

КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

УДК 621.373.826

ГОЛОВКО

Леонід Федорович

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ПОВЕРХНЕВОГО
ШАРУ ПРИ ЛАЗЕРНІЙ ЗМІЦНЮЮЧІЙ ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ

Спеціальність: 05.03.07 – Складання і
технологія лазерної обробки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

КИЇВ 1994

АВ 30.196

Робота виконана в Київському політехнічному інституті на кафедрі лазерної технології та матеріалознавства.

Науковий консультант: Заслужений діяч науки та техніки України, академік АН України, доктор технічних наук, професор КОВАЛЕНКО В. С.

Офіційні опоненти:

1. Доктор технічних наук, професор ГРИГОР'ЯНЦ А. Г.
2. Доктор технічних наук, професор БІЛОШКІЙ О. В.
3. Доктор технічних наук, професор Д'ЯЧЕНКО В. С.

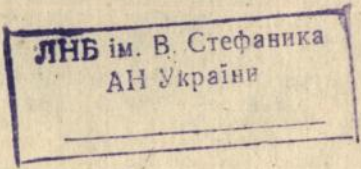
Провідна організація - науково-виробниче об'єднання "Більшовик", м. Київ

Захист відбудеться 20 червня 1994 р. о 15.00 годині на засіданні спеціалізованої Ради Д.068.14.10 із присудження наукового ступеня доктора технічних наук Київського політехнічного інституту. Корпус 1, аудиторія 214.

Адреса: 252056, м. Київ, пр. Перемоги, 37

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського політехнічного інституту.

Автореферат розісланий 15 травня 1994 р.



Вчений секретар спеціалізованої Ради, доктор технічних наук, професор

РАВСЬКА Н. С.

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00777545 (Z)

AB - 30. 196

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність теми дослідження. Сучасний рівень розвитку техніки ставить підвищені вимоги до якості, надійності та довговічності деталей машин та інструментів. Одним із засобів рішення цієї проблеми є розробка та застосування високоефективних технологій поверхневої зміцнюючої обробки, яка базується на використанні концентрованих джерел енергії, в тому числі і лазерного випромінювання.

До теперішнього часу технологія лазерної поверхневої обробки, як у нас в країні, так і за кордоном, визначила себе, як ефективний засіб вирішення технічних задач промисловості, завдяки теоретичним та експериментальним дослідженням, виконаних такими провідними вченими, як Л. Й. Міркін, О. О. Углов, О. Г. Григор'янець, В. С. Коваленко, С. О. Астапчук, В. Д. Садовський, А. М. Сафонов, В. С. Д'яченко, М. В. Спірідонов та іншими дослідниками. Однак широке застосування цієї технології стримується рядом обставин. В першу чергу відсутністю систематизованих даних про зв'язки параметрів фізико-хімічних процесів, з одного боку, з характеристиками лазерного променя, умов опромінювання та властивостей об'єкту обробки, з другого - з якісними та експлуатаційними характеристиками виробів, що відбивається на недостатній відтворюваності результатів технологічних процесів, відсутності можливості прогнозувати наслідки застосування обробки при вирішенні задач виробництва, на можливості створення автоматизованих систем керування процесом.

Аналіз сучасного стану лазерної зміцнюючої технології показує необхідність розглянути процеси лазерної поверхневої обробки з єдиних позицій, розробити стратегію керування якісними характеристиками поверхневого шару матеріалів, узагальнити існуючі та отримати нові данні шляхом проведення теоретичних та експериментальних досліджень. Створені, таким чином, технологічні основи дозволять розробляти високоефективні, відтворювані технології лазерної обробки, що забезпечать підвищення вносостійкості, довговічності та надійності роботи деталей машин та інструментів і вирішити значну науково-технічну проблему, яка має важливе народно-господарче значення.

Метою роботи є підвищення якості і надійності роботи деталей машин та інструментів за рахунок лазерної зміцнюючої технології, розробленої на базі створених технологічних основ керування властивостями поверхневого шару матеріалів.

Для реалізації мети вирішено ряд питань з яких н. захист ви-

носяться:

1. Розроблена технологічна система для реалізації лазерної поверхневої обробки з науково-обґрунтованими причинно-наслідковими зв'язками.

2. Встановлені закономірності змінювання основних факторів процесу лазерної обробки, їх зв'язок з фізико-хімічними процесами в поверхневому шарі, розроблені методики та засоби їх виміру і контролю, отримані відповідні статистичні моделі.

3. Результати вивчення теплового стану виробів з обмеженими умовами тепловідводу при лазерному нагріві, постановка задачі, шляхи її вирішення.

4. Експериментальні дані по вивченню структурно-фазових перетворень у сталях та сплавах, явищ масопереносу при лазерній обробці, їх механізм.

5. Результати вивчення технологічних закономірностей процесу, їх математичні моделі, методологія визначення режимів, технологічних схем, вибору легуючих компонентів при лазерній поверхневій обробці.

6. Експериментальні дані досліджень впливу лазерної обробки на напружений стан поверхневого шару, зносостійкість, втомну міцність, теплостійкість та корозійну стійкість.

7. Алгоритм керування якістю поверхневого шару матеріалів з можливістю самонавчання при лазерній зміцнюючій обробці.

8. Розроблені засоби лазерної поверхневої обробки та технологічне обладнання, результати їх впровадження в промисловість.

Наукові положення розроблені дисертантом і новизна теми:

- вперше лазерна поверхнева зміцнююча обробка подана, як технологічна система, що дозволяє на основі встановлених взаємозв'язків між технологічними факторами і параметрами фізико-хімічних процесів прогнозувати та керувати якісними характеристиками поверхневого шару і експлуатаційними показниками виробів, отримати гарантований ефект зміцнення матеріалу,

- вперше запропоновано ефективний метод визначення поглинаючої здібності опромінюваної поверхні, який застосовано в системі керування процесом, встановлені залежності поглинаючої здібності від шорсткості поверхні, режимів опромінювання, властивостей технологічних покриттів; розроблені нові покриття;

- вперше встановлені закономірності змінювання теплового стану виробів типу "тонка платівка" та клинцеподібної форми, під дією лазерного випромінювання, визначені умови обробки, що забезпечують отримання зміцненого шару з гарантованою якістю і розмірами; зап-

ропонована методика визначення оптимальних режимів нагріву;

- встановлені закономірності формування мікроструктури і явищ масопереносу у вуглецевих, високолегованих сталях і сплавах; визначені оптимальні структури, умови їх отримання; виявлена можливість керування перерозподілом легуючих елементів при лазерному опромінюванні; розроблена методологія визначення доцільних технологічних схем і режимів лазерного зміцнення і мікролегування;

- встановлено вплив лазерного випромінювання на напружений стан поверхневого шару в сталях і титанових сплавах, на зносостійкість, зокрема при високих температурах, на втомну міцність, теплостійкість; запропоновано механізм руйнування зміцнених матеріалів при різних видах навантаження; розроблено і досліджено засіб лазерного термо-деформаційного зміцнення;

- вперше на одержаній базі даних, та розроблених математичних моделях, що являють собою технологічні основи, створено алгоритм керування з можливістю самонавчання, якісними характеристиками поверхневого шару матеріалів, тобто процесом лазерного зміцнення;

- розроблені оригінальні, на рівні винаходів, засоби лазерної обробки сталей і чавунів, пристрої для вимірювання потужності випромінювання та її розподіду у пучку, швидкодіючи, зі сталюю часу $10^{-4} \dots 10^{-5}$ с, прилади для вимірювання поглинаючої здібності та температури безпосередньо в зоні лазерного нагріву, які не мають аналогів у світі; оригінальні лазерні технологічні комплекси.

Можливості використання результатів роботи на практиці:

- при створенні автоматизованої системи керування процесом лазерної зміцнюючої обробки;

- при розробці і впровадженні технологічних процесів лазерної термічної обробки і мікролегування деталей і інструментів, виготовлених із сталей і сплавів, у промисловості;

- при розробці і проектуванні лазерного технологічного обладнання, засобів вимірювання і контролю параметрів технологічних процесів;

- використання наукових результатів при удосконаленні процесів лазерної зміцнюючої обробки за рахунок застосування додаткових джерел енергії: плазми, електричної дуги, ультразвуку, використання механічних зусиль та ін;

- при організації спеціалізованих на лазерні обробці виробництв, які, виходячи в важкого економічного стану України, доцільно створювати зусиллями певного числа власників які економічно зацікавлені в лазерній технології, але не мають можливості придбати та утримувати відповідне обладнання;

- в навчальному процесі студентів механічних спеціальностей по курсах "Технологія лазерної обробки", "Електрофізико-хімічні методи обробки", "Технологія машинобудування" та ін.; в практичній діяльності аспірантів, наукових співробітників різноманітних установ.

Реалізація роботи. На базі отриманих у роботі результатів розроблені і впроваджені у виробництво технологічні процеси лазерного зміцнення і відповідне обладнання шляхом створення дільниць лазерної обробки у ВО "Кіровоград", м. Бровари /двохпроменевий технологічний автоматизований та роботизований лазерний комплекс для зміцнення різбових поверхонь муфто-замкового з'єднання та паф шаронок/, ВО "Більшовик", м. Київ /два комплекси для зміцнення направляючих балок та інших деталей машин хімічного машинобудування/, ВО "Завод Малишева", м. Харків /технологія зміцнення штампового інструменту, гільз дизелів/, ВО "Арсенал", м. Київ /лазерне зміцнення інструментів до оброблюючих центрів/, та інших - всього на 10 підприємствах. Виконано один міжнародний контракт з фірмою Вісхард, м. Вроцлав /Польща/, відповідно якому створений і запущений у виробництво автоматизований лазерний комплекс та технологія зміцнення зубчастих колес масляних насосів. Отримане підвищення зносостійкості деталей та інструментів /1,5-4 рази/, зниження трудомісткості виготовлення деталей /2-3 рази/, заміна матеріалів на більш дешеві дозволили отримати економічний ефект понад 2 млн. крб. /в цінах до 1991 р./ . Результати роботи використовуються у навчальному процесі Київського політехнічного інституту.

Апробація роботи. Про основні положення роботи доповідалося на науково-технічних конференціях, семінарах, симпозіумах, найважливіші з яких: міжнародні конференції "ICEM"-9, м. Нагоя, Японія, 1989 р.; "АУПРО-84", м. КарлМаркс-Штадт, ГДР, 1984 р.; "Використання лазерного променя", м. Жиліна, Чехословаччина, 1988 р.; "Обробка матеріалів потужними лазерами" м. Дрезден, 1990р.; "Електронна і лазерна обробка", м. Рено, Невада, США, 1993 р.; "ICALEO-93" м. Орландо, Флорида, США, 1993 р.; "Лазерна обробка матеріалів", м. Чань-Чунь, Китай, 1994 р.; Всесоюзні науково-технічні конференції - "Використання ОКГ в сучасній техніці" м. Ленінград, 1975 р.; "Проблеми створення та впровадження інструменту з низьким вмістом вольфраму" м. Тбілісі, 1977 р.; "Застосування лазерів-84" м. Ленінград, 1984 р.; "Застосування лазерів у приладобудуванні та медицині" м. Москва, 1979 р.; "Створення та використання лазерної техніки та технології" м. Київ, 1985 р.; "Підвищення надійності та довговічності матеріалів" м. Москва, 1988р. "Нові розробки та досвід впровадження ла-

зерної техніки" м. Ужгород, 1990 р., "Застосування лазерів в технології", 1991 р. м. Київ; "Легування, структура та властивості зміцнених сталей" м. Київ, 1993 р. "Технологічні аспекти механіки деформованого твердого тіла" м. Київ, ІПМ, 1993 р. та інші.

Публікації. По темі дисертаційної роботи опубліковано 102 наукові праці, у тому числі 8 монографій, три з яких перевидані у США, Китаї та Болгарії, 18 винаходів.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, дев'яти розділів; загальних висновків та додатку, викладених на 292 сторінках машинописного тексту, вміщує 112 рисунків, 22 таблиці.

ЗМІСТ РОБОТИ

На початку роботи обґрунтовується актуальність розглянутих у дисертації питань, сформульовано завдання досліджень, наукову новизну, подано коротку анотацію роботи. В літературному огляді проведено аналіз сучасного стану лазерної поверхневої обробки матеріалів. Показано, що на сьогоднішній день досліджені різні аспекти лазерної зміцнюючої обробки, отримані основопологаючі результати стосовно оцінки характеристик теплового стану матеріалів, обумовлених ними структурно-фазових перетворень, особливостей впливу лазерної обробки на фізико-механічні та експлуатаційні характеристики матеріалів. Відзначається, що високі швидкості нагріву та охолодження обумовлюють аномальне масоперенесення, формування специфічної структури, яка характеризується дуже високою дисперсністю, підвищеною кількістю дефектів, особливим перерозподілом легуючих елементів. Однак, не зважаючи на великий обсяг досліджень, позитивні результати промислових випробувань, існуючих результатів не вистачає для створення надійної, відтворюваної технології, комп'ютеризації її розробки. Недостатньо вирішені питання, пов'язані з вимірюванням та контролем основних факторів, що впливають на фізико-хімічні процеси (потужність випромінювання та її розподіл на поверхні обробки, розмір п'ятна фокусування, поглинаючу здібність матеріалу та ін.), дані про закономірності їх змінювання у процесі обробки; відсутні відповідні методики, ефективні прилади та пристрої, швидкодіючі засоби і пристрої для вимірювання температури поверхні безпосередньо у зоні лазерного нагріву. Не вистачає даних, які б відображали особливості фізико-хімічних процесів, які протікають в матеріалах при різних режимах опромінювання; теплових процесів у виробках з обмеженими умовами

відведення тепла, зокрема при наявності технологічних покриттів; особливості структурно-фазових перетворень у вуглецевих, високолегованих сталях, спеціальних та титанових сплавах. Потребують удосконалення методики визначення режимів лазерної зміцнюючої обробки з урахуванням її впливу на експлуатаційні характеристики матеріалів і виготовлених із них виробів.

На підставі проведеного літературного огляду були сформульовані наступні завдання досліджень:

- Виконати аналіз факторів, що впливають на процес зміцнення, створити технологічну систему, науково обґрунтувати її зв'язки, і таким чином, розробити метод відтвореної лазерної зміцнюючої поверхневої обробки з гарантованим рівнем якості.

- Вивчити закономірності змінювання основних факторів процесу, розробити методики і засоби їх вимірювання та контролю, отримати відповідні математичні моделі.

- Сформулювати задачу вивчення закономірностей змінювання характеристик теплового стану виробів з обмеженими умовами тепловідводу типу "клин", "тонка платівка", в тому числі, при наявності технологічних покриттів, розробити математичні моделі за допомогою яких визначити лімітуючі параметри та їх критичні значення, які обмежують область режимів, що забезпечують отримання необхідної якості поверхневого шару матеріалу.

- Дослідити особливості структурно-фазових перетворень в сталях і сплавах, явища масоперенесення при лазерній термічній обробці і поверхневого мікролегування, сформулювати їх механізм.

- Встановити технологічні закономірності лазерної поверхневої обробки, отримати їх статистичні моделі, розробити методики визначення режимів та технологічних схем.

- Дослідити вплив лазерної обробки на фізико-механічні та експлуатаційні характеристики матеріалів, створити відповідну базу даних.

- Розробити алгоритм керування якісними характеристиками поверхневого шару при лазерній зміцнюючій обробці.

- Розробити засоби лазерної поверхневої обробки, необхідне технологічне обладнання, впровадити їх у промисловість.

Експериментальні дослідження проводились на спеціально обладнаних стендах, створених на базі потужних CO₂ лазерів "Латус-31" і "Плутон" та 4-к координатного маніпулятору M125, а також твердотільних лазерів Квант-16, Квант-18, ЛН-102 зі столами, оснащеними системами ЧПК. В дослідженнях додатково використовувались лазери ЛН-702, ЛТ1-Б, SPECTRA PHYSICS-973 та інші. Для контролю по-

тужності лазерного випромінювання застосовувались вимірвачі типу РСІ-602, ТІ-4, ІМО-2, та спеціально розроблені. Металографічні та металофізичні дослідження проведено на оптичних мікроскопах "Неофот 21", ММР-2Р", ПМТ-3, рентгенівському дифрактометрі "Дрон-3М", електронному мікроскопі фірми Philips ISM-35, електронних мікроаналізаторах "Super Probbe 733" фірми JEOL, "Camebax". Залишкові напруження вивчалися по методу Н. Н. Давиденкова, та рентгенівським $\sin^2 \psi$ методом.

Механічні властивості матеріалів вивчалися на машинах тертя ЛВК-2, СМЦ-2, спеціальних машинах торцевого тертя в умовах високих температур; установці для випробувань на втомну міцність в умовах дії агресивного середовища та інші. Дослідження виконувались на армко-залізі, вуглецевих сталях - сталь 10, сталь 20, сталь 30, сталь 45, У8, У10, У12, легованих - 40Х; 65Г; 20Х13; 40Х13; 40ХН; 30ХГСА; 12ХНЗА; 14ХНЗМА; ХВГ; 9ХС; ШХ15; ХВГ; 9ХС; Р6М5; Р18; Х12М; і спеціальній сталі ЕІ 961Ш, титанових сплавах - ВТ3-1; ВТ-9; ВТ-22, сплавах на основі нікелю ЖСБК, ВЖЛ.

Всесторонній аналіз процесів поверхневої лазерної обробки показав доцільність розглянути її як технологічну систему і встановити існуючі в ній основні зв'язки. В її основу покладено фізико-хімічні процеси, протікаючі в поверхневому шарі матеріалу в умовах лазерного опромінювання. Характер цих процесів визначається чотирма параметрами - температурою (T), швидкістю (V_n), часом нагріву (t_n), та швидкістю охолодження (Vo_{chl}). Вони з одного боку знаходяться у прямому зв'язку з факторами системи, які утворюють три групи (1 група - характеристики лазерного променя, як інструменту, 2- умови обробки; 3- властивості оброблюваного матеріалу), з другого - визначають стан поверхневого шару матеріалу (структуру, твердість, залишкові напруження та ін.), і експлуатаційні характеристики виробів (зносостійкість, корозійну стійкість, утомлену міцність, та ін.), рис. 1. Всі фактори, які впливають на процес зміцнення треба обов'язково враховувати при вивченні, математичному моделюванні та розробці технологічних процесів. Але для керування процесом можна використовувати тільки деякі з них, зокрема: потужність або енергію випромінювання P , поглинаючу здібність, A ; розподіл потужності $P(x, y)$; площу і форму п'ятна фокусування, d_f ; час дії випромінювання, t ; початкову температуру матеріалу T_0 . Відтворення результатів технологічних процесів по суті визначається наявністю та ступенем досконалості пристроїв, приладів та методик, які забезпечують вимірювання, контроль та стабілізацію керуваних факторів. Для безперервного контролю потужності випромінювання розроблено швид-

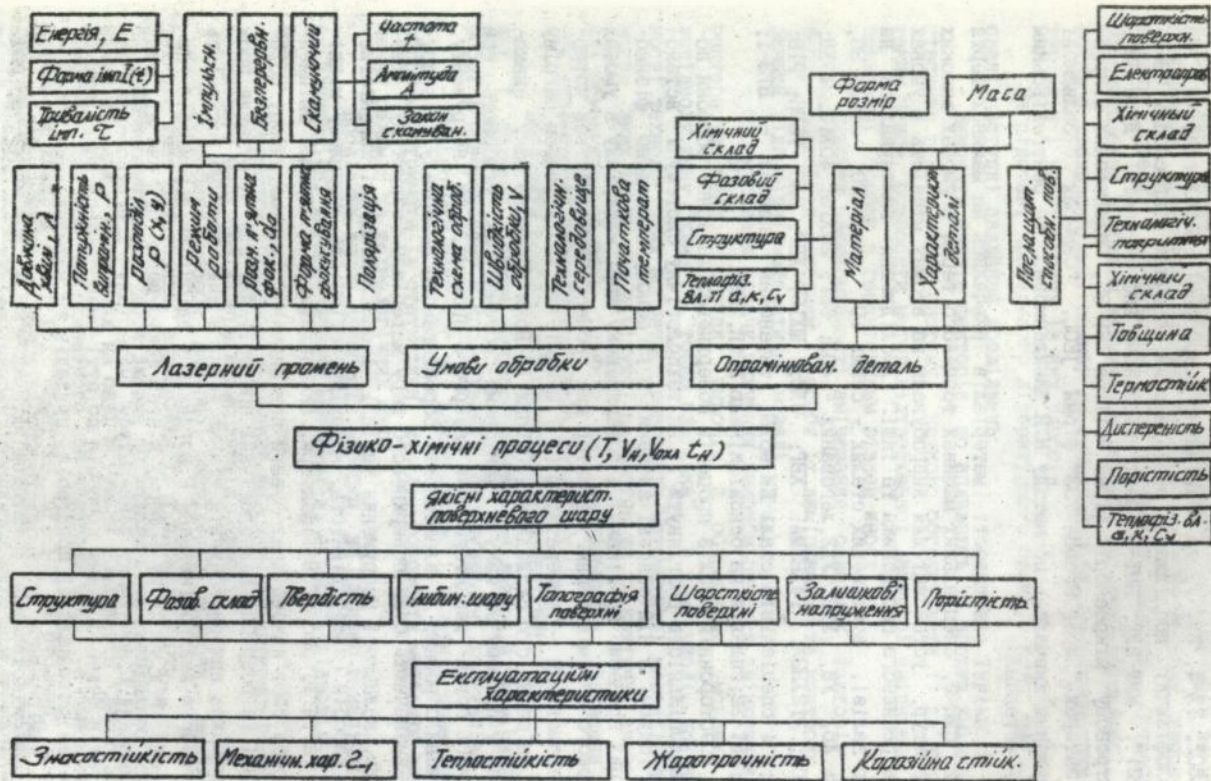


Рис. 1. Лазерна поверхнева зміцнююча обробка, як технологічна система.

кодуючий (стала часу 10^{-4}) та компактний вимірювач прохідного типу, працюючий на частковому поглинанні випромінювання при його проходженні через відповідне середовище (для $\lambda = 10,6$ мкм - суміш газів CO_2 і Ar) (А.С.1167836). Для контролю і вимірювання розподілу інтенсивності випромінювання (РІВ) безпосередньо в процесі технологічної операції розроблено пристрій, принцип дії якого базується на скануванні лазерного променя пересуваючоюся металевою стрічкою, яка рухається, з системою отворів (діафрагм), розмішених під кутом 45° до напрямку руху, та хрестоподібно розташованих під нею двох піроелектричних лінійок. Для визначення розмірів п'ятна фокусування та РІВ по ньому на поверхні обробки, розроблена методика, відповідно з якою пучок зондується діафрагмою, інформація, що поступе, записується у пам'ять комп'ютеру. Обробка результатів вимірювання дозволила отримати статистичні моделі, які зв'язують розмір п'ятна фокусування (d_0) з фокусною відстанню (F) фокуруючої лінзи та ступенем розфокусування (ΔF). Для випромінювання твердотільного лазера: $d_0 = 6,41 - 0,12F + 0,28\Delta F + 0,000676F^2 - 0,0015F\Delta F$; для багатомодового випромінювання потужних CO_2 лазерів зі стійким резонатором створена база даних. Дослідження вихідних пучків CO_2 лазерів, а також сфокусованих за допомогою сферичних лінз та дзеркал виявили, що характер РІВ у вихідному пучку з часом змінюється незначно, хоча і спостерігаються деякі флуктуації поперечних мод вищого порядку. Зміщення максимуму інтенсивності відносно геометричного центру пучку становить 4-6% його діаметру. Фокусуєчі системи зі сферичними лінзами практично не змінюють характер РІВ і він може бути описаний стандартною функцією. Поперечний перетин сфокусованого пучку, виміряний в площині I_{max}/e^2 має форму кола або еліпсу, що визначається якістю виготовлення лінз і точністю її центровки відносно променя. Фокусуєча система зі сферичним дзеркалом змінює закон РІВ вихідного пучку, зміщуючи максимум інтенсивності до краю п'ятна фокусування. Допустима нерівномірність РІВ для поверхневої обробки забезпечується при значеннях $\Delta F = \pm(10-15\%)F$. Змінюючи кут падіння променя на дзеркало і його центровку відносно осі можна змінювати розподіл інтенсивності. РІВ в цьому випадку не можна описати стандартною функцією, а тому, при математичному моделюванні, його треба задавати по точках. Максимальна щільність потужності визначається в цьому випадку як

$$W_{\text{Pmax}} = (P \cdot I_{\text{max}} \cdot n) / (\pi r_0^2 \cdot \sum_{i=1}^{i=n} I_i)$$

де I_{max} - виміряне max значення інтенсивності; I_i - значення інтенсивності в i -й точці п'ятна; r_0 - радіус п'ятна фокусування; P - потужність випромінювання; n - кількість точок вимірювання.

Наступним керуючим параметром процесу є поглинаюча здібність. Для її вимірювання вперше в світі розроблено швидкодіючі (стала часу 10^{-4} - 10^{-5} с) пристрої, побудовані на базі інтегральної та секціонованої піроелектричних напівсфер, які розташовуються концентрично з сфокусованим лазерним променем над поверхнею обробки. Чутливість пристроїв в залежності від опору навантаження становить 0,04...2 В/Вт. Ці прилади по своїх характеристиках дозволяють використовувати їх не тільки при дослідженні поглинаючої здібності, але й в системах керування процесом.

Дослідження процесу поглинання лазерного випромінювання виявило, що поверхнева зміцнююча обробка без застосування поглинаючих технологічних покриттів недоцільна. Вивчався вплив покриттів на поглинаючу здібність матеріалів в умовах дії лазерного випромінювання з $\lambda=10,6$ мкм на сталях, які піддавались розповищенням у промисловості процесам фосфатації, оксидуванню, кадмуванню та іншим. Таким чином, на поверхні створювались тонкі додаткові шари із діелектричних матеріалів $Zn_3/PO_4/2$, $Mn_3/PO_4/2$, Fe_3O_4 , ZnO , Pb_2O_5 , Al_2O_3 , C і т.п., які мають різні властивості і товщини. Встановлено, що по ефективності досліджені покриття розташовуються у наступній послідовності: оксиди, фосфати, покриття на основі ZnO , алюмо-хромісті фосфати, графіт, кадмієве покриття. При лазерному зміцненні без оплавлення поверхні доцільно застосовувати оксидні покриття, з оплавленням - фосфатні, при зміцненні корозійностійких сталей - покриття на основі ZnO . Встановлено, що на поглинаючу здібність впливають технологічні параметри обробки: потужність випромінювання (P), швидкість (V), розмір п'ятна фокусування (d_0), товщина покриття (δ), кут падіння променя на поверхню обробки (α).

Для створення системи керування процесом лазерної обробки і розробки його алгоритму були отримані відповідні статистичні моделі: $A1 = -0,651 + 0,4d_0 + 0,34V - 0,037d_0 V - 0,024d_0^2$;

$$A2 = -0,226 + 0,097d_0 + 0,26V - 0,037d_0 V;$$

де $A1$ і $A2$ - поглинаюча здібність поверхні для покриттів $Mn_3(PO_4)_2$ і Fe_3O_4 відповідно. Фактори δ і d_0 , які використовувались у моделі спочатку, при рівні значності 0,05, виявились незначними. Отримані дані свідчать, що поглинаюча здібність може змінюватись від 50 до 90% в залежності від технологічних параметрів зміцнення, кут падіння доцільно вибирати виходячи з технологічних міркувань, товщину покриттів δ - з максимальної продуктивності. Для покриттів на основі ZnO рекомендована товщина становить 20-30 мкм.

Наступним етапом роботи являлось вивчення теплового стану виробів при лазерному опромінюванні, які мають обмежені умови теп-

ловідводу, типу "тонка платівка" і "кут", оскільки таку форму має значна частка реальних деталей та інструментів промисловості.

При рівних умовах опромінювання товщина виробу, як розмірний фактор може істотно впливати на його тепловий стан. Так, при лазерному нагріві масивних тіл і виробів, розміри яких по товщині істотно обмежені, розподіл температур в межах зони термічного впливу (ЗТВ) і в тому, і в другому випадку можуть бути практично однаковими. Відповідно, в межах ЗТВ ідентичними будуть і структурні зміни. Очевидно, така ситуація має місце не завжди і реалізується тільки при додержанні відповідних умов. Так, чим більша товщина виробу, тим в більшій мірі характеристики ЗТВ співпадають з відповідними параметрами у масивному тілі. Має інтерес, визначити граничні значення товщин, в разі перевищення яких, не має потреби урахувувати розміри виробів по товщині при розгляданні теплових та структурних змінювань в межах ЗТВ. Для зіставлення порівнюючих температурних полів використовувалась величина відносно похибки p .

$$p = (1 - T / T_k) 100\%, \quad (1)$$

де $T_{\infty} = t_{\infty} - t_0$, $T_k = t_k - t_0$, t_0 - початкова температура тіла, t_{∞} , t_k - температура напівбезмежного тіла і виробу обмеженої, кінцевої товщини.

Задаваючись рівнем відносно похибки p і визначивши значення T_{∞} і T_k рівняння (1) вирішувалось відносно Δz_p , яка входить у вираз T_k і, таким чином, оцінювалось її значення для різних умов лазерного нагріву. Величина p є функцією часу і координат. З підвищенням часу вона росте і досягає максимального значення в квазістаціонарному режимі. Для граничного стану процесу розподіл температури у напівбезмежному масиві при Гаусовому розподілі теплового потоку можна подати як

$$T_{\infty} = t_c \exp[-2\sqrt{np} \cos \varphi] \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{d\omega}{1+\omega^2} \exp\left[-\frac{m}{\omega^2} - \frac{n}{1+\omega^2} - \rho(1+\omega^2)\right], \quad (2)$$

де $n = k \cdot r^2$; $\rho = k (V \cdot T_c)^2$; $\omega^2 = \tau / \tau_0$; $m = k \cdot z^2$; t_c - гранична температура центральної точки нерухомого джерела з нормальним розподілом; $t_c = P \cdot A / (2 \cdot k) \cdot \sqrt{k/\pi}$, P - потужність лазерного випромінювання, A - поглинаюча здібність опромінюваної поверхні; $k = 1/r_0^2$ - коефіцієнт зосередження; r_0 - радіус плями нагріву; r - плоский радіус-вектор: $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; x, y, z - координати; φ - кут між плоским радіусом вектором r і додатньою напівосью Ox ; τ - час; τ_0 - стала часу, $\tau_0 = 1/4ak$; K, a - коефіцієнти теплопровідності і температуропровідності матеріалу відповідно, V - швидкість руху теплового джерела.

Для квазістаціонарного режиму температура плоского шару може

бути визначена з залежності

$$T_{\kappa} = t_c \exp[-2\sqrt{np} \omega \delta \varphi] \frac{2}{\pi} \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \int_0^{\infty} \frac{d\omega}{1+\omega^2} \exp\left[-\frac{m_i}{\omega^2} - \frac{n}{1+\omega^2} - \rho(1+\omega^2)\right], \quad (3)$$

де $m_i = k(z - 2\delta i)$. Для визначення граничного значення товщини плоского шару використаємо вираз (1) для точки, яка відповідає глибині ЗТВ.

$$P_i = \left[1 - \frac{\int_0^{\infty} \frac{d\omega}{1+\omega^2} \exp\left[-\frac{m}{\omega^2} - \frac{n}{1+\omega^2} - \rho(1+\omega^2)\right]}{\sum_{i=-\infty}^{+\infty} \int_0^{\infty} \frac{d\omega}{1+\omega^2} \exp\left[-\frac{\bar{m}_i}{\omega^2} - \frac{n}{1+\omega^2} - \rho(1+\omega^2)\right]} \right]_{x,y,z} \cdot 100, \quad (4)$$

де $\bar{m}_i = k(z - 2\delta_{ep} i)$, P_i - величина заданого допустимого відхилення зіставлених температур. Рівняння (4) є відносно δ_{ep} трансцендентним. На рис. 2 подані результати його числового вирішення при значеннях параметрів: $P = 800$ Вт; $r_0 = 1,4 \cdot 10^{-3}$ м; сталь 98; $K = 36$ Вт/мК; $a = 0,75 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $t_0 = 25^\circ\text{C}$, $t_c = 825^\circ\text{C}$ / t_c - температура ізотермічної поверхні, яка обмежує ЗТВ. Ураховуючи характер змінювання δ_{ep} від P (рис. 2б) і z від δ_i (рис. 2а) доцільно прийняти, в якості робочої, величину відносної похибки $p = 5\%$. Тоді для досліджених умов опромінювання і заданих швидкостей обробки $V = 0,25; 0,5; 1$ м/хв граничними будуть відповідно товщини $\delta = 4; 2,5; 1,6$ мм. При товщинах виробів, які менші граничних, необхідно вводити поправку у режими обробки.

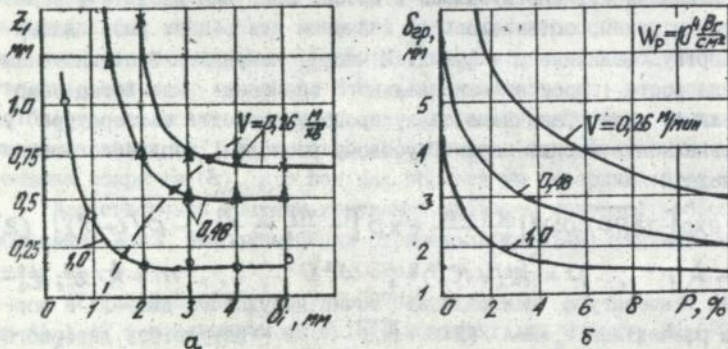


Рис. 2. Залежність глибини зміцненого шару від товщини зразка (а) і граничної товщини деталі від величини похибки P (б) при різних швидкостях лазерної обробки.

Процес лазерного зміцнення деталей аклинцеподібними робочими елементами можна уявити так. Поверхнєве джерело лазерного нагріву з нормальним законом розподілу рухається з постійною швидкістю V паралельно осі Z на певній відстані від неї. Умови теплообміну клину з оточуючим середовищем описуються законом Ньютона-Гізмана. При цьому навколишня температура t_0 , d - коефіцієнт

тепловіддачі є постійними і однаковими для всіх обмежувачих поверхонь. Математична модель процесу теплопереносу для квазістаціонарного стану має вигляд:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r K \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi^2} \left(K \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial t}{\partial z} \right) + V C_v \frac{\partial t}{\partial z} = 0; \quad (5)$$

$$\left[K \frac{\partial t}{\partial r} - d(t-t_0) \right]_{r=r_i} = 0 \quad (6); \quad \left[K \frac{\partial t}{\partial r} + d(t-t_0) \right]_{r=r_e} = 0; \quad (7)$$

$$K \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} - d(t-t_0) = -q_{\max} \exp \left[-\left(\frac{z}{r_0} \right)^2 - \left(\frac{r-r_0^*}{r_0} \right)^2 \right]; \quad (8)$$

$$\left[K \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + d(t-t_0) \right]_{\varphi=\varphi_i} = 0; \quad (9)$$

$$K \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=\pm\infty} = 0; \quad (10)$$

де q_{\max} - максимальне значення епюри тепlopідводу; t_0 - температура середовища; V - швидкість руху лазерного променя; r_0 - радіус п'ятна нагріву; r_i, r_e - внутрішній і зовнішній радіуси деталі; a^* - відстань від ріжучої кромки до місцезнаходження максимума тепlopідводу; φ_i - кут загострення клину; a, K, c_v - коефіцієнти температуропровідності, тепlopровідності і питома об'ємна тепломісткість матеріалу; $Pe = Vr/a$ - число Пекле. На основі поданої моделі проводились чисельні дослідження. На температурний режим клину в процесі його зміщення можна впливати: змінюючи швидкість руху лазерного променя, відстань між ребром клина і центром п'ятна нагріву, величину радіусу п'ятна нагріву, кут загострення. За допомогою моделі був виконаний параметричний аналіз. Для оцінки достовірності результатів розрахунків проводилось їх зіставлення з даними натурних експериментів (рис. 3). Розбіжність отриманих даних не перевищувала 7%.

Результати параметричного аналізу показали, що керувати тепловим станом клину в першу чергу треба швидкістю переміщення лазерного променя V і відстанню від ребра клину до точки п'ятна фо-

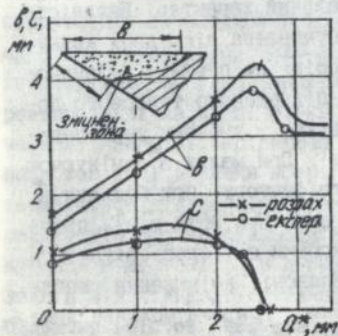


Рис. 3. Залежність розмірів зміщеного шару δ_c від величини a^* , розрахованих і отриманих експериментально:

$$\varphi_i = \pi/3; \quad r_0 = 2 \text{ мм}; \quad V = 1 \text{ м/хв.}$$

кусування з максимальною інтенсивністю випромінювання a^* . Для визначення області технологічних режимів, які забезпечують необхідну якість зміщеного шару в клині, треба спочатку визначити умови якості. При

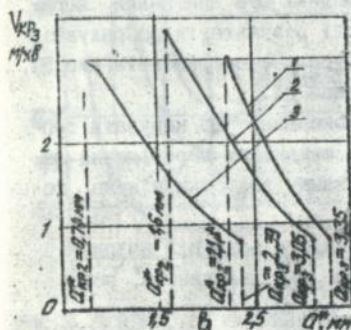
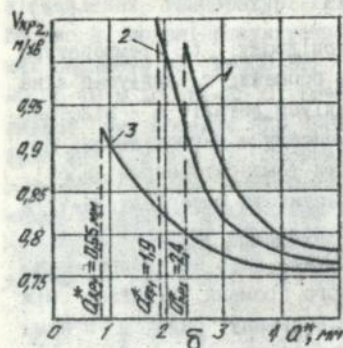
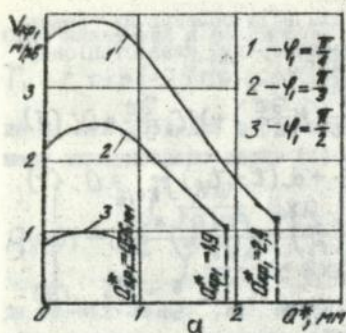


Рис. 4. Значення критичних швидкостей лазерної обробки $V_{кр1}$ (а), $V_{кр2}$ (б), $V_{кр3}$ (в) та $a_{кр1}^*$, $a_{кр2}^*$, $a_{кр3}^*$ для різних кутів загострення: 1- $\varphi_1 = \pi/4$; 2- $\varphi_2 = \pi/3$; у всьому діапазоні змінювання швидкостей обробки. При $a^* > a_{кр1}^*$ можливе лише проплавлення поверхні на відстані від

лазерному зміцненні можливі наступні негативні випадки: проплавлення кромки клину, деякої зони, яка знаходиться на опромінюваній поверхні на певній відстані від кромки; відрив зміцненої зони від кромки, структура зони лазерного нагріву поряд з кромкою клину не має потрібної твердості. Для кожного з трьох відмічених негативних випадків можна вказати деякий критичний, який розмежує області допустимих і недопустимих значень технологічних параметрів. Параметри, які відповідають цим межах є критичними. Тобто, визначенню підлягають критичні значення швидкостей руху лазерного променя ($V_{кр1}$, $V_{кр2}$, $V_{кр3}$) і відстаней a^* ($a_{кр1}^*$, $a_{кр2}^*$, $a_{кр3}^*$), що відповідають трьом граничним випадкам. Чисельні розрахунки проводились з урахуванням незмінних умов теплообміну клина з навколишнім середовищем. Величина щільності теплового потоку становила $q_{max} = 4,78 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°K}$, радіус плями нагріву - r_0 , температура навколишнього середовища t_0 , коефіцієнт тепловіддачі α . На рис. 4а, б, в подані результати чисельних розрахунків. Залежність $V_{кр} = f(a^*)$, мал. 4а, має екстремальний характер. Наявність максимуму обумовлена дією двох конкуруючих факторів: по перше - величиною загального підведеного теплового потоку q , по друге - умовами теплопереносу в деталі. При малих a^* домінуючою є дія першого фактору, при більших a^* - другого з них. При всіх $a^* > a_{кр1}^*$ проплавлення кромки не спостерігається в цілому діапазоні змінювання швидкостей обробки. При $a^* > a_{кр1}^*$ можливе лише проплавлення поверхні на відстані від

лазерному зміцненні можливі наступні негативні випадки: проплавлення кромки клину, деякої зони, яка знаходиться на опромінюваній поверхні на певній відстані від кромки; відрив зміцненої зони від кромки, структура зони лазерного нагріву поряд з кромкою клину не має потрібної твердості.

кромки. Величина $V_{кр1}$ істотно залежить від кута загострення φ_1 : для $\varphi_1 = \pi/4$, $a_{кр1}^* = 2,4$; $\varphi_1 = \pi/2$; $a_{кр1}^* = 0,96$. Третя критична швидкість $V_{кр3}$ розмежує області де є, або нема відриву зміщеної зони від кромки клину в умовах, коли проплавлення цієї зони нема. При деякому $a_{кр3}^*$ має місце відрив зміщеної зони від ріжучої кромки і проплавлення опромінюваної поверхні.

Розроблена методологія визначення режимів лазерної обробки деталей, які мають робочі елементи з обмеженими умовами тепловідводу, являє собою основу проектування відповідних технологічних процесів і є важливою складовою системи керування процесом лазерного поверхневого зміцнення.

Вивчались особливості структурно-фазових перетворень у вуглецевих і легованих сталях, титанових сплавах при дії як імпульсного, так і безперервного лазерного випромінювання. Характер фазових і структурних перетворень у вуглецевих сталях в ЗЛВ безперервним випромінюванням не має принципових відмін від картини, яка спостерігалась раніш при імпульсному лазерному діянні.

При лазерному нагріві доевтектонічних сталей вище температури точки $A_{с2}$ в їх поверхневому шарі проходить повна фазова перекристалізація з утворенням аустенітної структури, яка у процесі автогартування перетворюється у мартенсит ($H_M = 6000 \dots 7500$ МПа). При нагріві у міжкритичному інтервалі температур на місці перлітних зернин утворюється аустеніт, а надлишкова фаза (ферит або вторинний цементит) частково або повністю зберігається. В цьому випадку має місце неповне гартування, яке призводить до зниження твердості ($H_M = 5000$ МПа). Для заевтектонічних сталей, навпаки нагрів до більш низьких температур призводить до підвищення твердості ($H_M = 12000$ МПа, для сталі У12). Це пов'язано з тим, що вторинний цементит, присутній у високодисперсному вигляді додатково зміцнює загартовану сталь. Структура сталі з високим вмістом вуглецю в ЗТВ має явну неоднорідність, яка проявляється пониженою травимістю ділянок, розташованих на місці сітки вторинного цементиту. При короткочасному нагріві вирівнююча дифузія не встигає пройти з достатньою повнотою і ці ділянки зберігають підвищений вміст вуглецю, характеризуються підвищеною кількістю залишкового аустеніту. Зменшення швидкості обробки призводить до більш рівномірного перерозподілу вуглецю в аустеніті. В цьому разі твердість мартенситу лінійно залежить від кількості вуглецю до 0,6% і не залежить від цього при більшому вмісті. Цей відомий факт знайшов нове підтвердження. При малій тривалості дії ($P=1$ квт, $d_0=4$ мм, $V=0,8$ м/хв) лінійний характер залежності має місце і для сталей з вмістом вуглецю 0,6%.

Вміст вуглиця впливає і на розміри зміцненого шару, але тільки при низьких швидкостях обробки, до 2 м/хв, при більш високих - така залежність відсутня. Можна стверджувати, що лазерна обробка є ефективним засобом зміцнення сталей, в тому числі і маловуглецевих.

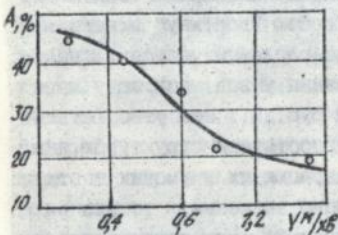
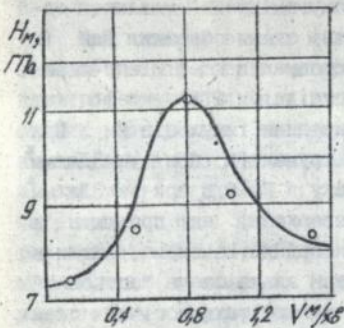
Структурно-фазові перетворення у високолегованих сталях (20X13, 40X13, Р6МБ, Х12М і т.п.) в умовах лазерного опромінювання мають більш складний характер. При лазерному нагріві сталей 20X13, 40X13 вище температури плавлення у поверхневому шарі формується дендритна структура, стовпчастого типу, яка складається з мартенситу, залишкового аустеніту і скупчень складних карбідів, і має твердість 6500-7500 МПа для сталі 20X13 и 7500-8500 МПа для сталі 40X13. Подібні скупчення карбідів спостерігались і в сталі ШХ15, котрі розташовувались по периферії зони закристалізованого розплаву. Не дивлячись на велику кількість залишкового аустеніту у структурі, до 30-40%, твердість її залишається достатньо високою. При лазерній обробці, коли структурно-фазові перетворення протікають у твердій фазі, утворена структура не має стовпчастої будови і складається з мартенситу і залишкового аустеніту. Наявність карбідів не була виявлена, хоча у вихідній структурі цієї сталі присутні карбіди типу $Me_{23}C_6$. Як показали наступні дослідження структура стовпчастого типу має добрі антифрикційні властивості.

Лазерна обробка швидкохідних сталей типу Р6МБ імпульсним випромінюванням з оплавленням поверхні призводить до утворення структури, яка складається з високодисперсного мартенситу і великої кількості залишкового аустеніту, (до 45%) і має твердість 6000-7000 МПа. На периферії ЗТВ, де перетворення протікали у твердому стані спостерігаються, так звані білі ділянки, які погано травляться, і мають підвищену твердість до 10000-11000 МПа. Електронномікроскопічні дослідження та електроннозондовий аналіз виявив, що ці ділянки мають приховано-кристалічну мартенситну структуру рейчного типу, залишковий аустеніт до 15% і багаточисельні високодисперсні карбіди. Виявлено значний перерозподіл вуглиця. Віля поверхні зони закристалізованого розплаву зафіксовано максимальна його кількість, під нею, приблизно відповідаючи його змісту в структурі основи і в зоні перетворень у твердій фазі, найменшу його кількість. Ділянки збіднені вуглецем мають максимальну твердість. Очевидно, що значна частина вуглиця там зв'язана в карбіди. Для забезпечення отримання структури, подібної описаній вище, з високою твердістю, необхідно лазерну обробку виконувати із строго контролюваними параметрами (енергія в імпульсі, діаметр п'ятна

фокусування, тривалість імпульсу) на режимах, які не призводять до розчинення вторинних складних карбідів і, як довів В. С. Д'яченко, забезпечуючих утворення карбідів при розпаді мартенситу, одержаного об'ємним гартуванням.

Встановлено факт аномального масопереносу вуглецю (перерозподіл С у твердій фазі на відстанях 150-200 мкм за час дії випромінювання 4 мс), що обумовлено високими швидкостями деформацій, які мають місце у ЗТВ при імпульсному лазерному нагріві.

Дослідження впливу безперервного лазерного випромінювання на сталь Р6МБ показали, що в ній можна сформувати структуру, подібну описаній вище, змінюючи швидкість обробки і щільність потужності лазерного випромінювання. На рис. 5 подані залежності твердості і



вмісту залишкового аустеніту від швидкості обробки. Ці дані отримані для умов лазерної обробки напівбезмежного тіла. Для відтворення цієї структури на реальних інструментах, які мають клинцеподібну форму, за допомогою моделі визначались характеристики температурного поля (T , V_n , V_{opt} , t_n), відповідаючі оптимальній структурі у напівбезмежному тілі. Потім аналогічне температурне поле моделюванням отримували на виробі з клином і визначили режими опромінювання, які з урахуванням обмежень по $V_{кр1}$, $V_{кр2}$, $V_{кр3}$ є оптимальними. Дослідженнями встановлено, що при обробці безперервним випромінюванням з проплавленням поверхні при низьких швидкостях ($P=1$ квт, $d_0=4$ мм; $V=0,6$ м/хв) можна отримати структуру у зоні, де було розплавлення, також з високою твердістю, 10000 МПа. В такій структурі поряд з мартенситом виявлені високодисперсні карбіди з розміром 1 мкм, правильної сферичної форми типу

Рис. 5. Вплив швидкості лазерної обробки на твердість (а) та вміст залишкового аустеніту (б) в ЗТВ сталі Р6МБ: $P=1$ квт; $d_0=5$ мм.

(Fe, W, Mo)C, які утворились у процесі охолодження закриталізованого розплаву. При меншій тривалості дії лазерного випромінювання, але також забезпечуючи проплавлення поверхневого шару, аналогічні карбіди в структурі не були виявлені. При цьому

відмічається істотне зниження твердості структури, приблизно таке, як і при імпульсній обробці не на оптимальних режимах.

В процесі вивчення технологічних закономірностей зміцнення як імпульсним, так і безперервним випромінюванням були визначені умови вибору оптимальних технологічних схем обробки, встановлені взаємозв'язки характеристик якості поверхневого шару з параметрами обробки (W_e , W_p , C , V та ін.). Як витікає із принципу організації технологічної системи лазерної поверхневої обробки доцільним було б встановити зв'язки типу $T_n, V_n, V_{охл. тн} = f(P, d_0, t, \dots)$ і $Z, H = f(T, t_n, V_n, V_{охл.})$. Але до теперішнього часу цього зробити було не можливо, оскільки були відсутні швидкодіючі прилади для виміру температури безпосередньо у зоні лазерного нагріву.

Показано, що при імпульсному лазерному зміцненні можливі однокоординатна і двокоординатна технологічні схеми обробки. Для їх оцінки та оптимізації запропоновано використовувати коефіцієнт перекриття $K_n = S/d_0$, де S - відстань між двома сусідніми ЗТВ, коефіцієнт заповнення профілю K_z і коефіцієнт використання імпульсів K_i . При зміцненні поверхонь робочих кромek інструментів при $W_e < 3 \text{ Дж/мм}^2$ потрібно виконувати однокоординатну обробку з $K_n = 0,8$, при $W_e > 3 \text{ Дж/мм}^2$ - $K_n < 0,6$. При лазерному опромінюванні поверхонь, які працюють в умовах тертя ковзання, доцільною є двокоординатна схема, коли в обох напрямках $K_n > 1$, тобто реалізується так звана схема "островок-ового" зміцнення. Відмічені особливості вибору технологічних схем стосуються і обробки безперервним випромінюванням. Оскільки зміцнений шар у цьому випадку являє собою "доріжку" з певними розмірами, то вибір схем обробки додатково регламентується її напрямком відносно напрямку швидкості ковзання у зоні контакту пари тертя. У місцях взаємного перекриття двох сусідніх зон утворюється зона швидкісного відпуску з характерною трооститною структурою, яка має понижену твердість. Якщо для деталей, працюючих в умовах тертя, а також для інструментів це не має істотного значення, то для виробів, працюючих при циклічних навантаженнях ці зони являють собою металургійні концентратори напружень. Для недопущення утворення зон відпуску запропоновані оригінальні технологічні схеми лазерної обробки.

Для розробки технологічних процесів, визначення режимів лазерної поверхневої обробки отримані статистичні моделі для ряду матеріалів, які взаємозв'язують глибину $Z(Y_1)$ і твердість $H_M(Y_2)$ зміцненого шару з енергією лазерного випромінювання, $E(X_1)$, тривалістю дії, $t(X_2)$, діаметром п'ятна фокусування $d_0(X_3)$.

$$Y_1(Y_2) = 82 + 38X_1 - 5X_2 - 7X_3 - 34X_1 + X_2 - 5X_1 + X_3 - 20X_1 + 30X_2^2;$$

$$Y1_{P6M5} = 74 - 46X1 - 59X2 + 2X3 - 25X1 * X2 + 10X1 * X3 - 3X2 * X3 + 6X1^2 + 41X2^2 - 4X3^2$$

$$Y1_{Y12M} = 84 - 39X1 - 47X2 - 3X3 - 19X1 * X2 + 5X2 * X3 + 26X2^2$$

$$Y2_{У8} = 999 + 25X1 - 58X3 + 16X1 * X2 + 16X1 * X3 - 41X2 * X3 + 59X1^2 - 76X3^2$$

$$Y2_{P6M5} = 838 - 42X1 - 10X3 + 31X1 * X2 + 26X1 * X3 - 31X2 * X3 - 63X1^2 + 52X2^2 + 37X3^2$$

$$Y2_{X12M} = 946 - 42X1 + 27X3 + 165X1 * X2 + 73X1 * X3 - 23X2 * X3 - 45X1^2 - 126X2^2 - 96X3^2$$

Для безперервного випромінювання встановлені зв'язки між Z , H , Rz і технологічними параметрами W_e, W_p, P, d_0, V ; розроблені відповідні методики визначення режимів обробки і номограми.

Проводились дослідження впливу зміцнюючої обробки на фізико-механічні і експлуатаційні характеристики матеріалів: величину і характер розподілу залишкових напружень, зносостійкість, теплостійкість, корозійну стійкість, втомну міцність. Залишкові напруження 1 роду залежать від щільності потужності і тривалості дії лазерного випромінювання, хімічного складу оброблюваного матеріалу.

При низьких рівнях щільності потужності $W_p = 20 \text{ кВт/см}^2$, коли забезпечується нагрів матеріалу до температур, не перевищуючих температуру плавлення, але достатніх для гартування, практично у всіх сталях формуються ростягуючі залишкові напруження, рівень яких знижується з 800 МПа до 250 МПа по мірі зменшення вмісту вуглицю в сталі і ступеня її легованості. З підвищенням температури нагріву до $T_{пл}$ і вище має місце зниження ростягуючих напружень, для сталі X12M - з 800 МПа при $W_p = 20 \text{ кВт/см}^2$ до 400 МПа при $W_p = 200 \text{ кВт/см}^2$, а для вуглицевих і низьколегованих сталей (сталь 45, У8, ХВГ) характерним є формування стискуючих напружень (-400 МПа для сталі 45; -250 МПа для сталі ХВГ; -150 МПа для сталі У8, при $W_p = 200 \text{ кВт/см}^2$). При обробці сталей після об'ємного гартування на границі ЗТВ і матеріалу основи, тобто у зоні відпуску, виявлені гострі піки ростягуючих напружень. Зміцнення безперервним випромінюванням призводить до виникнення у центрі "доріжки" стискуючих напружень, на периферії - ростягуючих. На кінцевий напружений стан поверхневого шару виробу цілком впливають технологічні схеми обробки, розміщення зміцнених "доріжок" на обробленій поверхні. Лазерне зміцнення ріжучих кромки інструментів, коли використовується тільки одна "доріжка" призводить до формування сприятливих стискуючих напружень (-1000 МПа, для У8).

В титанових сплавах ВТ3-1, ВТ9 при імпульсному нагріві мають місце стискуючі напруження величиною до 600 МПа ($W_p = 250 \text{ кВт/см}^2$). При безперервному опромінюванні залишкові напруження змінюються в шарі товщиною 40 мкм від 300 МПа до 50 МПа у залежності від режиму.

Для отримання у процесі лазерного зміцнення гарантованих стискуючих залишкових напружень запропоновано спосіб лазерного

термо-деформаційного зміцнення (А.с. 934621). Встановлено, що при механічному деформуванні сталі 45, при температурах 450-500 °С на стадії охолодження, після лазерної обробки утворюється зміцнений шар, який має більш дисперсну і твердішу структуру ніж після звичайного лазерного гартування, стискувачі залишкові напруження, величина яких залежить від величини деформуючого зусилля, $F(\sigma_s - 300\text{МПа}, F=40\text{кГс}; \sigma_s - 50\text{МПа}, F=60\text{кГс})$ і щільності потужності випромінювання.

Зносостійкість поверхневих шарів сталей У8, Р6М5, 20Х13, зміцнених лазерним опромінюванням, вивчалась на машинах тертя по схемі "призма-ролик". Встановлено, що лазерне зміцнення досліджених сталей призводить до істотного підвищення зносостійкості по відношенню до об'ємного гартування. Так, для пари сталь У8-ШХ15, параметр зношування після лазерного зміцнення: $I_1=3,1$ мг/км, після об'ємного гартування $I_2=4,9$ мг/км; для пари Р6М5-ШХ15: $I_1=1,0$ мг/км, $I_2=2,1$ мг/км; для Р6М5-12Х18Н10Т: $I_1=0,5$ мг/км, $I_2=1,6$ мг/км; для 20Х13-ШХ15: $I_1=0,6$ мг/км, $I_2=0,83$ мг/км. При цьому встановлено істотне зниження коефіцієнту тертя. Для пари 20Х13-ШХ15 в 0,22 до 0,08. Висока зносостійкість, низький коефіцієнт тертя обумовлені тим, що структура, яка формується при лазерному зміцненні є метастабільною, має рівномірно розподілені тверді (мартенсит, карбіди) і пластичні (залишковий аустеніт) складові. Це призводить до того, що метастабільна структура під дією умов тертя (питоме навантаження, температура, кисень повітря, мастило) сприяє утворенню вторинних структур, які для даних умов вже будуть стабільними, тобто має місце процес самоорганізації при терті. Про це свідчать результати металографічного аналізу поверхонь тертя після випробувань. Вивчався вплив режимів і технологічних схем лазерного зміцнення на опір втомі в умовах дії корозійних середовищ та механізм руйнування при статичному навантаженні на ростяг вуглецевих і легованих сталей. Плоскі зразки для випробувань на втому і циліндричні - на ростяг оброблялись випромінюванням CO_2 лазера ($P=1$ кВт, $V=0,2-1$ м/хв, $d_s=4-5$ мм). Випробування на опір малоцикловій втомі проводились за жорсткою схемою при постійній деформації на повітрі, у 3-5% водному розчині NaCl і 25% водному розчині мурашкової кислоти. Показано, що вуглецеві сталі, зміцнені лазерним випромінюванням, при невеликих рівнях деформації мають переваги перед незміцненими. Але, чим більший рівень напружень, тим менше переваг має зміцнена сталь. При високих деформаціях витривалість незміцненої сталі вища ніж зміцненої. Оцінка по критерію ефективності зміцнення показує вплив агресивного середовища на довговічність зміцненої сталі. В цілому, лазерна обробка виконана на

оптимальних режимах, перспективна для підвищення опору корозійно-втомному руйнуванню сталей в області пружних деформацій. Металографічні дослідження мікроструктури ЗТВ і вивчення зломів циліндричних зразків з вуглецевих і легованих сталей, а також зіставлення отриманих даних дозволили виявити механізм їх руйнування при ростягуванні. Встановлено, що він істотно залежить від хімічного складу сталі, режимів і технологічних схем опромінювання. Зародження руйнування починається на поверхні зразків в ЗТВ (при значно більших навантаженнях, ніж звичайно). У вуглецевих сталях це зародження іде за механізмом внутрішньозернинного, транскристалітного сколу. В легованих сталях механізм руйнування має інший характер. При цьому відзначається вплив технологічної схеми обробки. Після лазерної обробки по спіралі, характер руйнування з'являється якісно більш в'язким, ніж після обробки по утворючій з гадтелями.

Отримані результати впливу лазерного зміцнення на фізико-механічні характеристики матеріалів є базою даних, котра необхідна для визначення параметрів обробки, для створення системи керування процесом зміцнення.

Для розширення можливостей керування властивостями поверхнього шару матеріалів проводились дослідження процесу лазерного легування з газової фази, з попередньо нанесеного шару, методом інжекції порошку в розплав.

Лазерна нітроцементация армко-заліза при дії імпульсного лазерного випромінювання виконувалась у спеціальній камері у середовищі "пропан-бутан-азот". Встановлено, що у армко-залізі, при щільностях енергії $We=5,6-19 \text{ Дж/мм}^2$ і складі середовища (50% пропан-бутану, 50% азоту) утворюється мартенситно-аустенітна структура з твердістю до 8800 МПа. при глибині ЗТВ до 0,2 мм. Кількість залишкового аустеніту змінюється від 5% до 21% в залежності від вмісту пропан-бутану в складі середовища і щільності енергії. Максимальна кількість фази фіксується при 100% пропан-бутану.

Легування з попередньо нанесеного шару проводилось на вуглецевій сталі 45 і жароміцному сплаві ЖС6К. Для легування використовувались порошки B_4C ; WC ; ХТМ ($TiB_2+CrB_2+12X18NiOT$), ВТН ($TiB_2+VC+12X18NiOT$), які наносились на поверхні зразків плазменним та детонаційними методами. Зразки з покриттями товщиною 150 мкм оброблялись випромінюванням CO_2 лазера ($P=1 \text{ кВт}$, $d_0=2-4 \text{ мм}$; $V=0,2-2 \text{ м/хв}$) так, щоб глибина проплавлення була більша за товщину покриття. Показано, що після лазерної обробки сталі 45 з ХТМ і ВТН утворюється поверхневий шар з характерною структурою литого спла-

ву, з евтектичними кристалами зміцнюючих фаз. Максимальна зносостійкість спостерігається при оптимальному співвідношенні литих і пористих ділянок на поверхні тертя (50%-лито, 50%-пористі). Естановлено підвищення зносостійкості в 4 рази. Легування сплаву ЖСБК карбідом бору супроводжується утворенням широких ЗТВ з глибиною до 0,9 мм і високодисперсною блочно-ячеїстою структурою. Сітка зміцнюючої фази, яка являє собою міжзернинні границі, значно дисперсніша, ніж у вихідному матеріалі. Структура відрізняється високою твердістю 6000-6500 МПа (початкова-4000 МПа). Підвищення твердості пов'язано з розчиненням у розплав і наступному виділенні при охолодженні дрібних часток B_4C , що підтверджують дані рентгенографічних досліджень. При легуванні сплаву ЖСБК ХТН отримано підвищення твердості до 6000-6800 МПа, виявлено наявність у поверхневому шарі зміцнюючих фаз TiB_2 і CrB_2 , а також Ni , Fe_3 , Fe_2 і невідомої фази X. Отримані структури забезпечують підвищення зносостійкості сплаву ЖСБК в умовах високих температур у 3 рази. До лазерної обробки інтенсивність зношування при температурі 1073К становила 35,7 мг/(см²·км), після легування -12,1 мг/(см²·км).

Був досліджений процес інжекції порошкових матеріалів B_4C ; WC ; ПГ-СР2, ПГ-СР4, Бр. ОПС-10 і інші у зону розплаву на сталі 45 з метою легування та наплавки. На процес легування впливають витрачення порошку, діаметр подаючого сопла, відстань від зрізу сопла до п'ятна фокусування променя, кута нахилу сопла і напрямку подачі порошку відносно напрямку руху деталі, швидкість обробки, параметри променя. Естановлено, що, при відсутності запасу по потужності випромінювання, дуже важливе значення має напрямок і кут подачі порошку. Кращі результати забезпечуються при подачі порошку на зустріч руху деталі. Кут подачі порошку повинен бути не на багато більшим кута між дотичною до поверхні "хвоста" розплаву і напрямком руху виробу, який змінюється в залежності від режимів обробки в межах (45°-60°). Розмір п'ятна розпилення порошку на поверхні обробки доцільно брати рівним d_0 . Потрібне витрачення порошку при потужності лазерного випромінювання до 2 кВт лежить в діапазоні 0,1-1 Г/с. Для реалізації процесу лазерного легування розроблено дозуючий пристрій з відповідними характеристиками. Його особливість - відсутність деталей і вузлів які рухаються. Транспортування порошку і його дозування проводиться за рахунок різниці тиску у забірній і подаючій порожнинах. Виконані дослідження поверхневих шарів, стриманих методом інжекції довели їх перевагу перед іншими, розглянутими вище. Зони легування відрізняються високою рівномірністю розподілу легуючих компонентів і фаз, які утво-

рються у процесі лазерної обробки, відсутністю порожнин. Для виключення утворення тріщин при легуванні сплавів карбідами (WC, TiC і інш.) потрібно додатково використовувати порошки пластичних матеріалів типу Ni, Co та інш. Легування вуглецевих сталей порошками, які самофіксуються (ПГ-CP2, ПГ-CP4), свинцюватою бронзою забезпечує істотне підвищення зносостійкості, дозволяє в раді випадків, проводити заміну матеріалів.

Отримані в роботі результати дозволили розробити алгоритм керування якісними характеристиками поверхневого шару при лазерній зміцнюючій обробці поданий на рис. 6.

Суть цього алгоритму заключається в наступному. На першому етапі формується база даних, яку утворюють параметри лазерного променя і режимів роботи лазерного обладнання, параметри, які характеризують умови обробки, фізико-механічні характеристики матеріалів, отримані статистичні математичні моделі, масив даних про властивості зміцнених матеріалів у залежності від режимів обробки. На другому етапі виконується вибір мети обробки і введення необхідних значень Z , H_A граничних значень I, R_L, C_B, T^* (знак і величина залишкових напружень, зносостійкість (I), теплостійкість T^* та ін. Після цього виконується вибір моделі і розрахунок параметрів процесу ($T_p, V_{np}, V_{охл.тн}$), по яких визначаються величини ($R_L, C_{-1}, C_{зал. I}, T^*$) зіставляються з граничними. При наявності розбіжностей проводиться корекція $T_p = T_p \pm \Delta T$ і $t_{нп} = t_{нп} \pm \Delta t$. На основі зкоректованих температури і часу нагріву ($T_p, t_{нп}$) розраховуються параметри обробки (потужність випромінювання P_p / швидкість обробки V_p , розмір п'ятна фокусування, d_0), формується керуюче діяння і здійснюється запуск процесу. Одночасно проводиться вимір параметрів процесу $T_{нп}, t_{нп}$, які зіставляються з розрахованими, визначається помилка керування.

Оскільки, на теперішній час відсутні швидкодіючі прилади для виміру Z, H_A і інших характеристик зміцненого шару, то вибірково виконуються експериментальні їх вимірювання, накопичення і статистична обробка; отримані дані порівнюються з вхідними даними. При наявності розбіжностей виконується корекція математичних моделей. На базі цього алгоритму, при вирішенні питань формалізації всіх зв'язків, може бути створена автоматизована система керування процесом лазерної зміцнюючої обробки.

Результати, отримані в роботі, були використані при розробці і впровадженні у виробництво реальних технологічних процесів лазерного зміцнення і відповідного обладнання. Для ВО "Кіровгесдоція" були розроблені технологічні схеми і режими лазерного

ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІОННОЇ БАЗИ

- A - параметри променя;
- B - характ.-ки умов обр.-ки;
- C - характ.-ки вирьбу.

Початок

Введення вихідних даних:
 $A = \{A_m\}; B = \{B_n\}; C = \{C_n\}$

Побудова математичних моделей:
 $T_r = F_r(A, B, C); t_{nr} = F_t(A, B, C); V_r = F_v(A, B, C); V_{opt} = F_v(A, B, C)$

Вибір мети обробки, введення:
 $Z, NV, [a], [a_2], [a_3], [r]$

Вибір моделі, розрахунок параметрів процесу:
 T_r, t_{nr}, V_r, V_{op}

Накопичування стат. даних, корекція математ. моделей

Змінювання T_r і t_{nr}
 $T_r = T_r \pm \Delta T; t_{nr} = t_{nr} \pm \Delta t$

Визначення обмежув. параметрів процесу:
 $R_p; \alpha_2; \alpha_3; I; T^*$

Розраховані значення обмежув. параметрів відповідають заданим?

Ні

Так

Розрахунок технол. парам.: R_p, V_r, a_{op}

Формування керуючого діяння, пуск системи

Визначення величини неузгодження (помилки керування)

Вимірювання поточних параметрів процесу:
 T_{rt}, t_{ntt}

Поточні параметри процесу відповідають розрахованим:
 $T_r = T_{rt}; t_{nr} = t_{ntt}$?

Ні

Так

Запис поточних параметрів у операт. пам'ять

Визначення характ.-к якості експериментально:
 Z, NV, R_2, I

Характеристики якості відповідають середньостатист?

Ні

Так

Кінець

Система стабілізації параметр.

Рис. 3. Схема алгоритму керування процесом лазерної поверхневої оптичної обробки матеріалу.

зміцнення наплавок різьб муфто-замкового з'єднання бурової колони ($P=1,2$ кВт; $A=0,75$; $V=1,2$ м/хв; $d_0=5$ мм). При цих режимах забезпечувались наступні характеристики поверхневого шару: $Z=0,4$ мм; HV 7500 МПа, $Rz=Rz$ вих. Польові випробування довели, що лазерне зміцнення колони підвищує у 2 рази ресурс її роботи порівняно з стандартною. Для реалізації технології лазерного зміцнення різьб муфто-замкового з'єднання та поверхонь цапф лап долот було розроблено двопробеневий лазерний технологічний комплекс на базі установок "Комета-2" з автоматизованим циклом обробки. Для загрузки та виграшки деталей було використано робота з тактовим столом.

На ВО "Більшовик" м.Київ, впроваджена технологія лазерного зміцнення направляючих балок виробництва тонкої полімерної плівки, корпусів ланцюгу гофратора виробництва труб для меліорації. Лазерне зміцнення направляючих балок, дозволило значно спростити конструкцію виробничої лінії, замінити 38ХМЮА на сталь 30Х13, відказатись від об'ємного гартування, знизити у 3 рази трудомісткість їх виготовлення. Режими обробки: $W_p=4,5-10$ Вт/см²; $d_0=6$ мм; $V=0,4$ м/хв; ZnO. Лазерне зміцнення корпусів ланцюгу гофратора дозволило замінити сталь 38ХМЮА на сталь 45, виключити процес азотування, виконати всю механічну обробку з мінімальними припусками, застосувати високопродуктивний процес лиття під тиском. Режими обробки $P=800$ Вт; $d_0=5$ мм; $a^*=2,0$ мм; $V=1$ м/хв, Fe₂O₄. Характеристики зміцненого шару: $Z=0,6$ мм, HV 7400 МПа. Розроблені і впроваджені у виробництво два технологічних комплекси на базі потужних CO₂ лазерів.

Для ВО "Павлоградвугілля" була розроблена технологія лазерного зміцнення циліндрів роторного гідронасосу НР 120 і поршнів ДП-4 гідродвигуна горних комбайнів МК67. При лазерній обробці без оплавлення поверхні ($P=1$ кВт; $d_0=5$ мм; $V=0,6$ м/хв) забезпечується глибина зміцненого шару 0,5-0,6 мм, твердість 9500 МПа. Ресурс роботи гідронасосу підвищувався порівняно з стандартним у 3 рази. Економічний ефект від застосування одного зміцненого гідронасосу становив 35 тис. карбованців (в цінах до 1990 р.). Для цього ж об'єднання була розроблена технологія лазерного зміцнення державки породоруйнівного інструменту типу РК-1, виготовленої із сталі 35ХГСА. При режимах обробки ($P=1$ кВт, $d_0=5$ мм; $V=0,3$ м/хв.) забезпечувалась глибина зміцненого шару 2 мм; твердість 7000 МПа. Порівняльні випробування на зносостійкість показали, що зносостійкість незміцнених різців становить - 8 год, загартованих ТВЧ - 16 год., зміцнених лазером - 40 год. При цьому середнє видобування вугілля за зміну становило 230 тон.

Для Польської фірми "Вісхард", м. Вроцлав, розроблена технологія лазерного зміцнення зубчатих коліс масляного насосу, що дозволило їй вийти на світовий рівень якості насосів. Для реалізації технології було розроблено, виготовлено і впроваджено у виробництво повністю автоматизований технологічний комплекс на базі CO_2 лазеру і загрузочного маніпулятора барабанного типу. Внаслідок лазерної обробки, на фінішній операції, на поверхнях евольвентного профілю зубів і цапф під підшипники утворювався зміцнений шар глибиною 0,4 мм, з твердістю HV 9000 МПа. При розмірах $\ell=200$ мм, $D=50$ мм, час обробки однієї деталі становить 2 хв.

Для Харківського СКБ турбокомпресорів розроблена технологія лазерної наплавки бронзи Бр. ОПС-190 на під'ятники турбіни компресорів турбопіддуду великовантажних автомобілів закордонного виробництва. Технологія дозволяє відказатись від імпорту під'ятників з Японії, виготовляти їх не з дорогої бронзи, а з сталі 45. Наплавлений шар товщиною 0,6 мм має металургійний зв'язок з основою, литу структуру.

Розроблено процес лазерного легування лопаток газотурбінних двигунів, виготовлених із сплаву ЖОБК. Легування поверхонь бандажних полук лопаток сплавом ХТН дозволяє отримати плавний градієнт властивостей, що виключає можливість катастрофічного зносу, підвищити зносостійкість сплаву в умовах високих температур у 3 рази порівняно з базовим варіантом, не знижуючи при цьому характеристик жароміцності матеріалу виробу в цілому.

На 10 підприємствах впроваджено лазерне зміцнення металорізального інструменту, штампової оснастки, виготовлених з вуглецевих інструментальних У8, У10, У12, низьколегованих 9ХС, ХВГ, ШХ15, швидкорізючих Р6М5, Р6М5К5 і штампових Х12, Х12М сталей (ВО "завод Малишева" м. Харків, ВО "Арсенал", ВО "Маяк", ВО "Електронприлад", ВО ім. С. П. Корольова, м. Київ, та інші). В середньому лазерне зміцнення забезпечує підвищення стійкості інструментів у 2-3 рази. Особливо високий ефект спостерігається у зміцнених інструментах, які використовуються для обробки в'язких матеріалів типу корозійностійкої сталі аустенітного класу, титанових сплавів, міді та ін.

В додатку приведені розроблені рекомендації, таблиці, документація по впровадженню процесів і обладнання у виробництво.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі теоретико-експериментальних досліджень вперше розроблено комплексну технологічну систему реалізації процесів лазерної поверхневої зміцнюючої обробки, які забезпечують відтвореність результатів, можливість керувати якісними характеристиками поверхневого шару, отримання гарантованого підвищення експлуатаційних властивостей виробів.

2. Фактори, які впливають на тепловий стан поверхневого шару в умовах лазерного опромінювання утворюють три групи: характеристики лазерного променя, умов обробки, властивостей деталі. Але керувати процесом можна тільки деякими із них, зокрема потужністю випромінювання, швидкістю обробки, розподілом потужності у п'ятні фокусування, його розміром, поглинаючою здібністю та початковою температурою матеріалу. Для їх вимірювання та контролю розроблені оригінальні методи і пристрої.

3. Встановлено, що розподіл потужності багатомодового випромінювання, сфокусованого сферичною лінзою можна описати з точністю 15% стандартною функцією; отримані статистичні математичні моделі, які зв'язують розмір п'ятна фокусування з параметрами системи фокусування. При використанні сферичних дзеркал максимум інтенсивності випромінювання зміщується до краю п'ятна тим більше, чим більша відстань від фокуса. При математичному моделюванні такий розподіл потрібно задавати по точках. Для отримання якісного зміцненого шару ступінь розфокусування не повинна бути вищою $\pm (10-15)\%$.

4. Розроблено методику та швидкодіючий (стала часу 10 с) пристрій для вимірювання поглинаючої здібності та температури поверхні, який не має аналогів у світі, що дозволило отримати математичні моделі, зв'язуючі поглинаючу здібність з параметрами лазерної обробки (P, V, d), . Встановлено, що вона зростає з підвищенням швидкості обробки (V) і діаметру п'ятна фокусування (d), не залежить від кута падіння променя (для $\alpha = 0-30^\circ$) на поверхню з покриттям. Оптимальна товщина покриття $FeO, Mn(PO) = 3-4$ мкм, покриття на $ZnO = 20$ мкм. Визначено ряд ефективності покриття: оксиди, фосфати, на основі ZnO , графіт та ін. Запропоновано, на рівні винаходу, склад нового ефективного покриття на основі SiO, Al_2O_3 і С.

5. На основі розроблених математичних моделей лазерного нагріву виробів з обмеженими умовами тепловідведення створена методологія визначення оптимальних режимів зміцнення. Відповідно до неї, задаються умови якості (всутність проплавлювання поверхні або кромки, відсутність відриву зміцненої зони від кромки, $V_{охл.} > V_{охл.кр.}$), визначається область режимів (V, a), при яких забезпе-

чується гарантована якість зміцненого шару. Для швидкоріжучих сталей додатково експериментально визначається структура для випадку опромінювання напівбезмежного тіла, розраховується відповідне температурне поле, яке моделюванням реалізується на клині або тонкій платівці, і визначаються оптимальні режими обробки.

6. Встановлено, що у вуглицевих сталях гарантоване зміцнення забезпечується при лазерному нагріванні у всьому діапазоні температур вище температури точок A_c і A_c' ; твердість мікроструктури лінійно залежить від вмісту вуглецю (для сталі з $C > 0,6\%$ також); глибина зміцненого шару зростає з підвищенням його вмісту. В швидкоріжучих сталях оптимальна структура (мартенсит, залишковий аустеніт (15-20%), карбіди (30%), $H = 10000 - 11000$ Мпа) забезпечується при нагріванні до температур, які не перевищують температури повного розчинення складних карбідів ($P=1$ кВт; $V=0,8$ м/хв; $d=5$ мм). Виявлено підвищення твердості структури (10000 Мпа), яка утворюється при обробці з проплавленням поверхні, але тільки при низьких швидкостях, коли створюються умови для виділення надлишкових карбідів типу $(Fe, W, Mo)C$.

7. Розроблена методика вибору технологічних схем лазерного зміцнення імпульсним і безперервним випромінюванням, для реалізації якої запропоновано використовувати коефіцієнт перекриття $K_p = S/d$, коефіцієнт використання імпульсів та коефіцієнт заповнення профілю. Запропоновані оригінальні технологічні схеми зміцнення поверхонь, які виключають утворення зон відпуску, та відповідні пристрої та рівні винаходів. Отримані математичні моделі, які зв'язують якісні характеристики зміцненого шару в сталях з технологічними параметрами обробки, розроблено методику та номограми для визначення режимів зміцнення.

8. Розроблено заходи та засоби, які забезпечують можливість керувати величиною та характером розподілу залишкових напружень і роду. Головними керуючими факторами являються щільність потужності лазерного випромінювання та схеми розміщення зміцнених зон на поверхні. При значеннях W_p в діапазоні 10-200 кВт/см величина залишкових напружень змінюється для вуглецевих і низьколегованих сталей (45, У8, ХВГ, 9ХС та ін.) від -50...+50 Мпа до -400 Мпа, для високолегованих (Р6М5, Х12М та ін.) - від +800 Мпа до -400 Мпа. В межах однієї зони при обробці безперервним випромінюванням залишкові напруження змінюються від стискуєчих у центрі до розтягнуєчих на периферії. Як що оптимально розміщувати такі зони, наприклад на кромці інструменту, можна отримувати гарантовані стискуєчі напруження (-1000 Мпа для У8)

9. Показано, що лазерна обробка забезпечує підвищення зносостійкості сталей 45, У8, 20Х13, Р6М5 в умовах сухого і граничного тертя у 2,5-4 рази, порівняно зі сталлями після стандартної обробки. Це пов'язано з метастабільністю утворених структур, сприятливим співвідношенням м'яких і твердих її складових. Виявлене текстурування зміцненого шару після випробувань на зносостійкість свідчить про підвищення його триботехнічних властивостей. Для підвищення зносостійкості в умовах високих температур доцільним є застосовувати лазерне легування. Наприклад, легування жароміцного сплаву ЖСБК порошками $TiB_2 + CrB_2 + 12X18NiOT$ підвищує його зносостійкість при температурах 1073К, порівняно з вихідним станом, у 3 рази.

10. Встановлено, що лазерна обробка вуглецевих сталей підвищує опір малоциклової втоми в межах пружних деформацій: для сталі 30 при випробуваннях на повітрі ($\epsilon = 0,5\%$) у 2 рази; у 3,5% водному розчині NaCl у 1,7 раз; у 25% водному розчині мурашкової кислоти у 1,6 раз. При високих рівнях деформації витривалість незміцненої сталі вище зміцненої; критичні рівні деформації ($\epsilon_{кр}$) відповідно випробуванням у середовищах: $\epsilon_{кр1} = 0,95\%$; $\epsilon_{кр2} = 0,82\%$; $\epsilon_{кр3} = 0,71\%$.

11. Вперше розроблено алгоритм керування процесом лазерної зміцнюючої обробки, створений на основі отриманих математичних моделей, які зв'язують параметри процесу з характеристиками якості поверхневого шару, закономірностей змінювання осеських факторів, методик і пристроїв для їх вимірювання, одержано бази даних і, о їх вплив на фізико-механічні і експлуатаційні характеристики матеріалів.

12. Результати виконаної роботи впроваджені у промисловість. При організації впровадження застосовано комплексний підхід, який полягає у створенні на ряді підприємств (ВГО "Кіровгеологія", ВО "Більшовик", ВО "Завод Малишева", ВО "Маяк", ВО "Арсенал", ВО ім. С. П. Корольова, польська фірма "Вісхард" та ін.) дільниць та лабораторій лазерного зміцнення, їх оснащенні розробленим оригінальним технологічним обладнанням, пристроями для вимірювання та контролю, технологічними інструкціями і рекомендаціями, навчання обслуговуючого персоналу. Економічний ефект від впровадження результатів роботи становить понад 2 млн. крб. (в цінах до 1991р.).

Основні положення дисертації викладено у наступних роботах:

1. Зміцнення деталей променем лазера. /В. С. Коваленко, Л. Ф. Головки, Г. В. Меркулов. -К.: Техніка, 1981, 130 с.

2. Лазерне і електроерозійне зміцнення матеріалів. /В.С. Коваленко, А.Д. Верхотуров, Л.Ф. Головка, І.О. Подчерняєва. -М.: Наука, 1986, 276 с.

3. Коваленко В.С., Головка Л.Ф., Черненко В.С. Зміцнення і легування деталей машин променем лазера. - К.: Техніка, 1990, 192 с.

4. Довідник по технології лазерної обробки. /В.С. Коваленко, Л.Ф. Головка, В.П. Котляров та ін. -К.: Техніка, 1985, 161 с.

5. Аморфізація металів при потужному енергетичному діянні. /В.С. Коваленко, Л.Ф. Головка, Ю.А. Куницький. -К.: КПІ, 1984, 120 с.

6. Головка Л.Ф., Орішник В.І. Застосування прогресивних методів поверхневого зміцнення деталей у машинобудуванні. -К.: Знання, 1987, 17 с.

7. Laser surface hardening and electric-spark surface hardening of materials. /V.S. Kovalenko, A.D. Verhoturov, L.F. Golovko, I.A. Podchernyaeva, Plenum Publish. Corp., 1988, 175 p.

8. Головка Л.Ф., Коваленко В.С., Черненко В.С. Закономірності зміцнення залізовуглецевих сплавів безперервним випромінюванням потужного CO₂ лазера. - Електронна обробка матеріалів, 6, 1980, с. 23-38.

9. Головка Л.Ф., Коваленко В.С., Безікорнов О.І. Про напружений стан поверхневих шарів матеріалів, зміцнених лазерним випромінюванням. -Електронна обробка матеріалів, 2, 1980, с. 28-30.

10. Головка Л.Ф., Пістун І.П., Таганова Е.Є. Вплив лазерної обробки на опір малоциклової втоми. -Сб.: Нові розробки і досвід впровадження лазерної техніки і технології. Ужгород, Київ, 1990, с. 50-51.

11. Головка Л.Ф., Коваленко В.С., Орішник В.І. Тріботехнічні характеристики корозійно-стійких сталей, зміцнених лазерним випромінюванням. -Сб.: Застосування лазерів у науці та техніці. Омск, 1988, с. 64-66.

12. Коваленко В.С., Головка Л.Ф., Забелін В.О. Підвищення зносостійкості металорізальних інструментів за допомогою лазерного випромінювання. - Технологія і організація виробництва, 2, 1981, с. 42-46.

13. Kovalenko V.S., Golovko L.F. The Role of Dimensional Factors and Absorption Efficiency in Laser Surface Hardening. -Optics and Lasers in Engineering, 2, 1990, p.p. 55-65.

14. Kovalenko V.S., Golovko L.F. Laser hardening of chrome steels. - Industrial laser Handbook. Springer-Verlag, Ed. 1992-1993, USA p. 121-122.

15. Kovalenko V.S., Golovko L.F., Fialko N.M. Laser Hardening

of Components and Tools with Complicated Workind Elements shaped for Heattransfer. - ICALEO. 93, Orleando, Florida, October 28, 1993.

16. Kovalenko V.S., Golovko L.F. Laser Thermo-Deformation Material Hardening. - International Conference on Elektron Beam and Laser Processing, Reno, Nevada, November 2-5, 1993.

17. Kovalenko V.S., Golovko L.F. Laser Surface Treatment Influence on the Strength of Steel. - International Conference on laser materials processing. Chongqing, China, october 12-15, 1994.

18. Kowalenko W.S., Golowko L.F. u.a., Erhöhung der Zuverlässigkeit des Werkzeuges durch Anwendung von Lasertechnologien. Fachtagung AUPRO-84, Tagungsber., Karl-Marx-Stadt /1984/, no.5, vol.1., s.283-286.

19. Kovalenko V.S., Golovko L.F., The Role of Absorption Efficiency and Dimensional Factor in Laser Surface Hardening. International Sumposium for Electromachining (ISEM-9), April 10-14, 1989 Aichi Trade Center Nagoja, Japan, p.p.

20. Коваленко В.С., Головки Л.Ф. Особенности лазерного упрочнения деталей и инструментов. Vyuziti laseru a elektronoveho luca pri tepelnom spracovaní oceli. Zbornik prednasok, DT. CSVTS Zilina, 1988, s.16-27. (Čehoslovensko).

21. Коваленко В.С., Котляров В.П., Головки Л.Ф. и др. Лазерная обработка на материалите. София, Техника, 1988, 164 с. (Bulgarien).

22. Коваленко В.С., Головки Л.Ф., Черненко В.С. Дослідження процесу лінійного контурно-променевого лазерного зміцнення матеріалів. - Електронна обробка матеріалів, 5, 1976, с.22-25.

23. Головки Л.Ф., Коваленко В.С., Оршник В.І. Вплив поглинаючого покриття на процес лазерного зміцнення. - Електронна обробка матеріалів, 2, 1986, с.80-82.

24. Головки Л.Ф., Захарова Н.І., Разумова Н.О. Можливості підвищення зносостійкості жароміцного сплаву за допомогою лазерного легування. У кн.: Застосування лазерної технології для підвищення якості металопродукції. Магнітогорск, 1986 р.

25. Основні напрямки досліджень нелінійних математичних моделей процесів теплопереносу при діянні концентрованих потоків енергії на матеріали. /Ю.І. Швець, Н.М. Фіалко, Л.Ф. Головки і ін. - Фізико-хімічна механіка матеріалів, 4, 1986, с.70-73.

26. Коваленко В.С., Головки Л.Ф., Фіалко Н.М. Про вплив розмірного фактору на процес зміцнення деталей безперервним лазерним випромінюванням. - Електронна обробка матеріалів, 1, 1986, с.23-25.

27. Вплив лазерного опромінення на змінування фізико-ме-

хатичних характеристик матеріалів. /В. С. Коваленко, Л. Ф. Головки, В. С. Черненко/. Хімічне машинобудування, 41, 1984, с. 54-59.

28. Степаненко В. О., Головки Л. Ф. Фрактографія сталей після лазерної обробки. - Сб.: Легування, структура і властивості зміцнені сталей. К.: 1993, с. 13-14.

29. Приблизний підхід до оцінки теплового стану виробів при зміцненні матеріалу рухаючимся концентрованим джерелом енергії. /Ю. Ш. Швець, Н. М. Фіалко, Л. Ф. Головки і ін. Журнал технічної теплофізики, 3, 1985, с. 55-59.

30. Вплив лазерного опромінювання на структуру і властивості сталей. /В. С. Коваленко, Л. Ф. Головки, В. С. Черненко. - Сб.: Нові методи зміцнення сталей, К.: 1977 с. 9-11.

31. Коваленко В. С., Головки Л. Ф., Черненко В. С. - Структурні змінення у вуглецевих сталях після лазерного зміцнення і відпуску. - Хімічне машинобудування, вип. 48, 1985 р.

32. Коваленко В. С., Головки Л. Ф. Зміцнення інструментальних матеріалів з пониженим змістом вольфраму в умовах лазерного опромінювання. Кн.: Проблеми створення і впровадження висопродуктивного ріжучого інструменту з пониженим змістом вольфраму. Тбілісі, 1977, с. 89-91.

33. Головки Л. Ф., Коваленко В. С., Сініченко Л. К. Зміцнення деталей бурового обладнання лазерним випромінюванням. - Технологія і організація виробництва, 2, 1989, с. 4-6.

34. А. с. №803277. Лазерна установка для обробки деталей. /Л. Ф. Головки, В. П. Дятел, В. С. Коваленко, 1979.

35. А. с. №34621. Пристій для лазерної обробки деталей. /Л. Ф. Головки, В. П. Дятел, В. С. Коваленко, 1980.

36. А. с. №1067826. Склад покриття для зміцнення деталей при нагріві лазерним випромінюванням. /Л. Ф. Головки, В. П. Дятел, В. С. Коваленко, 1980.

37. А. с. №1518392. Спосіб термічної обробки сірих чавунів. /Л. Ф. Головки, В. Г. Марченко, В. О. Пчелинцев, 1989.

38. А. с. №1711557. Аналізатор пучків лазерного випромінювання. /Л. Ф. Головки, В. П. Котляров, 1991.

39. А. с. №1451958. Спосіб лазерного зміцнення робочих елементів штампів. /Л. Ф. Головки, В. В. Романенко, В. С. Коваленко, 1988.

40. А. с. №1492593. Лазерна технологічна установка. /Л. Ф. Головки, В. П. Котляров, В. С. Коваленко, 1989.

41. А. с. №1520889. Спосіб нанесення аморфних покриттів на поверхню металевих виробів. /В. П. Котляров, Л. Ф. Головки, В. С. Коваленко, 1989.

Staltes

К П И, 11.05.94.
1,5 уч. изд. л. Тираж_100.
ЛФФП ,пр-кт Победы,37.

457375

AB 30.196
AB 30.196