної температури поверхні оброблюваної деталі.

Оскільки термокінетичний процес лазерного зміцнення включає послідовні цикли нагрівання та охолодження, а кінцеві властивості матеріалу визначаються структурно-фазовими перетвореннями, що залежать від температури, часу впливу та термофізичних характеристик матеріалу, для оцінки оптимального температурного режиму була застосована термокінетична модель прогнозування діапазону повної аустенізації.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 39 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

$$\begin{aligned}
A_{C1} &= 723 - 7.08Mn - 37.7Si - 18.1Cr + 44.2Mo + \dots = 28v^2, \\
A_{C3} &= 910 - 370C - 27.4Mn - 27.3Si - 6.35Cr - 32.7Ni + \dots - 60.2V^2, \\
A_{Cm} &= 244.4 + 992.4C - 465.1C^2 + 46.7Cr + 19CCr - \dots + 16.7SiMn, \\
A_{r1} &= P_n - 305.4C - 118.2Mn, P_n = A_{C1} - 10.7Mn + 29Si + 16.9Cr, \\
A_{r3} &= 910 - 310C - 80Mn - 20Cu - 15Cr - 55Ni - 80Mo + 0.35(h - 8), \\
M_n &= 561 + 474C - 33Mn - 17.7Ni - 12.1Cr - \dots - 705Si \dots ma \dots M_k = M_n - 215. \quad (3.2)
\end{aligned}$$

де $A_{C1}, A_{C3}, \dots, M_n, M_k$ – критичні точки температур структурно-фазових перетворень сталей [$^{\circ}C$], C, Mn, \dots, Mo – хімічний склад матеріалу [%];

h – товщина зразка [мм].

Прогнозування мікротвердості шару за допомогою лазера проводили згідно правила адитивності змішування часток фаз та їх мікротвердості:

$$HV = X_M HV_M + X_B HV_B + X_{F+P} HV_{F+P}, \quad (3.3)$$

де X_M, X_B, X_{F+P} – об'ємні частки мартенситу, бейніту та суміші фериту і перліту [%], відповідно, HV_M, X_B, X_{F+P} – мікротвердість мартенситу, бейніту та суміші фериту, перліту [$кг \cdot с / мм^2$].

Під час вирішення теплової задачі, що описує процес загартування поверхні лазерним випромінюванням, важливо враховувати не лише просторову, але й часову структуру теплового джерела. Такий підхід є необхідним для забезпечення рівномірності розподілу температури та отримання зміцненого шару без термічних дефектів.

З цією метою поверхню досліджуваного зразка опромінювали лазерним променем прямокутного перерізу, який характеризувався високою густиною потужності. Під час експерименту забезпечувалося відносне переміщення зразка щодо лазерного променя, що дозволяло досягти однорідного термічного впливу по всій площині обробки. (рис. 3.3, а).

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 40 |

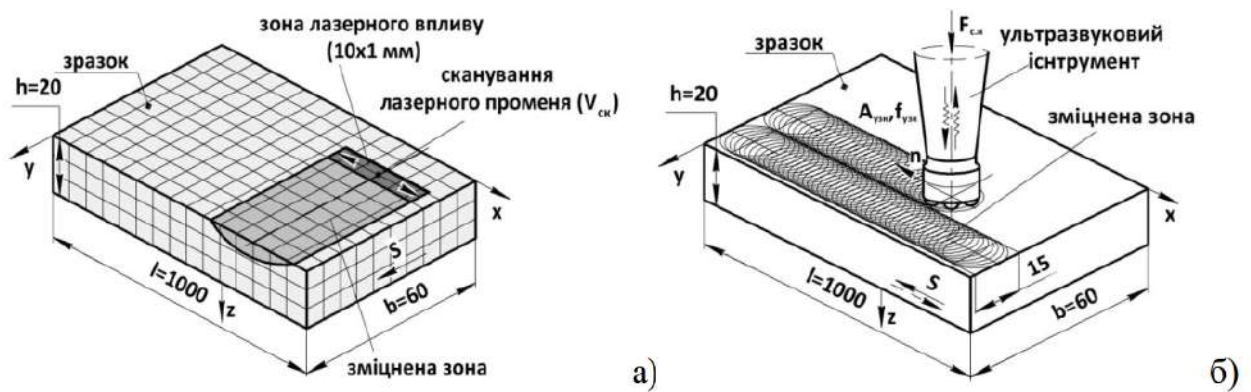


Рис. 3.3. Моделювання лазерного термічного і ультразвукового деформаційного зміцнення:

а - розрахункова схема ЛО; б - розрахункова схема УЗО

Розподіл температури в однорідному та ізотропному матеріалі в прямокутній системі координат описували рівнянням з граничними умовами на поверхні оброблюваного зразка в зоні дії $(\lambda[\partial T(x, y, 0, t) / \partial z] + W_{лп}(x, y, t) = 0)$ та поза зоною дії лазерного променя $(\lambda[\partial T(x, y, 0, t) / \partial z] + \alpha(T_3^0 - T(x, y, 0, t)) = 0)$:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (3.4)$$

де T – температура поверхні матеріалу зразка в точці з координатами (x, y, z) в момент часу $t [0, T_k]$;

ρ – густина матеріалу зразка $[\text{кг}/\text{м}^3]$;

$c(T)$ – коефіцієнт теплоємності матеріалу зразка $[\text{Дж}/\text{кг}^\circ\text{C}]$;

$\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу зразка $[\text{Вт}/\text{м}^\circ\text{C}]$;

l, b, h – довжина, ширина та висота зразка $[\text{см}]$.

Розрахункові значення густини потужності лазерного променя $W_{лп}$ перебували в межах $103\text{--}104 \text{ Вт}/\text{см}^2$ при тривалості дії випромінювання $0,42\text{--}1,5$ с. Такі параметри забезпечували поверхнєве термічне зміцнення матеріалу без оплавлення верхнього шару, з глибиною зміцненої зони близько $0,14\text{--}0,44$ мм.

Витрати енергії під час лазерної обробки (ЛО) становили $25\text{--}105 \text{ кДж}/\text{см}^2$.

Відповідно до рівнянь (3.2), були визначені критичні температурні точки

| | | | | |
|------|------|----------|--------|------|
| | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

структурно-фазових перетворень сталей, зокрема для сталі 45.

$$(A_{Cl} = 712^\circ\text{C}, A_{C3} = 784^\circ\text{C}, A_{r1} = 603^\circ\text{C}, A_{r3} = 710^\circ\text{C}, P_n = 693^\circ\text{C}, B_n = 546^\circ\text{C}, M_n = 358^\circ\text{C}, M_k = 243^\circ\text{C})$$

Отримані результати дають змогу визначити температурний інтервал, у межах якого відбувається повна аустенізація матеріалу та формування мартенситної структури під дією лазерного випромінювання (рис. 3.4). Розраховане значення мікротвердості поверхневого шару сталі 45 демонструє високий ступінь узгодженості з експериментально встановленими показниками, що підтверджує достовірність проведених розрахунків..

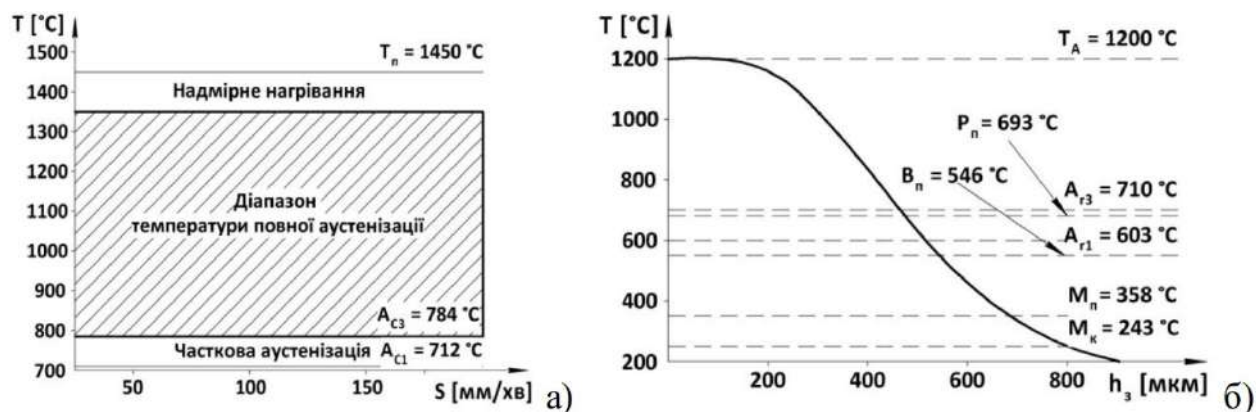


Рис. 3.4. Температурний діапазон зміни критичних точок сталі 45:
а - утворення аустеніту; б - утворення мартенситу по глибині зразка

Таким чином, проведені розрахунки критичних температур структурно-фазових перетворень та температурного розподілу по глибині сталі 45, виконані із застосуванням запропонованого методу стабілізації температури в зоні впливу скануючого лазерного променя і з урахуванням обмежень початкових параметрів процесу нагрівання, дали змогу попередньо визначити інтервал температур повної аустенізації. Це, у свою чергу, дозволило прогнозувати формування необхідних характеристик зміцненого поверхневого шару сталевих деталей.

Беручи до уваги, що взаємодія робочого інструменту з поверхнею за умов багаторазової ударної дії під дією ультразвукових (УЗ) коливань має

| | | | | |
|------|------|----------|--------|------|
| | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

нелінійний характер, швидкість загальної деформації оброблюваної поверхні змінюється з часом за гармонічним законом (рис. 3.3, б).

$$\varepsilon = A \cos \omega t H(\sin \omega t), \quad (3.5)$$

де A – константа, яка визначається амплітудою УЗ коливань і товщиною зразка;

$H(\sin \omega t)$ – функція Хевісайда;

ω – частота УЗ коливань;

t – тривалість обробки.

З урахуванням, що при УЗ навантаженні поверхня деформується як пружно, так і пластично основне рівняння динамічної моделі для УЗО має вигляд:

$$A \cos \omega t H(\sin \omega t) - \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \xi b v \frac{P_m}{M} \exp\left[-\frac{U - V(\sigma - \sigma_p)}{kT}\right], \quad (3.6)$$

де E – модуль Юнга;

ρ_m – густина рухомих дислокацій;

b – вектор Бюргерса;

v – константа матеріалу;

M – орієнтаційний фактор Тейлора;

U – енергія активації руху дислокацій;

k – постійна Больцмана;

T – абсолютна температура;

V – активаційний об'єм;

ξ – відстань, яку проходить дислокація при подоланні потенціального бар'єру;

σ_p – внутрішнє напруження, яке обумовлене дислокаціями.

У рівнянні (3.6) перший член правої частини відображає швидкість пружної деформації, яка визначається відповідно до закону Гука, тоді як другий член характеризує швидкість пластичної деформації, що виникає під

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 43 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

дією напруження згідно з термоактиваційною моделлю пластичності металів за механізмом Пайерлса.

Для розв'язання основного рівняння моделі (3.6) було застосовано безрозмірні параметри та числові методи інтегрування диференціальних рівнянь, реалізовані у програмному середовищі Turbo Pascal 7.1.

Отримані розрахункові залежності показують, що при вихідних параметрах для сталі 45

($\epsilon_0 = 10^{-4}$, $E = 205$ ГПа, $V = 2 \cdot 10^{-25}$ м³, $T = 300$ К) збільшення тривалості ультразвукової обробки (УЗО) спричиняє зростання накопиченої пластичної деформації та зменшення швидкості її розвитку.

Для визначення теплових потоків для пари підшипникова сталь-вуглецева сталь використовували наступні теплофізичні характеристики (при $T = 20$ °С):

$$\lambda_{yzi} = 40 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}, \alpha_{yzi} = 172 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}, \alpha_3 = 2.3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}, \rho = 7800 \text{ кг/м}^3$$

, при діаметрі зони контакту 15 мм та тривалості УЗО 1,5 с.

Розрахункові величини теплових потоків дорівнювали для інструменту $W_{yzi} = 171.88 \text{ Вт/м}^2$ та зразка $W_3 = 6.54 \text{ Вт/м}^2$ з врахуванням коефіцієнту тертя $\mu_m \sim 0,65$, статичного навантаження УЗ інструменту $F_c = 50$ Н, швидкостей нормального v_{\perp} та поперечного руху v_{\parallel} бойків УЗ інструменту $v_{yzi} = (v_{\perp} + v_{\parallel}) = 5,5$ м/с та швидкості руху зразка $v_3 = 0,01$ м/с.

Розподіл деформаційного розігріву $T(z)$ поверхні на глибині z оцінювали:

$$\Delta T = Pe^+ \left\{ f(x) + (Pe^- T_{yzi}^0 + 2(1 - K_0) \sqrt{Pe_3 T_3^0}) \cdot \text{erfc}(z / 2\sqrt{\tau_{y3}}) \right\} + T_{yzi}^0,$$

$$f(y) = 2\sqrt{\pi / \tau_{y3}} \exp(-z^2 / 4\tau_{y3}) - z \cdot \text{erfc}(z / 2\sqrt{\tau_{y3}}), Pe^{\pm} = K_0 \sqrt{Pe_{yzi}} \pm (1 - K_0) \sqrt{Pe_3},$$

$$K_0 = (\lambda_{yzi} / (\lambda_{yzi} + \lambda_3)), Pe_{yzi} = 2d_n P_3 / \alpha_{yzi}, Pe_3 = 2d_n P_{yzi} / \alpha_3, \quad (3.7)$$

де ρ_{yzi} та ρ_3 – густина матеріалу бойків та зразка [кг/м³];

d_n – діаметр зони контакту [м];

τ_{y3} – тривалість УЗО [с].

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 44 |

Отримані результати розрахунків, проведених за формулами (3.7), дали змогу визначити характер зміни температури нагрівання вздовж глибини зразка, а також оцінити температуру деформаційного розігріву на поверхні сталі 45, яка становила приблизно 40 °С.

3.2. Методика експериментальних досліджень

Для проведення систематичних експериментів були обрані сталі марок 45 та Х12МФ, що зумовлено їх широким застосуванням у машинобудуванні та здатністю ефективно працювати в умовах інтенсивних навантажень і підвищених температур.

Експериментальні дослідження лазерного оброблення (ЛО) виконувалися з використанням технологічного лазерного комплексу, до складу якого входили: волоконний лазер Rofin Sinar FL010 із максимальною вихідною потужністю 1 кВт, установка з числовим програмним керуванням (ЧПК), 2D-оптична система Scanlab Hurryscan25, оптоволоконний кабель діаметром 100 мкм, двоколірний пірометр Impac Igar 12LO та плата збору й обробки даних із відповідним програмним забезпеченням. Лазерну обробку зразків здійснювали при швидкості сканування 1000 мм/с, ширині зони сканування 10 мм, температурі нагрівання 900–1340 °С та швидкості переміщення зразка 40–140 мм/хв.

Дослідження ультразвукового оброблення (УЗО) проводили на технологічній установці з ЧПК, що включала ультразвуковий генератор УЗГ250 (частота — 21,6 кГц, потужність — 0,3 кВт) та ультразвукову коливальну систему (УЗКС) з п'єзокерамічним перетворювачем, ступінчастим концентратором і багатобойковим наконечником, обладнаним сімома циліндричними бойками. Ультразвукове оброблення зразків виконували при статичному навантаженні УЗКС 50 Н, частоті обертання наконечника 76 об/хв, амплітуді ультразвукових коливань концентратора 15–18 мкм та тривалості обробки 60–240 с.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 45 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Для дослідження мікрорельєфу поверхні та мікроструктури приповерхневих шарів використовували оптичний профілометр Leica DCM3D, рентгенівські дифрактометри ДРОН-3М і Rigaku Ultima IV, оптичний мікроскоп Nikon Optiphot-100, електронний мікроскоп JEM-CX100 JEOL, а також цифровий мікротвердомір FM800 і твердомір Computest SC. Параметри профілю мікрорельєфу визначали згідно з міжнародним стандартом ISO 4287, а параметри топографії мікрорельєфу — відповідно до ISO 25178.

Рентгеноструктурні дослідження виконували у випромінюванні $\text{CuK}\alpha$ з використанням графітового монохроматора. Величину макронапружень поверхневих шарів визначали за зміною міжплощинних відстаней, а мікронапруження кристалічної решітки та розміри областей когерентного розсіювання (ОКР) — за розширенням дифракційних максимумів методом Вільямсона–Холла та за рівнянням Шерера.

Зразки для електронно-мікроскопічного аналізу готували шляхом механічної обробки, після чого здійснювали одностороннє електрохімічне полірування в хлоро-металевому електроліті за методом Болмана. Такий підхід дозволяв отримати високоякісну інформацію про структуру приповерхневих шарів товщиною приблизно 15–20 мкм.

Теоретичну оцінку внеску окремих механізмів зміцнення у сумарний приріст границі плинності здійснювали на основі моделей Пайєрлса–Набарро, Холла–Петча та інших відомих теорій. Це дало змогу прогнозувати механічні властивості зміцнених поверхонь і коригувати режими технологічних процесів з урахуванням необхідних структурно-фазових параметрів. Оцінку внеску окремих механізмів зміцнення у зміну границі плинності проводили згідно з розрахунковими співвідношеннями, наведеними нижче.

$$\sigma_T = \sigma_0 + \Delta \quad \Delta \quad \Delta \quad \Delta \quad (3.8)$$

де σ_0 – напруження тертя решітки α -заліза [МПа];

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 46 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

$\Delta\sigma_z, \Delta\sigma_c, \Delta\sigma_{mp}, \Delta\sigma_d, \Delta\sigma_{dc}$ – зернограничне, субструктурне, твердорозчинне, дислокаційне та дисперсійне зміцнення [МПа].

Експериментальні дослідження зносостійкості зміцнених поверхонь проводили на автоматизованому трибологічному комплексі за умов квазістатичного та динамічного навантаження. Випробування здійснювали протягом 15 та 45 хв у режимі зворотно-поступального ковзання індентора, виготовленого з нітриду кремнію (Si_3N_4), діаметром 8 мм та твердістю близько 1550 ГПа. Рух індентора здійснювався з частотою 1 Гц і швидкістю ковзання 0,013 м/с уздовж доріжки довжиною 4 мм по поверхні плоских зразків у інертному середовищі при статичному навантаженні $F_s = 30$ Н, що відповідало квазістатичному режиму випробувань.

У випадку динамічного режиму навантаження на зразки, окрім статичної сили, одночасно прикладали механічні коливання, що формували динамічну складову сили нормального навантаження. Середнє значення статичного навантаження становило $F_s \approx 30$ Н, амплітуда динамічної складової — $\Delta F_s = 3$ Н (10% від статичного навантаження), а частота коливань — 25 Гц.

Визначення сили тертя (F_t) проводили тензометричним методом, реєструючи зміщення пружного елемента, жорстко зв'язаного з досліджуваним зразком. Інтенсивність зношування оцінювали за результатами аналізу профілю та топографії доріжок тертя, використовуючи профілограф Калібр К-201 і оптичний профілометр Leica DCM3D. Опір зношуванню зміцнених поверхонь визначали на основі кривої Аббота–Файерстоуна, а також із застосуванням рівняння Арчарда та комплексних параметрів триботехнічної оцінки.

Додатково проводили випробування на корозійну стійкість зразків із сталі 45 шляхом їх витримування у 3% водному розчині NaCl за кімнатної

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 47 |

температури. Для візуального аналізу ступеня корозійного ураження використовувався оптичний мікроскоп Bresser Biolux LCD.

Планування експериментальних досліджень виконували за методикою багатофакторного планування експерименту окремо для процесів лазерного оброблення (ЛО) та ультразвукового оброблення (УЗО). Отримані дані піддавали статистичній обробці з використанням програмного пакета “Design-Expert”, що дозволило побудувати регресійні моделі залежностей параметрів процесу від режимів оброблення та визначити оптимальні умови підвищення експлуатаційних властивостей поверхонь.

3.3. Результати експериментальних досліджень

Аналіз результатів експериментальних досліджень, виконаних із застосуванням методів математичного планування експерименту, дав змогу визначити раціональні межі технологічних режимів як для лазерного оброблення (ЛО), так і для ультразвукового оброблення (УЗО). Оптимізація параметрів здійснювалася з урахуванням максимальної глибини та ширини зони зміцнення, а також підвищених показників твердості й мікротвердості у випадку ЛО, і мінімальних значень параметрів мікрорельєфу при максимальній твердості поверхневого шару у разі УЗО (рис. 3.5).

Для зразків зі сталі 45 оптимальний діапазон температур нагрівання під час лазерного оброблення становив 1200–1300 °С, тоді як для сталі Х12МФ — 1270–1340 °С. При цьому швидкість переміщення зразка підтримувалася на рівні 90 мм/хв, швидкість сканування лазерного променя — 1000 мм/с, а ширина зони сканування дорівнювала 10 мм.

Для процесу ультразвукового оброблення встановлено, що амплітуда коливань концентратора має становити 18 мкм, а тривалість оброблення — 60 с для сталі 45 та 120 с для сталі Х12МФ. Режими реалізовувалися за умов статичного навантаження ультразвукової

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 48 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

коливальної системи (УЗКС) у 50 Н та частоти обертання наконечника 76 об/хв.

Отримані параметри забезпечують формування рівномірної зміцненої зони з оптимальними структурно-фазовими характеристиками, що сприяють підвищенню зносостійкості, твердості та стабільності поверхневих властивостей оброблених сталей.

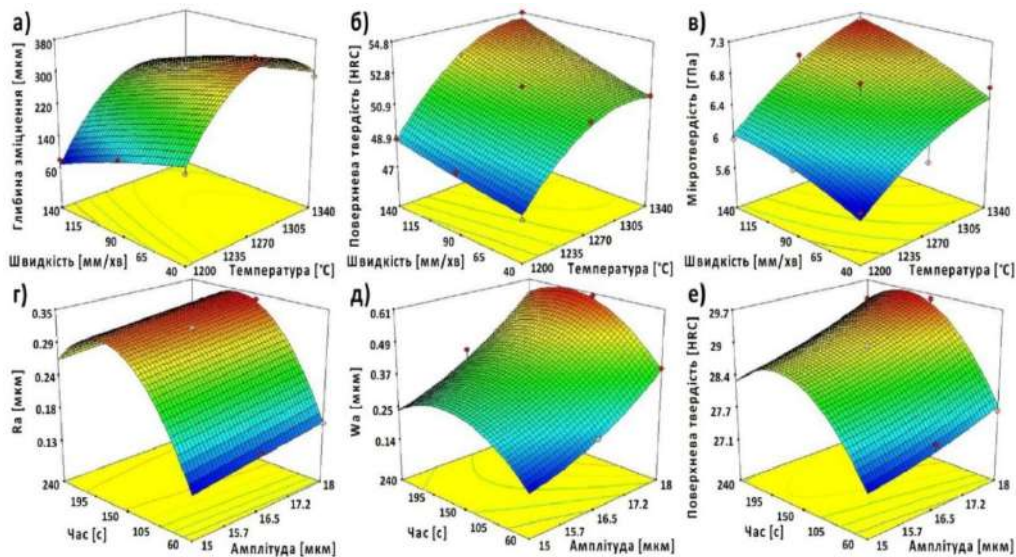


Рис. 3.5. Вплив температури нагрівання і швидкості ЛО на:

- а - глибину зміцнення; б - поверхневу твердість; в - мікротвердість та амплітуди УЗ коливань і тривалості УЗО на: г - шорсткість; д - хвилястість; е - поверхневу твердість сталі Х12МФ

Крім того, встановлено, що під час лазерного оброблення (ЛО) зі збільшенням швидкості сканування променя спостерігається тенденція до зменшення глибини зміцненого шару та зростання мікротвердості поверхні. Для забезпечення рівномірності параметрів глибини зміцнення та мікротвердості у межах термічно модифікованих ділянок застосовано повторне проходження лазерного променя, що дало змогу оптимізувати коефіцієнт перекриття сусідніх доріжок у межах 20–25%, незалежно від типу сталі.

Під час ультразвукового оброблення (УЗО) виявлено протилежну закономірність: підвищення тривалості дії призводить до зменшення твердості поверхні. Це пов'язано з розвитком індукованого перенаклепу, який спричиняє утворення надмірно деформованого шару, характеризованого локальними виривами, порами та відшаровуванням матеріалу з поверхні.

Водночас, застосування комбінованого методу ЛО+УЗО за оптимальних режимів сприяє формуванню регулярного мікрорельєфу із мінімальною хвилястістю порівняно з результатами, отриманими при окремому УЗО. Це пояснюється тим, що висока твердість поверхневого шару після ЛО забезпечує руйнування мікронерівностей та ефективно видалення продуктів зношування, а також фрагментацію та усунення оксидної плівки, яка утворюється після термічного впливу.

Такий ефект досягається завдяки комбінованій дії — ударному та обертальному навантаженню бойків ультразвукового інструмента, що супроводжується інтенсивним тертям із проковзуванням по оброблюваній поверхні (рис. 3.6, а).

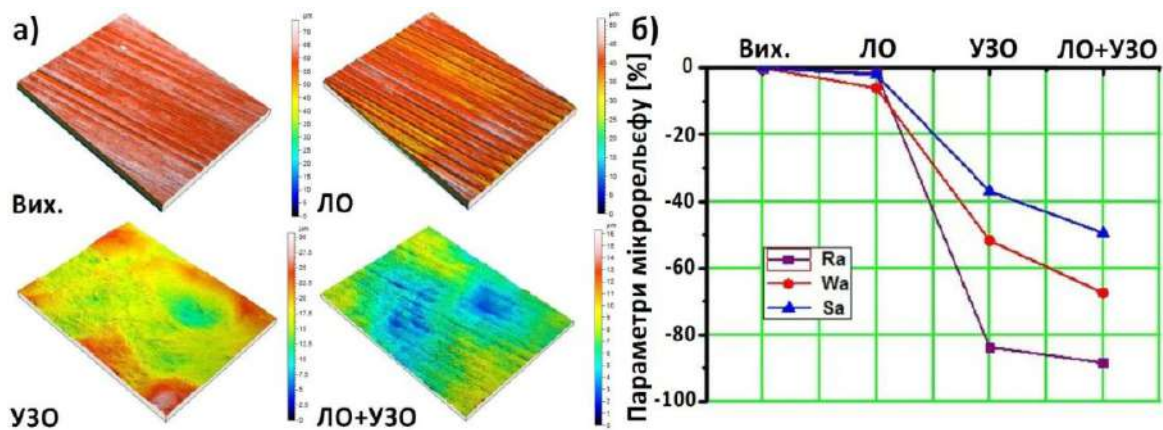


Рис. 3.6. Топографія (а) та параметри (б) мікрорельєфу поверхні сталі Х12МФ

У порівнянні з вихідним станом поверхні, комбінована лазерно-ультразвукова обробка (на прикладі сталі Х12МФ) забезпечила суттєве

покращення мікрогеометричних характеристик. Зокрема, середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості Ra зменшилося у 6–8 разів, що свідчить про істотне згладжування мікронерівностей поверхневого шару. Крім того, така технологічна комбінація сприяла формуванню оптимальної хвилястої структури поверхні з регулярним мікрорельєфом і низькими параметрами шорсткості та хвилястості, що, у свою чергу, створює сприятливі умови для підвищення маслоємності поверхонь деталей і зменшення інтенсивності зношування під час експлуатації (рис. 3.6, б).

Результати рентгеноструктурного аналізу підтвердили, що ультразвукова обробка після лазерного зміцнення сприяє руйнуванню та майже повному видаленню оксидів заліза з поверхні. Одночасно формується стабільний стан залишкових напружень стиску величиною близько –409 МПа, що позитивно впливає на експлуатаційні характеристики обробленого шару. На дифрактограмах ці зміни проявляються у вигляді зниження інтенсивності дифракційних максимумів та зміщення піку (310) α -фази в бік менших кутів дифракції порівняно з вихідним станом матеріалу (рис. 3.7).

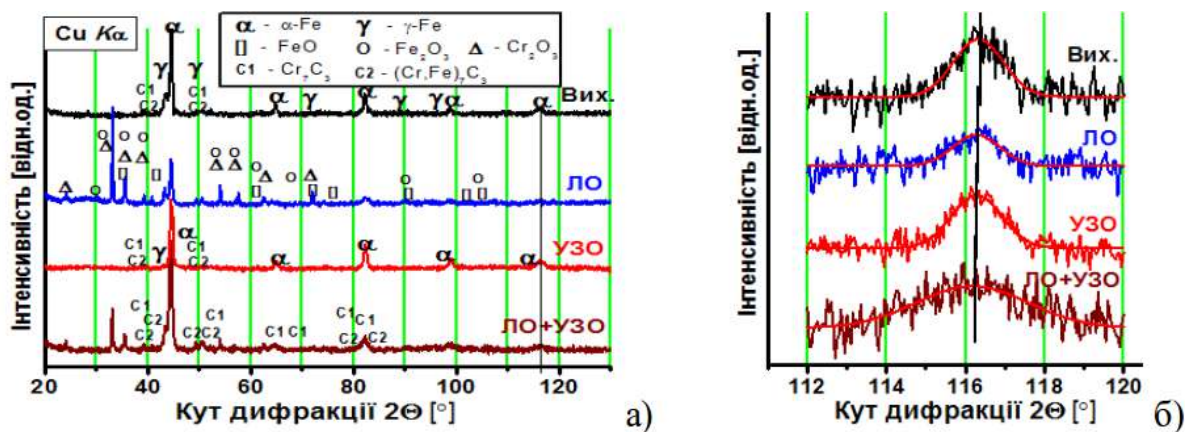


Рис. 3.7. Дифрактограми (а) та дифракційні максимуми (310) α -фази (б) сталі Х12МФ у вихідному стані, після ЛО, УЗО та комбінованої ЛО+УЗО

Найбільш виражене розширення дифракційних максимумів спостерігається після комбінованої лазерно-ультразвукової обробки сталі Х12МФ, що свідчить про інтенсивне подрібнення областей когерентного

розсіювання (ОКР) та підвищення рівня мікронапружень кристалічної решітки до приблизно 0,47%. Максимальне розширення дифракційного піку α -фази зафіксовано при оптимальній швидкості лазерної термообробки — близько 90 мм/хв, що підтверджує підвищення щільності дислокацій і розвиток структурної неоднорідності в приповерхневому шарі.

Дослідження показали, що комбінована технологія ЛО+УЗО забезпечує формування складного розподілу залишкових напружень по глибині зміцненого шару та подвоює величину стискаючих залишкових напружень у приповерхневій зоні порівняно з окремою лазерною обробкою. Визначені критичні глибини переходу від напружень стиску до розтягу добре корелюють із межами зон термічного (ЗТВ) та деформаційного впливу (ЗДВ) у поперечному перерізі, а також із розподілом мікротвердості по глибині поверхневого шару (рис. 3.8).

Встановлено, що товщина ЗДВ після комбінованої обробки є меншою, ніж після окремої УЗО, що пояснюється зростанням твердості та зниженням пластичності поверхні внаслідок попереднього лазерного зміцнення. Проведені вимірювання показали, що ультразвукова обробка після лазерного впливу для сталі Х12МФ призводить до підвищення мікротвердості поверхневого шару (рис. 3.8, г) і зростання поверхневої твердості приблизно на 25% порівняно з ізольованою ЛО. Такий ефект обумовлений подрібненням мартенситної структури та карбідів хрому, їх більш рівномірним розподілом, збільшенням густини дислокацій і зменшенням об'єму залишкового аустеніту.

У порівнянні з вихідним станом матеріалу, застосування комбінованої лазерно-ультразвукової технології забезпечує підвищення твердості поверхневого шару в 2,5 раза і більше, що підтверджує її високу ефективність для формування зміцнених структур з покращеними експлуатаційними властивостями.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 52 |

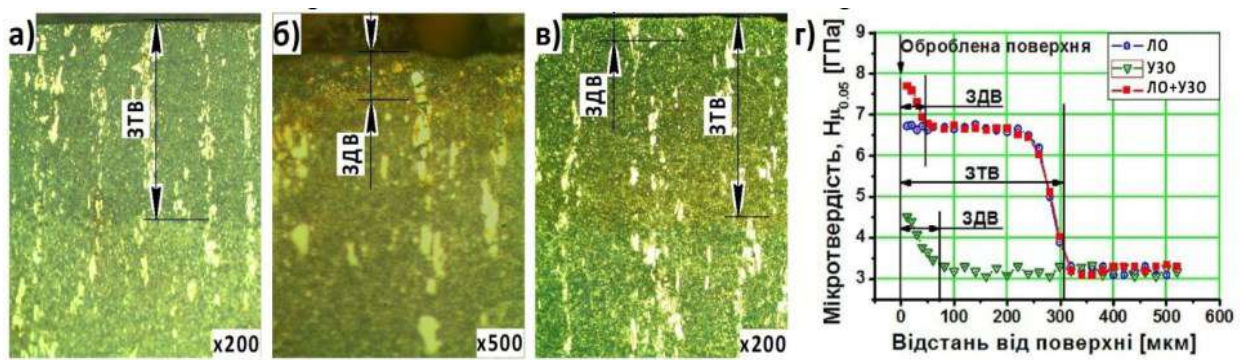


Рис. 3.8. Мікроструктура (ЛО (а); УЗО (б); комбінована ЛО+УЗО (в)) та розподіл мікротвердості (г) поверхневого шару сталі Х12МФ

Електронно-мікроскопічні дослідження підтвердили суттєві структурні зміни, що відбуваються в поверхневому шарі сталі Х12МФ у процесі комбінованої обробки. У вихідному стані (рис. 3.9, а) структура характеризується низькою густиною дефектів кристалічної решітки та наявністю значної кількості світлих областей, товщина яких є меншою за товщину фольги. Ці ділянки формуються у місцях витравлювання карбідів хрому, розмір яких, згідно з аналізом мікрознімків, становить приблизно 350 нм.

Після ультразвукового оброблення (УЗО) спостерігається інтенсивне зростання густини дислокацій та зменшення розмірів і кількості карбідних частинок у мікроструктурі поверхневого шару товщиною 15–20 мкм. У межах субзерен легованого фериту виявлено щільні дислокаційні сітки, що свідчить про розвиток деформаційних процесів високої інтенсивності (рис. 3.9, б).

Після лазерного оброблення (ЛО) структура поверхневого шару набуває двохкомпонентного характеру: у частині областей спостерігаються витягнуті зерна мартенситного типу, тоді як інші ділянки представлені подрібненою феритною структурою з великою кількістю вторинних дисперсних карбідів і залишковими первинними карбідами, що розміщуються вздовж границь зерен і субзерен (рис. 3.9, в).

Після комбінованої лазерно-ультразвукової обробки формується ультрадисперсна зернова структура із середнім розміром зерен близько 80 нм, границі яких заблоковані великою кількістю вторинних дисперсних карбідів розміром приблизно 20 нм. Про значне розорієнтування зерен у структурі приповерхневого шару свідчить азимутальне розмиття рефлексів фериту на картині електронної дифракції, що вказує на формування сильно неоднорідного наноструктурного стану (рис. 3.9, г).

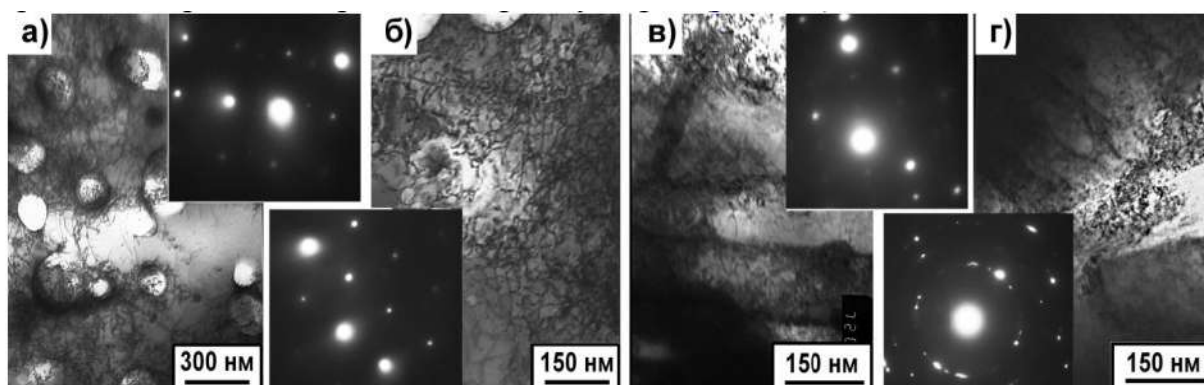


Рис. 3.9. Електронно-мікроскопічні зображення мікроструктури сталі Х12МФ:

а - вихідний стан; б - УЗО; в - ЛО; г - комбінована ЛО+УЗО

Встановлено, що при лазерному обробленні (ЛО) та комбінованій лазерно-ультразвуковій обробці (ЛО+УЗО) сталі Х12МФ формування величини границі плинності зумовлюється зернограничним, твердорозчинним та дисперсним зміцненням, тоді як при ультразвуковому обробленні (УЗО) домінують механізми дислокаційного, твердорозчинного та субструктурного (зернограничного) зміцнення.

Аналіз кількісного внеску окремих складових показав, що зернограничне зміцнення є визначальним фактором при ЛО та комбінованій ЛО+УЗО і становить приблизно 47% та 51% відповідно. У випадку УЗО провідну роль відіграє дислокаційна складова, частка якої сягає близько 34%. Отримані результати добре узгоджуються з даними мікроструктурного аналізу та демонструють високу кореляцію із теоретичною оцінкою границі

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 54 |

плинності сталі Х12МФ, що підтверджує відповідність між розрахованими та експериментально визначеними значеннями мікротвердості зміцненого шару.

Застосування комбінованої обробки забезпечує формування регулярного мікрорельєфу поверхні з мінімальними параметрами профілю, тоді як створена ультрадисперсна структура з карбідами, що блокують границі зерен, сприяє підвищенню твердості та зменшенню інтенсивності зношування. Експериментальні результати свідчать, що при квазістатичному навантаженні (СРН) величина зношування зменшується приблизно удвічі, а при динамічному навантаженні (ДРН) – у чотири рази (рис. 3.10).

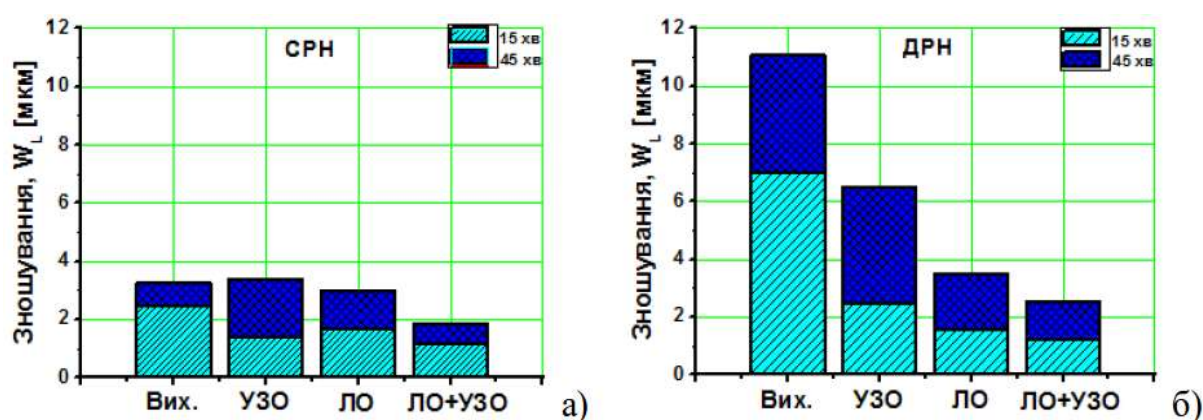


Рис. 3.10. Величини зношування доріжок тертя сталі Х12МФ:

а - статичний режим навантаження; б - динамічний режим навантаження

Результати експериментальних досліджень величини зношування поверхонь показали чітку кореляцію з теоретичними оцінками, отриманими на основі аналізу профілю шорсткості за кривою Аббота–Файерстоуна та законом зношування Арчарда. Це свідчить про адекватність використаної математичної моделі для прогнозування триботехнічних характеристик зміцнених шарів після лазерної, ультразвукової та комбінованої обробки.

Додаткові експериментальні випробування корозійної стійкості підтвердили, що після комбінованої лазерно-ультразвукової обробки на поверхні зразків із сталі 45 не виявлено зон оксидів заліза, навіть після витримування протягом шести діб у 3% розчині NaCl. Такий результат пояснюється формуванням стабільного мікрорельєфу з низькими

параметрами шорсткості та підвищеними фізико-механічними характеристиками поверхневого шару, що ефективно знижують схильність до окиснення та утворення корозійних осередків.

На основі результатів моделювання та експериментальних досліджень розроблено алгоритм вибору оптимальних технологічних режимів комбінованої лазерно-ультразвукової обробки (рис. 3.11). Алгоритм передбачає можливість автоматизованого визначення раціональних параметрів процесу за введеними вихідними характеристиками матеріалу та режимами ЛО й УЗО, забезпечуючи досягнення цільових показників якості поверхневого шару:

- мікротвердість $H_{\mu} > 6,0$ ГПа;
- глибина зміцненого шару $h_z > 200$ мкм;
- параметр шорсткості $Ra < 0,5$ мкм.

Крім того, на основі експериментально-розрахункових даних розроблено кінематичні схеми ультразвукової обробки (УЗО) з використанням одnobойкових та багатобойкових наконечників, що забезпечують ефективне зміцнення малогабаритних і великогабаритних зовнішніх поверхонь деталей. Для кожної з кінематичних схем розраховано енергетичні показники роботи ультразвукового інструменту відповідно до залежності:

$$E_{yzi} = f_y E_{ke} / m_{\sigma} = f_y m_{\sigma} (E_{yзк} + E_{\sigma ke}), \quad (3.9)$$

де $f_y \approx 3 \pm 0,5$ кГц – частота ударного впливу бойків;

m_{σ} – маса бойка;

E_{ke} – кінетична енергія бойків;

$E_{\sigma ke}$ – додаткова кінетична енергія бойків.

При використанні багатобойкового наконечника (зі сімома бойками), механічна енергія інструменту складала ~ 160 кДж.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 56 |

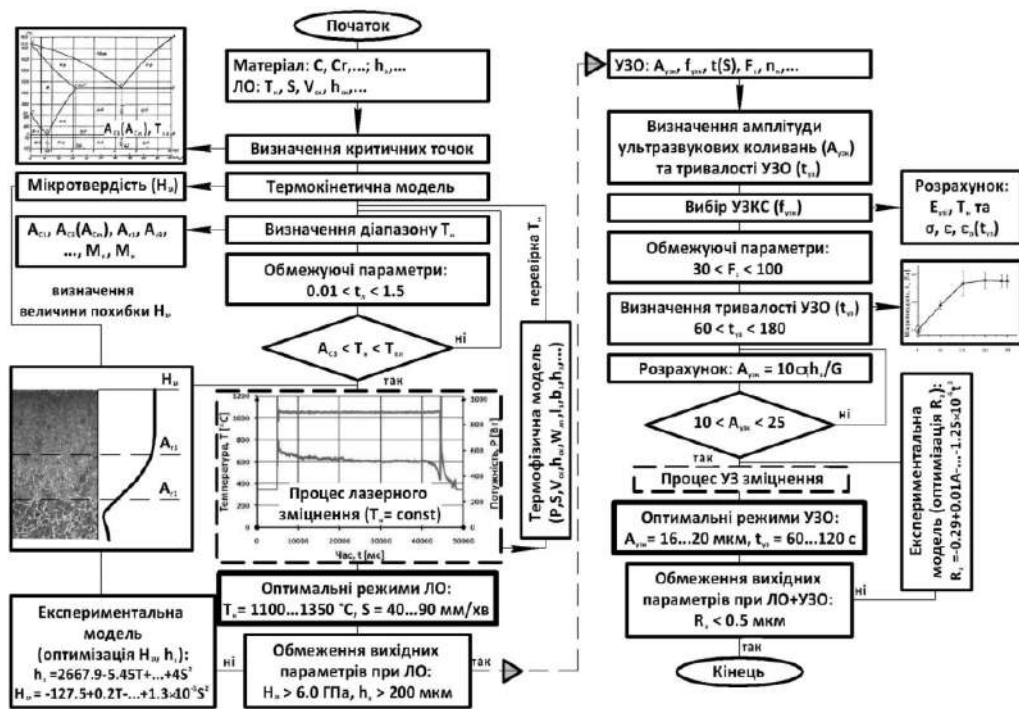


Рис. 3.11. Алгоритм визначення технологічних режимів комбінованої лазерно-ультразвукової обробки (роздільна схема) сталевих деталей.

Крім того, в рамках проведених досліджень розроблено конструкцію пристрою для поверхневої ультразвукової оздоблювально-зміцнювальної обробки металів, який забезпечує підвищення ефективності процесів зміцнення та оздоблення за рахунок раціонального розподілу енергії ультразвукових коливань у зоні контакту інструмента з поверхнею. Додатково розроблено керуючі програми для автоматизованого формування регульованого мікрорельєфу, що дозволяють відтворювати оптимальні геометричні параметри поверхні залежно від призначення деталі та умов експлуатації. Такий мікрорельєф забезпечує підвищену маслоємність поверхонь тертя, сприяючи утриманню мастильних матеріалів у зоні контакту, зниженню коефіцієнта тертя та підвищенню довговічності трибосистеми в цілому.

4. РОЗРОБКА УСТАНОВКИ І СПОСОБУ ДЛЯ КОМБІНОВАНОЇ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

4.1. Обґрунтування необхідності розробки

Запропонований спосіб належить до безабразивних методів фінішної обробки, призначених для оздоблення та зміцнення металевих поверхонь з метою формування наноструктурованих і субмікрокристалічних шарів. Такий підхід може бути ефективно застосований у галузі машинобудування, де підвищення експлуатаційної довговічності та якості поверхневого шару є критично важливими параметрами.

Відомі технології, зокрема спосіб пластичного деформування обкатуванням роликом або кульками із додатковим підігрівом поверхні електронним струмом, мають низку обмежень. Основним їх недоліком є інтенсивне окиснення поверхневого шару металу, що знижує якість обробленої поверхні та обмежує продуктивність процесу.

Існує також спосіб ультразвукової безабразивної фінішної обробки металів, у якому динамічні коливання, створювані ультразвуковою системою, викликають пластичне деформування мікронерівностей та зміцнення поверхневого шару. Однак у випадку використання однобойкового інструмента, жорстко закріпленого в державці, продуктивність обмежується малою шириною оброблюваної смуги, що знижує ефективність методу.

Найближчим за технічною суттю аналогом є спосіб лазерного термодформаційного зміцнення, при якому лазерне випромінювання, сфокусоване в пляму круглої або прямокутної форми, нагріває поверхневий шар металу до температури аустенізації. Після віддалення джерела нагріву розігрітий метал швидко охолоджується, а при температурах 650...450 °С здійснюється статичний вплив роликом, який забезпечує зміцнення поверхневого шару. Цей процес поєднує три стадії: лазерне нагрівання, швидке охолодження та механічне деформування.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 58 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Відома також установка для лазерної поверхневої обробки, що має систему керування на основі пірометра, який дозволяє регулювати потужність лазерного випромінювання. Проте така установка не передбачає інтеграції ультразвукових впливів, необхідних для реалізації комбінованої термодформаційної обробки.

Аналогічно, відомі установки для лазерно-ультразвукової обробки металів включають лазерний випромінювач із волоконним світловодом та ультразвуковий генератор із одно- або багатобойковими наконечниками, а також координатний стіл з лінійними приводами та кроковими двигунами. Проте недоліком таких систем є відсутність автоматизованої системи керування процесом відповідно до заданих параметрів, а також неможливість надання обертального руху деформуючим інструментам, що обмежує функціональні можливості технології.

4.2. Вимоги, які ставляться до розробки

Основною метою розробки є удосконалення способу лазерного термодформаційного зміцнення і оздоблення поверхневого шару металу шляхом поєднання лазерного нагріву до заданої температури та ультразвукового впливу багатобойкових інструментів, які отримують зворотно-поступальні та обертальні рухи від ультразвукового генератора. Такий підхід сприяє формуванню нано- та субмікросталічних структур, підвищенню якості поверхні та зростанню продуктивності процесу.

Згідно з розробленим способом, поверхневий шар деталі спочатку нагрівається лазерним випромінюванням, сфокусованим у пляму необхідної форми, після чого здійснюється ультразвукове деформування. Новизна методу полягає у комбінованій дозованій дії лазерного випромінювання та динамічного впливу багатобойкових інструментів, розташованих асиметрично у торці державки.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 59 |

Інструменти отримують високочастотні зворотно-поступальні коливання та обертальний рух навколо осі, що забезпечує виникнення дотичних сил зсуву, прискорює пластичне деформування мікронерівностей і сприяє утворенню наноструктурованого шару з підвищеними механічними властивостями.

У створеній установці головним завданням є підвищення продуктивності процесу та поліпшення якості оброблених поверхонь шляхом модернізації конструктивних елементів і впровадження автоматизованої системи керування термодформаційним процесом.

Запропонована установка містить лазерний випромінювач із волоконним світловодом і сканатором, ультразвуковий випромінювач з одно- або багатобойковими наконечниками, розташованими перпендикулярно або під кутом до оброблюваної поверхні, а також координатний стіл із приводами.

Новим у конструкції є наявність сканатора, який забезпечує фокусування лазерного променя за двома координатами з регульованою швидкістю сканування, а також механізму для регулювання обертання деформуючих інструментів. Крім того, установка обладнана оптоволоконним пірометром для контролю температури нагріву та спеціальною електронною платою збору даних, що забезпечує автоматизоване керування параметрами процесу в реальному часі.

Під час роботи лазерне випромінювання транспортується через оптоволокно до сканатора, який формує фокусовану пляму на поверхні деталі. За допомогою програмного забезпечення сканатор і ультразвуковий концентратор можуть переміщуватись у вертикальному напрямку, тоді як заготовка, встановлена на столі, має можливість поздовжнього та поперечного переміщення. Оптоволоконний пірометр дозволяє встановлювати й контролювати температуру термодформаційного процесу з високою точністю.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 60 |

4.3. Опис способу і установки для комбінованої лазерно-ультразвукової обробки деталей машин

На рисунку 4.1 представлено схему реалізації розробленого способу фінішної обробки, що включає: ультразвукову головку (поз. 1) з багатобойковими інструментами (поз. 2), фокусуючу лінзу (поз. 3) та оброблювану деталь (поз. 4).

Реалізація процесу здійснюється наступним чином. Поверхневий шар деталі (поз. 4), що переміщується у заданому напрямку зі швидкістю V , попередньо нагрівається лазерним випромінюванням, сфокусованим фокусуючою лінзою (поз. 3) у пляму круглої форми до температури, нижчої за температуру аустенізації. Після цього на поверхню діють багатобойковими інструментами, які розміщені несиметрично у торці державки і отримують від ультразвукового генератора (поз. 1) зворотно-поступальні та обертальні рухи з певною статичною силою притиску F .

Таке поєднання лазерного термічного впливу та ультразвукового пластичного деформування забезпечує інтенсивне формування зміцненого поверхневого шару з наноструктурованою будовою, зменшення поверхневої шорсткості та зростання зносостійкості оброблених деталей.

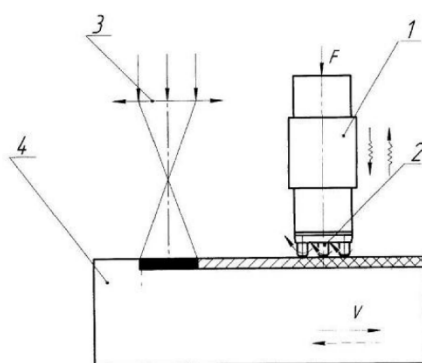


Рис. 4.1. Схему реалізації способу комбінованої лазерно-ультразвукової обробки деталей машин

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 61 |

Застосування комбінованого впливу лазерного та ультразвукового джерел, що реалізують сумісну дію теплової (лазерне випромінювання) та механічної (ультразвукові коливання) енергій, забезпечує створення в приповерхневому шарі металу критичного рівня енергетичної щільності. Така енергія ініціює інтенсивні процеси пластичної деформації та сприяє руйнуванню мікронерівностей, що призводить до формування у структурі матеріалу нано- та субмікрокристалічних фаз, а також до збільшення глибини зміцненого шару.

Використання технологічної схеми, що передбачає попередню дію ультразвукового пластичного деформування з подальшим локальним нагріванням поверхні лазерним випромінюванням до температури загартування, дозволяє досягти більш повної аустенізації матеріалу та підвищити ступінь його зміцнення. Такий підхід сприяє комплексному поліпшенню фізико-механічних характеристик поверхневого шару та забезпечує рівномірність мікроструктурних перетворень.

Конструктивна суть розробленої установки наведена на рисунках 4.2 і 4.3, де представлена узагальнена схема реалізації процесу комбінованої лазерно-ультразвукової оздоблювально-зміцнювальної обробки.

Установка включає такі основні елементи:

1. **Лазерне джерело (1)** — формує промінь необхідної потужності;
2. **Оптоволоконний світловод (2)** — забезпечує транспортування випромінювання від лазера до зони обробки;
3. **Лазерний промінь (3)** — здійснює локальний нагрів поверхні;
4. **Оброблювана заготовка (4)** — деталь, поверхня якої підлягає зміцненню;
5. **Сканатор (5)** — виконує фокусування променя та його переміщення по координатах із заданою швидкістю;

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 62 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

6. **Оптоволоконний пірометр (6)** — здійснює безконтактне вимірювання температури у зоні обробки;
7. **Двоколірний промінь (7)** — використовується для підвищення точності контролю температури;
8. **Спеціальний керуючий пристрій (8)** — регулює параметри лазерного випромінювання залежно від зворотного сигналу пірометра;
9. **Зона дії лазерного променя (9)** — область контакту теплової енергії з поверхнею металу;
10. **Корпус установки (10)** — виконує несучу функцію та забезпечує жорсткість системи;
11. **Концентратори (11)** — передають ультразвукову енергію від генератора до робочих наконечників;
12. **Деформуючі наконечники (12)** — реалізують механічну дію на розігріту поверхню;
13. **Персональний комп'ютер (13)** — здійснює керування процесом, моніторинг параметрів і зворотний зв'язок з усіма вузлами установки.

Сумісна дія лазерного нагріву та ультразвукових коливань у даній установці створює синергетичний ефект, що дозволяє не лише покращити якість обробленої поверхні, а й значно підвищити ефективність процесу оздоблювально-зміцнювальної обробки.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 63 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

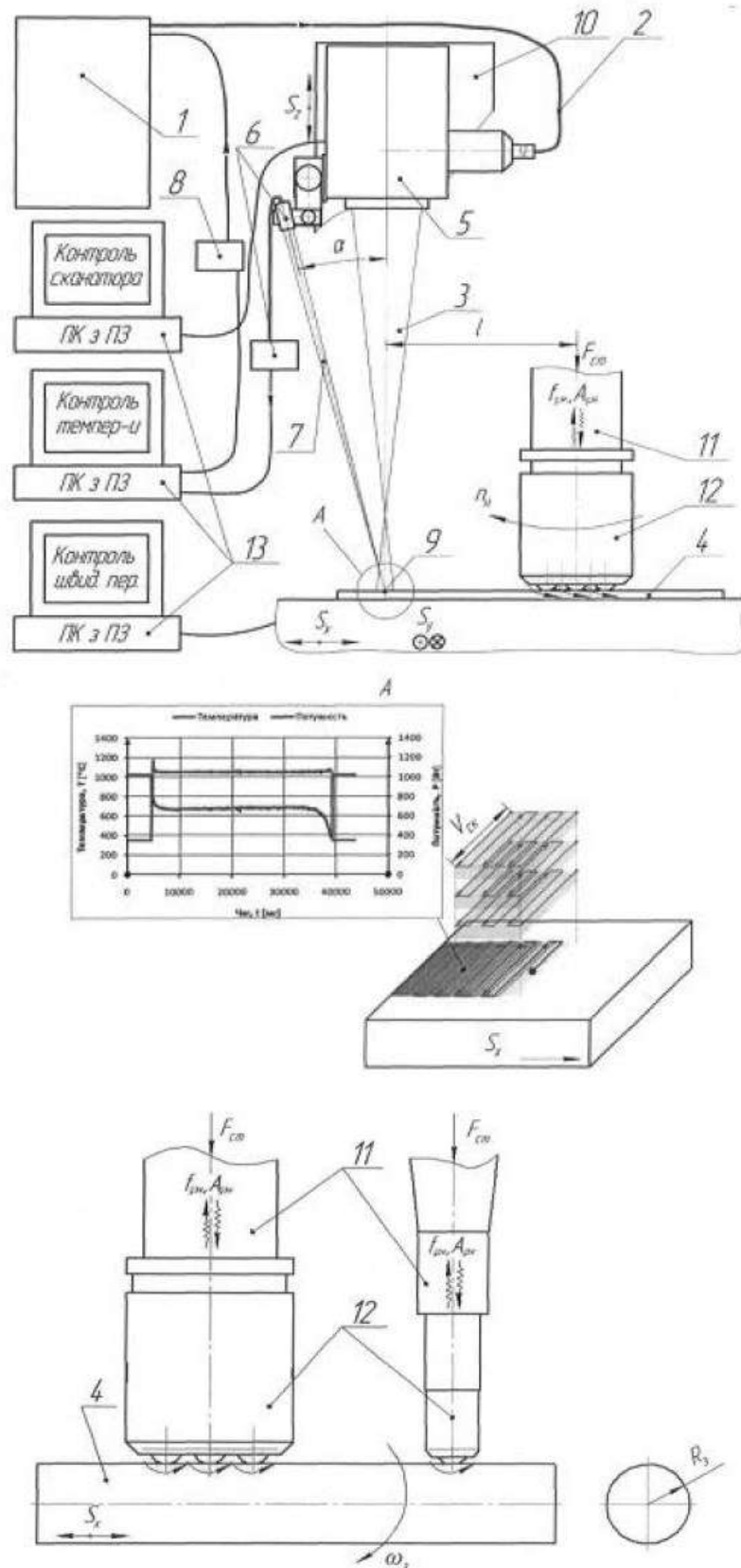


Рис. 4.2. Установка комбінованої лазерно-ультразвукової оздоблювально-зміцнювальної обробки

| | | | | |
|------|------|----------|--------|------|
| | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

Робота установки для комбінованої лазерно-ультразвукової оздоблювально-зміцнювальної обробки базується на узгодженій дії двох фізичних чинників — локального термічного впливу лазерного випромінювання та динамічних ультразвукових коливань. Такий підхід забезпечує формування зміцненого поверхневого шару з підвищеними фізико-механічними властивостями.

Лазерне випромінювання (поз. 3), сформоване волоконним джерелом, подається на поверхню деталі через скануючий пристрій (поз. 5). За допомогою системи сканування промінь переміщується з заданою швидкістю по поверхні оброблюваної зони, формуючи пляму круглої або прямокутної форми, сфокусовану в робочій області. Такий спосіб подачі випромінювання забезпечує рівномірний розподіл енергії по площині заготовки, що є критично важливим для стабільності процесу нагрівання.

Деталь фіксується на координатному робочому столі, який має можливість точного переміщення у поздовжньому та поперечному напрямках із регульованою швидкістю. Завдяки цьому забезпечується рівномірність термічного навантаження під час обробки, що дозволяє уникнути локальних зон перегріву або недогріву поверхні.

Контроль і стабілізація температури в зоні дії лазера здійснюються за допомогою оптоволоконного пірометра (поз. 6). Його двоканальний оптичний промінь (поз. 7) спрямовується через пристрій (поз. 8) безпосередньо в зону дії випромінювання (поз. 9), що забезпечує реалізацію зворотного зв'язку між пірометром і системою керування лазером. Таким чином, автоматичне регулювання потужності випромінювання дозволяє підтримувати стабільний температурний режим і забезпечувати повторюваність процесу зміцнення.

На визначеній відстані від осі дії лазерного променя, на корпусі установки (поз. 10), розміщено ультразвуковий концентратор (поз. 11), оснащений деформуючими наконечниками (поз. 12). Конструкція установки передбачає можливість використання як одно-, так і багатобойкових

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 65 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

наконечників залежно від технологічних вимог. Наконечники отримують зворотно-поступальні коливання від ультразвукового генератора та обертальний рух від електродвигуна, обладнаного системою регулювання частоти обертів. Така комбінація рухів дозволяє реалізувати інтенсивний процес пластичного деформування у зоні контакту з попередньо розігрітою поверхнею деталі, що сприяє формуванню нанокристалічної структури та зростанню глибини зміцненого шару.

На рисунку 4.3 подано конструктивну схему установки для комбінованої лазерно-ультразвукової обробки, до складу якої входять такі основні елементи:

1. ультразвуковий генератор (1);
2. п'єзокерамічний перетворювач (2);
3. регулятор обертів крокового електродвигуна (3);
4. система керування та контролю (4);
5. фланець (5);
6. передня та задня накладки (6);
7. концентратор (7);
8. герметичний корпус (8);
9. державка головки (9);
10. радіально-упорний роликовий конічний підшипник (10);
11. ущільнення (11);
12. обертова головка (12);
13. обмотки статора (13);
14. обмотки ротора (14);
15. плоска кільцева пружина (15);
16. пластина з високоміцного сплаву (16);
17. стрижневі ударні інструменти (17);
18. виріб (18);
19. пружина (19);

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 66 |

- 20. датчик температури (20);
- 21. гумові прокладки (21);
- 22. штуцер для подачі стисненого повітря (22);
- 23. ємнісний датчик зближення (23);
- 24. наскрізні охолоджувальні канали (24);
- 25. герметичні електроізолювальні вводи для подачі напруги на перетворювач (25);
- 26. корпус головки (26);
- 27. кріпильні гвинти втулки ротора (27);
- 28. кріпильні гвинти статора (28).

Завдяки такій конструкції забезпечується стабільна робота системи при високочастотних коливаннях, ефективне охолодження деформуючих інструментів, а також безперервний контроль параметрів процесу в режимі реального часу. Внаслідок цього установка гарантує високу якість обробленої поверхні, рівномірність зміцнення та підвищення експлуатаційної надійності деталей машин.

Таким чином, запропонована установка реалізує поєднання двох високоефективних методів обробки — лазерного термонагрівання та ультразвукового пластичного деформування — що дозволяє досягти якісно нового рівня у формуванні структури поверхневого шару металів, зокрема за рахунок утворення нано- та субмікрокристалічних структур, зростання мікротвердості та підвищення зносостійкості оброблених поверхонь.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 67 |

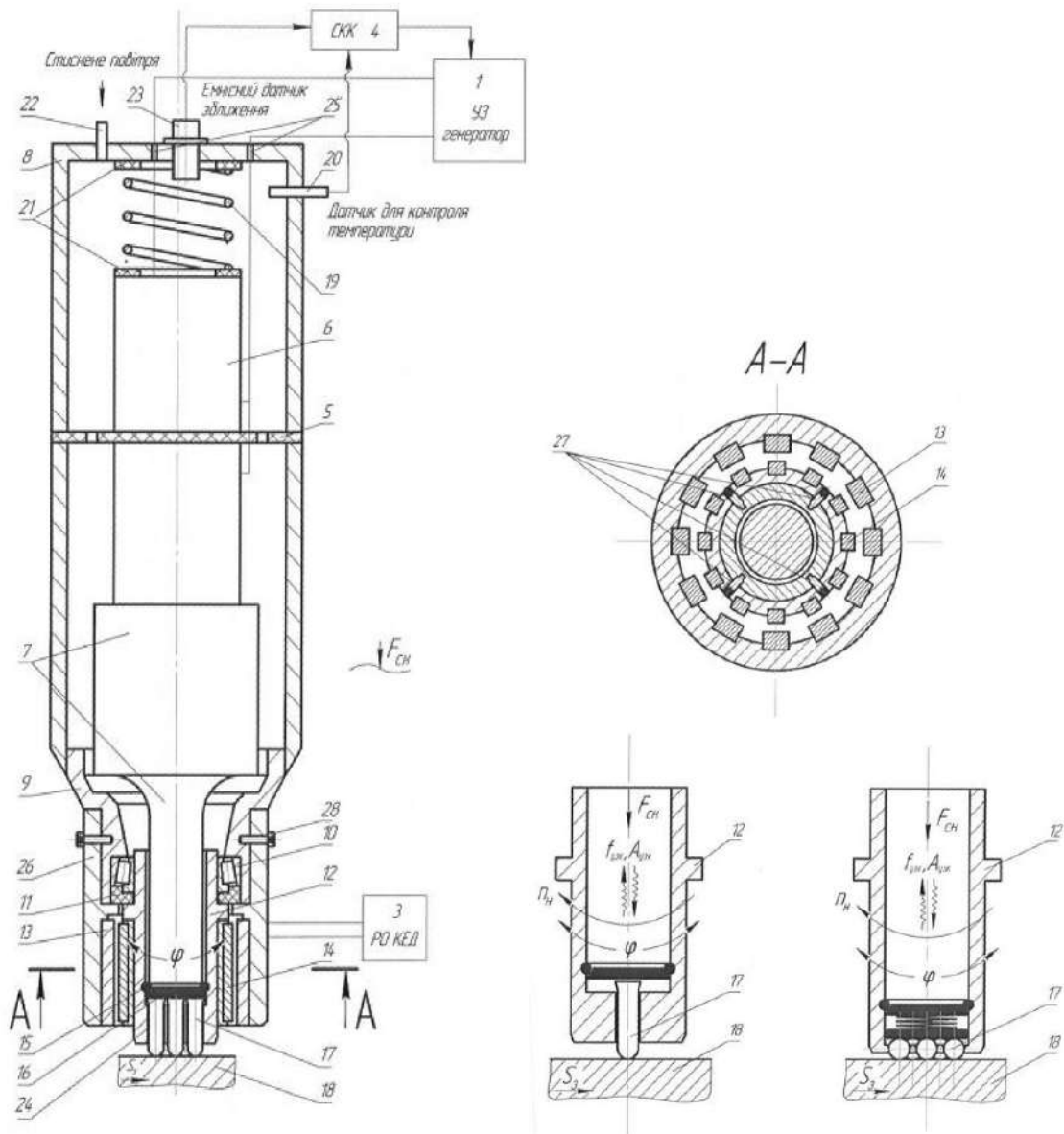


Рис. 4.3. Конструкція установки для поверхневої оздоблювально-зміцнювальної обробки

Робота установки для комбінованої поверхневої оздоблювально-зміцнювальної обробки здійснюється за наступним принципом. Перед початком процесу нижні кінці деформуючих інструментів (поз. 17) встановлюються в контакт із металевою поверхнею деталі (поз. 18). Ультразвукова коливальна система, що складається з п'єзокерамічного перетворювача (поз. 2), концентратора (поз. 7), державки (поз. 9) та робочої головки (поз. 12), притискається до оброблюваної деталі із заданим зусиллям.

| | | | | |
|------|------|----------|--------|------|
| | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

Після цього від ультразвукового генератора (поз. 1) на п'єзокерамічний перетворювач подається електрична напруга, яка збуджує поздовжні ультразвукові коливання певної частоти. У результаті цього амплітуда коливань концентратора на його вихідному торці (поз. 13) підвищується, і механічна енергія передається стрижневим ударним інструментам (поз. 17).

Одночасно з вмиканням генератора через штуцер (поз. 22) у корпус (поз. 8) подається стиснене повітря, яке спрямовується до зони обробки через отвори у фланці (поз. 5) і надходить до головки (поз. 12). Далі, проходячи через канали (поз. 24), повітря виходить назовні. Частина повітря проходить крізь зазори між головкою та ударними інструментами, що сприяє їх охолодженню та стабілізації температурного режиму під час роботи.

Система керування, підключена до персонального комп'ютера, подає сигнали на котушки статора, що забезпечує поворот робочої головки з ударними інструментами на заданий кут, а також переміщення заготовки у поздовжньому чи поперечному напрямку відповідно до програми.

Для запобігання виходу з ладу інструментів і контролю температурного режиму передбачено ємнісний датчик зближення (поз. 23) та температурний датчик (поз. 20), які здійснюють моніторинг технологічного процесу в реальному часі.

Використання системи числового програмного керування (ЧПК), а також можливість оперативної заміни робочої головки разом із деформуючими інструментами і здійснення дискретно-обертового руху на заданий кут забезпечують рівномірність рельєфу та структури поверхневого шару, покращують механічні властивості деталі та підвищують ефективність процесу оздоблювально-зміцнювальної обробки.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 69 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

5. ЗАХОДИ З БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ УСТАТКУВАННЯ З ВІДНОВЛЕННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ

Атмосферне повітря є одним із ключових природних чинників, що забезпечують існування людини. Без доступу кисню через дихальні шляхи життєдіяльність організму припиняється вже за кілька хвилин. За звичайних природних умов таке середовище не становить небезпеки, оскільки не містить токсичних речовин. Проте з початком активної господарської діяльності людини, яка супроводжується використанням хімічних сполук і технологічних процесів, повітряне середовище стало потенційно небезпечним для життя.

Органи чуття людини не здатні об'єктивно визначити рівень чистоти повітря. Зокрема, нюх не розпізнає наявність деяких небезпечних газів — таких як оксид вуглецю, діоксид вуглецю чи оксиди азоту. Навіть при сприйнятті запаху токсичних речовин (наприклад, синильної кислоти) організм не реагує миттєво, а отруєння проявляється лише після накопичення шкідливої речовини до критичної концентрації. Інтенсивність отруєння залежить як від кількості речовини, що потрапила в організм, так і від індивідуальної чутливості людини.

Отже, створення безпечних і гігієнічно сприятливих умов праці вимагає запровадження системи нормування шкідливих речовин, надійного контролю їх концентрацій у повітрі та ефективних технологій їх нейтралізації.

Джерела шкідливих речовин у повітрі робочої зони

У сучасних виробничих процесах застосовується велика кількість хімічних сполук, що можуть потрапляти у повітря і негативно впливати на організм людини. Для визначення їх небезпечності проводяться медико-біологічні дослідження, у результаті яких встановлюються **гранично допустимі концентрації (ГДК)** — рівні, перевищення яких є неприпустимим.

На підприємствах харчової та переробної промисловості шкідливі речовини потрапляють у повітря внаслідок технологічних процесів або

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 70 |

зберігання сировини, напівфабрикатів і відходів. Вони можуть бути у вигляді газів, парів або пилу, спричиняючи хронічні отруєння чи професійні захворювання.

Класифікація шкідливих речовин за токсичною дією

Залежно від механізму впливу на організм виділяють такі основні групи токсичних сполук:

- **Кров'яні отрути** (оксид вуглецю, бензол) — блокують здатність гемоглобіну приєднувати кисень;
- **Нервові отрути** (спирти, сірководень, кофеїн) — викликають перенапруження нервової системи, що призводить до її виснаження;
- **Подразнюючі речовини** (аміак, сірчистий газ, пари кислот) — уражають органи дихання та слизові оболонки;
- **Корозійні речовини** (кислоти, луги) — викликають опіки шкіри та слизових тканин;
- **Печінкові отрути** (дихлоретан, чотирихлористий вуглець) — спричиняють запальні процеси в печінці;
- **Алергени** (алкалоїди та подібні сполуки) — змінюють імунну реактивність організму;
- **Канцерогени** (3,4-бензопірен, кам'яновугільна смола) — сприяють утворенню злоякісних пухлин;
- **Мутагени** (сполуки ртуті, оксид етилену) — негативно впливають на генетичний апарат клітин.

Рівень токсичності, фізико-хімічні властивості та шляхи проникнення цих речовин визначають їх потенційну небезпеку та регламентуються санітарними нормами.

Газові, парові та аерозольні забруднення

У виробничих приміщеннях шкідливі речовини можуть перебувати у вигляді аерозолів — суміші дрібнодисперсних крапель або твердих частинок, що утримуються у повітрі під дією потоків. Частинки, які осідають, формують

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 71 |

аерогель. Газові та парові забруднення, на відміну від аерозолів, змішуються з повітрям на молекулярному рівні, тому механічні методи очищення для них малоефективні.

Багато газів мають більшу густину, ніж повітря, тому накопичуються в нижніх ділянках приміщень — підвалах, галереях, шахтах, що підвищує ризик отруєнь або вибухів.

Характеристика основних шкідливих газів

Діоксид вуглецю (CO₂) утворюється під час бродіння вуглеводної сировини, горіння палива або розкладу органічних речовин. Він безбарвний, не підтримує горіння, проте у високих концентраціях викликає запаморочення, задишку, подразнення слизових оболонок. Концентрація понад **60%** може призвести до миттєвої смерті. **ГДК CO₂ становить 0,5% (5000 ppm).**

Оксид вуглецю (CO) — один із найпоширеніших промислових і транспортних забруднювачів. Утворюється при неповному згорянні палива. Газ безбарвний, малопомітний, але високотоксичний, адже утворює з гемоглобіном стійку сполуку — **карбоксигемоглобін**, що блокує доставку кисню до тканин. Гранично допустима концентрація CO — **20 мг/м³.**

Діоксид сірки (SO₂) — безбарвний газ із різким запахом. Подразнює слизові оболонки очей і дихальних шляхів, може викликати дерматологічні ураження та запальні процеси в нирках. **ГДК SO₂ = 10 мг/м³.**

Пари етилового спирту (C₂H₅OH) відносяться до 4-го класу небезпеки. У високих концентраціях діють як наркотик, викликаючи спочатку збудження, а потім пригнічення центральної нервової системи. Тривалий вплив може спричинити ураження печінки та серцево-судинної системи. **ГДК = 1000 мг/м³.**

Методи контролю за вмістом шкідливих речовин

Контроль повітряного середовища здійснюють у зоні дихання працівників, з урахуванням місць потенційного виділення токсичних речовин.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 72 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Кількість проб і частота контролю визначаються санітарними нормами. Для речовин **I класу небезпеки** контроль має бути безперервним, для інших випадків — періодичним.

Існує три основні групи методів контролю:

1. **Індикаторні методи.** Засновані на використанні газоаналізаторів (типу УГ-1, УГ-2, ГХ-4), де визначення концентрації базується на зміні кольору реагенту. Такі методи прості у застосуванні, хоча й мають невисоку точність (похибка до 10%).
2. **Санітарно-хімічні методи.** Включають колориметричні, фотоколориметричні, хроматографічні та нефелометричні аналізи. Використовуються у лабораторних умовах, забезпечуючи високу точність вимірювань.
3. **Автоматизовані методи.** Передбачають безперервний моніторинг за допомогою приладів, які реагують на зміну електричних параметрів при хімічній взаємодії газів (наприклад, ФЛ-5501, ПГФ-1, КУ-1.3, ФК-560, ГПК-1).

Усього розроблено понад 200 методик визначення шкідливих речовин у повітрі, які застосовуються залежно від мети контролю, класу небезпеки та технологічних умов виробництва.

Одним із найпоширеніших шкідливих чинників у виробничому середовищі є **пил**, який формується внаслідок механічної обробки сировини, транспортування сипких матеріалів, зважування, змішування, сушіння, просіювання тощо. У природних умовах концентрація пилових частинок у повітрі зазвичай не перевищує **0,2 мг/м³**, тоді як на виробництві вона може досягати **100 мг/м³ і більше**. Гранично допустима концентрація пилу для нейтральних речовин становить **10 мг/м³**.

Пил являє собою дрібнодисперсну суміш твердих частинок, що утворюються внаслідок механічного подрібнення або конденсації парів. Він може бути **органічного, неорганічного або змішаного походження**.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 73 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Частинки пилу утримуються у повітрі за рахунок турбулентних потоків і повільно осідають, створюючи ризик для здоров'я людини.

Класифікація пилу

Залежно від джерела утворення та властивостей, пил поділяють:

- **За походженням:**
 - *органічний* (борошняний, деревний, целюлозний, тваринного походження);
 - *неорганічний* (цементний, кварцовий, вугільний, металічний);
 - *змішаний* (комбінований склад різних фракцій).
- **За способом утворення:**
 - *дезінтеграційний* — виникає при руйнуванні матеріалів;
 - *димовий* — результат згоряння органічних речовин;
 - *конденсаційний* — формується при охолодженні парів.
- **За токсичністю:**
 - *нейтральний пил* (не має токсичної дії);
 - *токсичний пил* (містить отруйні або радіоактивні домішки).

Найбільш небезпечними є частинки діаметром менше **0,015 мкм**, оскільки вони проникають глибоко в легені, осідають у альвеолах і практично не виводяться з організму. Тривале вдихання пилу призводить до **пневмоконіозів**, серед яких найпоширенішим є **силікоз**, викликаний вдиханням частинок діоксиду кремнію (SiO₂).

Органічний пил (зерновий, борошняний, тютюновий тощо) може стати причиною **алергічних реакцій, бронхітів, астми**, а пил, що містить важкі метали (свинець, миш'як, марганець), — має **токсико-хімічну дію**.

Вплив запиленості на стан організму

Пил чинить комбінований вплив на людину:

- **механічний** — подразнення слизових оболонок очей, носоглотки, трахеї;
- **токсичний** — при всмоктуванні у кров викликає інтоксикацію;

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 74 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

- **алергенний** — змінює реактивність організму;
- **фіброгенний** — сприяє утворенню сполучної тканини в легенях.

Інтенсивність дихання та мікрокліматичні умови значно впливають на сприйняття пилу. Під час фізичної роботи організм засвоює більший об'єм повітря, а отже — і більшу кількість шкідливих речовин. Висока температура й вологість посилюють токсичну дію пилу та газів.

Методи визначення запиленості повітря

Контроль запиленості повітря проводиться у місцях можливого виділення пилу та в зоні дихання працівників. Вибір методів контролю залежить від типу пилу, його розміру, концентрації та технологічних особливостей виробництва.

Основними методами вимірювання є:

1. Гравіметричний (ваговий) метод.

Найпоширеніший у санітарній практиці. Передбачає відбір певного об'єму повітря через фільтр, на якому осідають пилові частинки. Після висушування й зважування фільтра визначають масу пилу на одиницю об'єму повітря.

2. Мікроскопічний (розрахунковий) метод.

Використовується для оцінки кількості та розміру частинок під мікроскопом. Дозволяє отримати дані про дисперсний склад пилу.

3. Фотометричний метод.

Ґрунтується на вимірюванні інтенсивності світлорозсіювання у повітрі. Дає змогу швидко визначати запиленість, проте вимагає калібрування приладів.

Залежно від характеру виробництва контроль може бути періодичним або безперервним. У зонах підвищеної небезпеки (наявність речовин I класу токсичності) обов'язково впроваджується автоматичний моніторинг.

Засоби очищення повітря від пилу

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 75 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Для зниження запиленості повітря застосовують комплекс інженерно-технічних та організаційних заходів, серед яких:

- **місцева витяжна вентиляція** — відсмоктування запиленого повітря безпосередньо від джерела утворення пилу;
- **зволоження повітря та матеріалів** — запобігає розповсюдженню пилу;
- **герметизація технологічного обладнання;**
- **пилоосаджувальні та фільтрувальні системи.**

Серед сучасних засобів очищення найефективнішими є фільтри тонкого очищення — зокрема аналітичні фільтри типу АФА, створені на основі ультратонких полімерних волокон (фільтр Петрянова). Такі системи здатні затримувати частинки розміром до 0,1 мкм.

Крім фільтраційних систем, широко застосовуються електростатичні осаджувачі, циклонні установки, вентилятори з осаджувальними камерами, а також водяні скрубери, які одночасно очищують і зволожують повітря.

Методи контролю газових домішок у повітрі

Для контролю концентрації шкідливих газів у робочій зоні використовуються три основні групи методів:

1. **Індикаторні методи** — базуються на реакції між газом і хімічним реагентом, що змінює колір. Вимірювання виконуються за допомогою приладів типу УГ-1, УГ-2, ГХ-4, які дозволяють отримати експресні результати.
2. **Санітарно-хімічні методи** — включають **колориметрію, хроматографію, фотоколориметрію**. Вони забезпечують високу точність, але вимагають спеціального лабораторного обладнання.
3. **Автоматизовані методи** — забезпечують безперервний моніторинг концентрацій у повітрі. До них належать прилади **ФЛ-5501, ПГФ-1, КУ-1.3, ФК-560, ФК-450, ГПК-1** тощо. Вони працюють на принципі зміни електричних параметрів середовища при взаємодії газу з реагентом.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 76 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

ВИСНОВКИ

1. Покращення фізико-механічних характеристик поверхневого шару

Покращення мікрорельєфу та фізико-механічних властивостей поверхневого шару металевих деталей досягається завдяки впровадженню інноваційної технології комбінованої лазерно-ультразвукової зміцнювально-оздоблювальної обробки. Застосування цієї технології дозволяє забезпечити стабільну глибину зміцнення без локального перегріву чи оплавлення, навіть на складнопрофільованих ділянках деталі. Такий результат досягається завдяки автоматизованій системі контролю температури, яка підтримує постійний тепловий режим у зоні впливу скануючого лазерного променя. Наступне ультразвукове деформаційне зміцнення реалізується за допомогою багатобойкових наконечників, що працюють відповідно до заздалегідь встановлених функціональних залежностей технологічних параметрів.

2. Моделювання термокінетичних і динамічних процесів

Прогнозування температурного діапазону нагріву, структури та мікротвердості оброблюваного шару здійснюється з використанням термокінетичної моделі лазерного зміцнення. Ця модель враховує критичні температури фазових перетворень, об'ємні частки структурних компонентів та їх мікротвердість. Крім того, динамічна модель ультразвукової обробки дозволяє встановити оптимальні режими УЗО, зокрема параметри деформації та енергетичні характеристики дії одно- та багатобойкових наконечників.

3. Експериментальні методики дослідження поверхневих характеристик

Комплексне вивчення змін мікрогеометрії та фізико-механічних властивостей поверхневого шару, включаючи зносостійкість при квазістатичних і динамічних навантаженнях, реалізується завдяки розробленим методикам експериментальних досліджень. Ці методики

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 77 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

базуються на сучасному обладнанні, математичному плануванні експерименту та використанні спеціалізованих лазерних і ультразвукових установок.

4. Оптимізація технологічних режимів

Максимальне зміцнення поверхневого шару, досягнення високої твердості та залишкових стискуючих напружень, а також мінімізація параметрів мікрорельєфу досягаються за рахунок оптимізації технологічних режимів комбінованої ЛО+УЗО для сталей 45 та Х12МФ. Зокрема, ефективними виявилися наступні параметри: швидкість сканування — 1000 мм/с, ширина скануючої доріжки — 10 мм, температура нагрівання — 1300 °С для сталі 45 та 1340 °С для Х12МФ, швидкість переміщення зразка — 90 мм/хв, навантаження — 50 Н, амплітуда ультразвукових коливань — 18 мкм, тривалість УЗО — 60 с (сталь 45) і 120 с (сталь Х12МФ).

5. Результати покращення експлуатаційних властивостей

Результати досліджень свідчать про суттєве підвищення експлуатаційних характеристик: твердість поверхневого шару зросла у 3–4 рази, глибина зміцнення сягала 270–440 мкм, показники шорсткості Ra зменшилися у 2–4 рази. Залишкові стискуючі напруження у сталі Х12МФ зросли вдвічі порівняно лише з лазерною обробкою. Знос поверхні зменшився більш ніж удвічі для Х12МФ і в чотири рази для сталі 45, при одночасному зростанні корозійної стійкості оброблених поверхонь.

6. Параметри повторного лазерного впливу

Забезпечення рівномірності геометричних та мікромеханічних параметрів термозміцнених зон досягається шляхом встановлення оптимального коефіцієнта перекриття лазерних доріжок у межах 20–25%. Підтримання постійної температури в зоні дії скануючого променя реалізується за допомогою розробленого програмного забезпечення, що автоматизує процес лазерного термозміцнення великих за габаритами об'єктів.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 78 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

7. Алгоритм реалізації комбінованої обробки

Розроблений алгоритм визначення режимів комбінованої ЛО+УЗО обробки дозволяє обирати оптимальні параметри впливу з урахуванням заданих вимог до структури поверхневого шару (мікротвердість $H_{\mu} > 6,0$ ГПа, глибина зміцнення $h_z > 200$ мкм, шорсткість $Ra < 0,5$ мкм). Алгоритм передбачає інтеграцію температурно-швидкісних параметрів ЛО та енергетичних характеристик УЗО.

8. Підвищення продуктивності та ефективності

Завдяки використанню багатобойкових деформуючих наконечників з дискретною ультразвуковою дією та впровадженню керованих програм для верстатів з ЧПК вдалося досягти підвищення продуктивності обробки великогабаритних деталей у 3–4 рази. Запропонований технологічний регламент комбінованої обробки також сприяв покращенню зносостійкості та якості поверхонь.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 79 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лесик Д. А., Джемелинський В. В., Мартінес С. та ін. Вплив лазерного зміцнення на особливості зони зміцнення та твердість поверхні сталі AISI D2 // *Механіка та сучасні технології*. – 2022. – Т. 89, № 5. – С. 45–55.
2. Lesyk D. A., Dzhemelinskyi V. V., Mordyuk V. M. та ін. Покращення якості поверхні сталевих деталей шляхом комбінованої лазерно-ультразвукової обробки // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2023. – № 2/1 (122). – С. 6–16.
3. Lesyk D. A., Mordyuk V. M., Alnusirat W. та ін. Ультразвукова обробка поверхні сталі AISI 1045 після лазерного гартування з використанням волоконного лазера // *Український фізико-математичний журнал*. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 39–49.
4. Мажейка А. І., Чайковський О. Б., Аль-Шара М. М., Лутай А. М. Лазерне термомодеформаційне зміцнення деталей сільськогосподарських машин // *Наукові праці КНТУ*. – 2022. – № 12. – С. 115–121.
5. Ковальчук Ю. О., Лісовий І. О. Лазерне зміцнення деталей автомобільного транспорту в АПК // *Наукові доповіді НУБіП України*. – 2020. – № 4. – С. 98–104.
6. Ковальчук Ю. О., Дідур В. В., Кравченко В. В. Підвищення зносостійкості сталі 65Г методом лазерного зміцнення // *Вісник КНТУ*. – 2020. – № 5. – С. 102–108.
7. Головка Л. Ф., Мажейка О. Й., Вурсіченко Ю. В., Аль-Шара М. М. Обладнання для лазерного поверхневого зміцнення деталей : пат. 144276 Україна. МПК В23К 26/00. № u202005489 ; заявл. 16.09.2020 ; опубл. 25.11.2020. – Бюл. № 47.
8. Ключников Ю. В., Лутай А. М., Романов Б. С., Бистрікер Ф. Е. Лазерне формоутворення конструкцій із зміцнених алюмінієвих сплавів //

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 80 |

- Механотроніка. Автоматизація. Управління.* – 2020. – № 3 (31). – С. 51–56.
9. Чухліб С. В. Технологія зміцнення сталевих деталей лазерною термомеханічною обробкою : дипломна робота. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 70 с.
 10. Ковальчук Ю. О., Лісовий І. О. Лазерне зміцнення інструментів та деталей обладнання ремонтних майстерень в АПК // *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* – 2022. – № 3. – С. 71–75.
 11. Yu Z., Lv Y., Wang L., Lu J. Recent Advances in Laser Surface Hardening: Techniques, Modeling Approaches, and Industrial Applications // *Crystals.* – 2024. – Vol. 14, No. 8. – P. 726.
 12. Wang W., Li C., Zhang Z. et al. Surface Properties of Medium-Entropy Alloy Coatings Prepared through a Combined Process of Laser Cladding and Ultrasonic Burnishing // *Materials.* – 2022. – Vol. 15, No. 17. – P. 6123.
 13. Yu H., Zhang Q., Chen J. Ultrasonic-Induced Grain Refinement in Laser Cladding Nickel-Based Superalloy Reinforced by WC Particles // *Coatings.* – 2023. – Vol. 13, No. 1. – P. 151.
 14. Abbas H. A., Mahdi M. M. Wear Resistance Improvement of Alloy Steel Using Laser Surface Treatment // *Iraqi Journal of Industrial Research.* – 2023. – Vol. 10, No. 1. – P. 78–85.
 15. Zhao Y., Tang W., Xue X. Mechanisms and Characteristics of Ultrasonic Impact Treatment on Steel Surface // *Advanced Materials Research.* – 2014. – Vol. 834–836. – P. 649–653.
 16. Zhang C., Liu Q., Guo Y. et al. The Effects of Ultrasonic Impact Modification on the Surface Quality of 20CrNiMo Carburized Steel // *Coatings.* – 2023. – Vol. 13, No. 9. – P. 1594.
 17. Lv Y., Zhang X., Yu H., Zhang P. Fatigue Life Improvement of the High Strength Steel Welded Joints by Ultrasonic Impact Peening // *Metals.* – 2019. – Vol. 9, No. 6. – P. 619.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 81 |

18. Kumar V., Saini D., Arora H. Effect of Ultrasonic Surface Impact on the Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V Subject to Simulated Body Fluid // *Metals*. – 2017. – Vol. 7, No. 10. – P. 440.
19. Zhang X., Li X., Wang L. Improving the Surface Integrity and Tribological Behavior of a High-Temperature Friction Surface via the Synergy of Laser Cladding and Ultrasonic Burnishing // *Lubricants*. – 2023. – Vol. 11, No. 9. – P. 379.
20. Zajdel P., Pawłowski Ł., Nowak M. Effect of Ultrasonic Cleaning after Laser Texturizing of Surface of AISI 316L Steel on the Degree of Wetting and Corrosion Resistance // *Coatings*. – 2023. – Vol. 13, No. 12. – P.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | КРММТВА 25. 24340. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 82 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |