

Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт

Матеріалознавство

СТУДЕНТСЬКА НАУКОВА РОБОТА

На тему:

«Нові технології лазерної поверхневої обробки»

Шифр: *«Лазер-термо»*

2020

АНОТАЦІЯ

до студентської наукової роботи під шифром «Лазер-термо»

Студентська наукова робота: 30 сторінок, 8 рисунків, 3 таблиці, 17 джерел.

Дана робота присвячена експериментальній розробці режимів лазерного очищення та гартування сталей, що забезпечують максимальну ефективність і якість обробки.

Досліджено особливості та характер взаємодії лазерного випромінювання з металевими матеріалами, визначені вимоги до лазерної обробки, проведено вибір обладнання для досліджень, обрані варійовані параметри лазерної обробки, такі, як потужність, швидкість сканування і частота проходження імпульсів. Проведено дослідження впливу основних параметрів лазерної обробки на характеристики поверхневих шарів.

На базі результатів, отриманих в ході досліджень, побудовані графіки залежності мікротвердості від тривалості дії лазерного випромінювання.

ГАРТУВАННЯ, ЛАЗЕР, ЛАЗЕРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ,
ПОТУЖНІСТЬ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ШВИДКІСТЬ СКАНУВАННЯ,
ЧАСТОТА, РЕЖИМИ, МІКРОТВЕРДІСТЬ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	5
1.1 Лазерний промінь як інструмент для поверхневої обробки матеріалів	5
1.2 Теплові процеси в матеріалах при лазерному нагріві	5
1.3 Особливості фазових і структурних перетворень при лазерному нагріві.....	12
1.4 Лазерне зміцнення сталей	13
1.5 Постановка завдання досліджень	14
2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	16
3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ	19
3.1 Розробка режимів гартування лазерами малої потужності	19
3.2 Багатоімпульсна лазерна обробка.....	21
3.3 Гартування УФ- випромінюванням.....	
ВИСНОВКИ	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	29

ВСТУП

Лазерні технології останнім часом знаходять все більш широке застосування в промисловості, тому що розвиток сучасного виробництва обумовлює зростаюче впровадження наукоємних технологій. Використання лазерної обробки матеріалів дозволяє забезпечити високу ефективність процесу, задану продуктивність процесів, екологічну чистоту, а також економію людських і матеріальних ресурсів. Незважаючи на значні успіхи в практичному застосуванні лазерних технологій до недавнього часу лазерний промінь недостатньо широко використовувався для локального зміцнення матеріалів, хоча можливість реалізації такого процесу була показана ще в перших технологічних дослідженнях при вивченні явищ взаємодії випромінювання лазерів з металами та сплавами [1, 2]. В результаті використання лазерного променя для зміцнення матеріалів з'являється можливість внесення докорінних змін в технологію виготовлення виробів. При такому способі зміцнення можна змінити властивості різних ділянок деталі, виготовленої з порівняно недорогого конструкційного матеріалу, і отримати сплави з унікальними характеристиками міцності, зносостійкості і корозійної стійкості.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Лазерний промінь як інструмент для поверхневої обробки матеріалів

В даний час лазерні технології дуже широко застосовуються у виробництві. Обладнання, що використовується для лазерної обробки матеріалів, надзвичайно різноманітне. Воно включає пристрої зовнішньої оптики, керовані столи, маніпулятори, роботи для переміщення виробу під час обробки, а також програмне забезпечення, необхідне для реалізації конкретної технології лазерного впливу [3].

Одним з видів лазерної обробки металів і сплавів є лазерне поверхнєве зміцнення [4, 5].

Лазерне поверхнєве зміцнення має ряд переваг у порівнянні з іншими методами - не потрібно застосовувати будь-які охолоджуючі середовища, що спрощує технологію, характеризується малим часом впливу, локальністю і забезпечує відсутність деформацій деталей [4, 5].

Тепловий вплив при лазерному термозміцненні регулюється в широких межах за рахунок зміни параметрів лазерного випромінювання і режимів обробки. Це забезпечує регулювання швидкостей нагріву і охолодження металу, часу перебування металу при високих температурах, що дозволяє отримувати необхідну структуру поверхневої ділянки і відповідні властивості.

1.2 Теплові процеси в матеріалах при лазерному нагріві

Основними параметрами, що характеризують лазерне випромінювання, є потужність, довжина хвилі випромінювання, тривалість впливу

випромінювання, енергія і частота проходження імпульсів, а також когерентність, спрямованість, монохроматичність і поляризація випромінювання.

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

Температура T , до якої нагрівається об'єкт впливу, визначається щільністю поглиненої потужності випромінювання q , яка залежить від потужності випромінювання P_0 , її розподілу вздовж опромінюваної поверхні і поглинальної здатності об'єкту A . Зокрема, при рівномірному розподілі щільності потужності в межах опроміненої зони, температура визначається рівнянням:

$$q = \frac{P_0 A}{S}, \quad (1)$$

де S – площа опроміненої зони на оброблюваній поверхні.

Нагрівання тіла випромінюванням описується диференціальним рівнянням теплопровідності, яке при сильному поглинанні випромінювання, коли глибина проникнення світла в матеріал $\delta = 1 / \alpha$ (α – показник поглинання світла) набагато менше товщини прогрітого шару \sqrt{at} (a – температуропровідність матеріалу, t – тривалість імпульсу), наприклад, для металів у видимому діапазоні і для скла в середньому ІЧ-діапазоні ($\lambda \sim 10$ мкм, $\alpha \approx 10^{-5} - 10^{-6}$ см) має вигляд

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

де t – час;

x, y, z – декартова система координат, пов'язана з опромінюваним тілом.

Гранична умова на поверхні задає дію поверхневого джерела

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q(x, y, t), \quad (3)$$

де $q = q_0(1-R)$, q_0 – щільність потужності падаючого випромінювання;

R – коефіцієнт відбиття поверхні;

k – теплопровідність матеріалу, вісь z перпендикулярна поверхні і спрямована вглиб матеріалу.

Якщо розміри тіла, що нагрівається, досить великі ($(l_x, l_y, l_z \gg \sqrt{a\tau})$), а практично ≥ 1 мм для металів при $\tau = 10^{-3}$ с, його можна вважати напівнескінченим середовищем

$$T|_{x\pm\infty} = T|_{y\pm\infty} = T|_{z\pm\infty} = T_H, \quad (4)$$

де T_H – початкова температура ($(T|_{t=0} = T_H)$).

Таким чином, з рішення рівняння теплопровідності в кожному конкретному випадку можна визначити зв'язок температури матеріалу, який опромінюється, $T(x, y, z, t)$ з щільністю потужності лазерного випромінювання q_0 , що дозволяє ввести поняття порогового значення щільності потужності випромінювання – такого, при якому температура поверхні тіла в центрі опроміненої області до моменту закінчення дії випромінювання досягає заданого значення.

При розрахунку порогових значень щільності потужності випромінювання зручно використовувати формулу, яка визначає максимальну температуру тіла при нагріванні його лазерним випромінюванням (на поверхні тіла в центрі опроміненої області у вигляді кола радіуса r_0 в момент закінчення дії), яку отримуємо при вирішенні системи рівнянь (2, 3, 4) для випадку постійної в часі і за площиною опроміненої зони щільності потужності випромінювання q

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - f \frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) + T_H, \quad (5)$$

Вираз (5) має два окремих випадки, що безпосередньо впливають із нього:

а) при $r_0 \gg \sqrt{a\tau}$ (імпульсне нагрівання):

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_H, \quad (6)$$

б) при $r_0 \ll \sqrt{a\tau}$ (стаціонарний режим нагрівання):

$$T = \frac{q_0(1-R)r_0}{k} + T_H, \quad (7)$$

Довжину хвилі лазерного випромінювання вибирають таким чином, щоб забезпечити максимальне поглинання випромінювання речовиною. Відбивна здатність металів зменшується зі зменшенням довжини хвилі, тому ефективність нагріву металів збільшується при використанні лазера з меншою довжиною хвилі. Отже, обробка металів з використанням Nd:YAG-лазера, що має довжину хвилі $\lambda=1,06$ мкм, більш ефективна в порівнянні з обробкою CO₂-лазером, що має довжину хвилі $\lambda=10,6$ мкм [4].

На поглинальну здатність впливають як шорсткість опромінюваної поверхні, так і вид покриття. Наприклад, поверхні з низькою шорсткістю ($R_a = 0,05$ мкм) особливо сильно відображають лазерне випромінювання ($A < 0,7$). Зі збільшенням шорсткості поверхні частка відбитого випромінювання зменшується ($A > 0,9$), тобто ефективність використання енергії збільшується. При подальшому збільшенні шорсткості її вплив на A проявляється в значно меншій мірі.

Це можна пояснити тим, що при малій шорсткості поверхні падаючі лазерні промені, відбиваючись від похилих поверхонь мікронерівностей, розсіюються в навколишньому просторі. При збільшенні шорсткості поверхні промінь, потрапляючи в западину між мікронерівностями, може проходити багаторазове відбиття від поверхонь сусідніх мікронерівностей, що сприяє збільшенню поглинання випромінювання.

Тривалість дії випромінювання визначає температуру нагрівання об'єкта, швидкість нагрівання та охолодження, величину температурних градієнтів і розміри прогрітих шарів в матеріалі. При використанні

імпульсних лазерів тривалість впливу визначається тривалістю імпульсу випромінювання τ . Тривалість дії лазерів, що працюють в безперервному режимі, залежить від швидкості сканування $V_{ск}$ лазерного променя по поверхні матеріалу

$$\tau = \frac{2r_0}{V_{ск}}, \quad (8)$$

Частота проходження імпульсів визначає продуктивність обробки. Важливою характеристикою лазерного випромінювання є ступінь його когерентності. При обробці поверхні матеріалу когерентним випромінюванням можливе формування на ній дифракційної картини, а також періодичної поверхневої структури, що виникає при утворенні поверхневих електромагнітних хвиль. Велике значення когерентність випромінювання має в багатопроменевих лазерних системах, коли при узгодженні фаз випромінювань окремих лазерів сумарна інтенсивність в багатопроменевій системі значно перевищує суму інтенсивностей випромінювань кожного лазера окремо (багатопроменеві CO_2 -лазери, напівпровідникові лазерні матриці тощо).

Когерентність випромінювання пов'язана із спрямованістю пучка випромінювання, його монохроматичністю і поляризацією.

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

Теоретична дифракційна розбіжність пучка залежить від довжини хвилі випромінювання λ і діаметра пучка на виході лазера $2w_G$. Профіль радіального розподілу інтенсивності випромінювання зберігається в міру віддалення від лазера тільки для гауссових пучків. Для визначення кута розбіжності пучків з довільним розподілом інтенсивності розглядають розподіл інтенсивності в дальній зоні ($x \gg w_0^2/\lambda$, де w_0 – радіус вихідного вікна лазера).

Для одномодового лазера цей розподіл описується розподіленням Гауса:

$$I(w) = I_0 \exp(-w^2 / w_G^2), \quad (9)$$

де I_0 – інтенсивність випромінювання на осі пучка;

w – поточний радіус (відстань до осі пучка);

w_G – радіус, при якому інтенсивність випромінювання знижується в e разів.

Теоретична розбіжність випромінювання багатомодових лазерів визначається кутом дифракційної розбіжності $\theta = 1.26 \frac{\lambda}{2w_0^{min}}$, в якому міститься 85 % енергії пучка. Тут w_0^{min} - мінімальний радіус області генерації на вихідному вікні лазера, що залежить від числа поперечних мод.

Число поперечних мод визначає число зон на вихідній апертурі лазера, в яких вони зосереджені; відповідно характерний розмір цих областей зменшується зі збільшенням числа поперечних мод, що призводить до збільшення розходження випромінювання. Поперечний розподіл інтенсивностей поздовжніх мод на виході резонатора однаковий, вони відрізняються лише частотами випромінювання.

При рівномірному розподілі інтенсивності випромінювання на виході лазера (при дуже великому числі мод) кут розходження визначається класичною дифракцією. На рівні першого дифракційного мінімуму (86% енергії) цей кут дорівнює $\theta = 2,44 \lambda / D$, де D – діаметр пучка на виході з лазера. В реальних умовах експериментальна величина розходження випромінювання θ перевищує теоретичну дифракційну межу.

Розбіжність пучка випромінювання θ визначає можливості його фокусування. Мінімальний розмір плями в фокусі визначається виразом, що впливає з геометричної оптики телецентричних пучків

$$d_0 = \theta f, \quad (10)$$

де θ – повний кут розходження пучка;

f – фокусна відстань оптичної системи.

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

Враховуючи, що не усі перелічені параметри є рівнозначними з точки зору впливу на матеріал, або не можуть бути зміненими при налаштуванні установки, в якості змінних параметрів в даній роботі обрано довжину хвилі випромінювання, яка визначається типом лазера, потужність випромінювання та тривалість лазерного впливу, що залежить від тривалості імпульсів, частоти їх проходження та швидкості переміщення лазерного випромінювання по поверхні оброблюваного матеріалу.

Фізичний зміст процесу термообробки полягає в зміні структури і властивостей матеріалу під впливом нагріву. Принципово лазерна термообробка не відрізняється від об'ємної, але має свої особливості.

Лазерне термічне зміцнення полягає у впливі інтенсивного потоку лазерного випромінювання на локальну ділянку поверхні виробу, поглинанні лазерного випромінювання цією ділянкою і швидкому розігріві цієї ділянки до високих температур. Після припинення дії випромінювання нагріта ділянка охолоджується в основному внаслідок відведення тепла у внутрішній об'єм виробу, а також за рахунок теплообміну з навколишнім середовищем. При цьому досягаються високі швидкості охолодження. В процесі нагрівання і охолодження відбуваються фазові перетворення. Якщо при цьому має місце зміцнення, то воно класифікується як зміцнення при фазових перетвореннях. Таким чином, лазерне зміцнення сталей полягає в нагріванні локальних ділянок поверхні до температур вище критичних і наступному охолодженні з високою швидкістю, що призводить до утворення мартенситних структур.

Основною особливістю впливу лазерного випромінювання на матеріали є локальний характер теплового джерела, що забезпечує формування жорсткого термічного циклу при поверхневій обробці з

високими швидкостями переміщення джерела нагріву і високими швидкостями нагрівання й охолодження матеріалу. Необхідні характеристики поверхні при лазерному термічному зміцненні отримують створенням відповідного термічного циклу з заданими оптимальними параметрами, обумовленими максимальною температурою нагріву, швидкістю нагріву, швидкістю охолодження, часом перебування метала вище характерної температури.

Залежно від щільності потужного лазерного випромінювання, лазерна термічна обробка здійснюється як нагріванням до температур плавлення, так і нагріванням до температур нижче температури плавлення $T_{пл}$. Щільність потужності лазерного випромінювання $E = 10^8 \dots 10^9$ Вт/м² забезпечує локальний розігрів металу до температур $T \leq T_{пл}$ без помітного випаровування матеріалу [2].

При впливі на поверхню оброблюваних металів і сплавів частина потоку лазерного випромінювання відбивається від неї, а інша частина проникає на малу глибину. Енергія лазерного випромінювання практично повністю поглинається електронами в приповерхневому шарі товщиною $10^{-6} \dots 10^{-7}$ м. Внаслідок цього електронна температура T_e різко підвищується, тоді як температура кристалічної решітки T_i залишається незначною.

З плином часу інтенсивність передачі енергії вільних електронів кристалічної решітки підвищується. Починаючи з часу релаксації, різниця температур $(T_e - T_i)$ стає мінімальною і теплові процеси в металі можна охарактеризувати загальною температурою T_o .

Подальший нагрів металу здійснюється за фізичними закономірностями, що властиві традиційним способам теплового впливу на метали. Процеси поширення теплоти залежать від інтенсивності теплового впливу і в значній мірі – від теплофізичних властивостей матеріалу.

1.3 Особливості фазових і структурних перетворень при лазерному нагріві

При впливі потужного лазерного випромінювання в матеріалах можливе протікання різних фізико-хімічних процесів. Ці процеси і характер їх протікання визначаються температурою, швидкістю і часом нагріву, швидкістю охолодження матеріалу, і, в свою чергу, залежать від енергетичних і геометричних характеристик лазерного пучка, властивостей оброблюваного матеріалу, геометрії і маси опромінюваного виробу, технологічних схем обробки та ін. [1].

З точки зору використання лазерного випромінювання для поверхневої обробки з метою зміцнення матеріалів, представляють інтерес три основні режими: лазерний нагрів поверхневого шару матеріалу до температур, що не перевищують температуру плавлення, витримка при цих температурах і подальше охолодження; нагрів матеріалу до температур, що перевищують температуру плавлення, кристалізації розплаву і охолодження закристалізованого матеріалу; нагрів матеріалу до температур, що перевищують температуру його випаровування та процеси: пластична деформація за рахунок ударної хвилі, нагрів поверхневого шару плазмою, що утворюється при взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом.

Ці три режими лазерного нагріву і супроводжуючі їх фізичні явища лежать в основі методів поверхневого зміцнення. Основною характеристикою, що визначає той або інший процес, є температурне поле, знання якого дає можливість оцінити температуру в різних точках зони термічного впливу у різні моменти часу, швидкості нагріву і охолодження, фазовий склад і структурний стан поверхневого шару матеріалу після лазерної обробки.

Процеси лазерного нагрівання, випаровування і абляції матеріалу з утворенням плазми, а також швидке теплове розширення і виникнення ударних хвиль лежать в основі механізмів лазерного очищення, в той час як

світіння плазми і акустичний сигнал в повітрі можуть бути використані для контролю режимів і ступеня очищення. Таким чином, для очищення становить інтерес весь спектр процесів взаємодії лазерного випромінювання з речовиною, причому не тільки на повітрі, але і в рідкому середовищі, де часто процеси видалення забруднень йдуть набагато ефективніше і з меншими потужностями випромінювання.

1.4 Лазерне зміцнення сталей

Лазерна обробка матеріалів – це керований процес нагріву, в якому лазер діє як джерело енергії. Особливістю лазерної обробки, зумовленої її локальністю, є що супроводжує цей процес автогартування об'єму виробів, нагрітих до температур, вище критичних точок сплаву. Відразу ж після припинення лазерного імпульсу або переміщення променя лазера безперервної дії на нову ділянку поверхні виробу починається охолодження нагрітого об'єму. Тепло частково розсіюється в навколишньому просторі за рахунок випромінювання, але головним чином - відводиться вглиб виробу. Внаслідок високої теплопровідності металів і сплавів, що обробляються лазерним випромінюванням, і з урахуванням того, що нагрітий об'єм становить незначну частину всього виробу, швидкість відводу тепла (швидкість охолодження) виявляється вище критичної швидкості загартування не тільки для середньо- і високовуглецевих сталей, а й для сталей з низьким вмістом вуглецю [9, 10]. Твердість загартованих ділянок після лазерного загартування завжди вище, ніж після об'ємної.

Лазерний нагрів може здійснюватися як з оплавленням поверхні виробу, так і без оплавлення. Оплавлення в поєднанні з подальшим автогартуванням являє собою особливий, специфічний вид термічної обробки – гартування з рідкого стану. Суть її в швидкому затвердінні тонких поверхневих шарів з утворенням в них метастабільних структур. Оскільки формування таких структур часто призводить до підвищення

експлуатаційних характеристик виробів, загартування з рідкого стану міцно увійшло в арсенал термічної обробки.

При такому загартуванні на поверхні виробу можуть з'являтися дрібні нерівності, як наслідок газовиділення і усадки металу при його затвердінні. Правильний і ретельний підбір режиму лазерного нагріву дозволяє обмежити ці нерівності декількома десятками мікрометрів. Подальша механічна обробка дозволяє усунути ці дефекти.

Швидкість охолодження при автогартуванні тонкого поверхневого шару, як показують розрахунки, зазвичай становить $10^4 \dots 10^6$ °C/c, а в ряді випадків і вище. Таке поєднання високої температури нагріву і великої швидкості охолодження не може не позначатися на перебігу фазових перетворень у поверхневих шарах [15].

Щоб отримати максимальну користь від процесу лазерної обробки, необхідне знання параметрів лазерного променя і властивостей оброблюваного матеріалу. Ігнорування будь-якого з них може привести до отримання незадовільних результатів.

1.5 Постановка завдання досліджень

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

термічної обробки використовуються YAG - лазери потужністю 1...5 кВт, що працюють як в безперервному, так і в імпульсному режимі.

Незважаючи на переважну думку [1, 2] про те, що безперервний режим більш підходить для проведення термічної обробки, можна припустити, що використання імпульсного випромінювання дозволить знизити потужність використовуваних лазерних пристроїв. Мала тривалість імпульсів і можливість фокусування випромінювання в пляму малого діаметра дозволяють створювати щільності потужності, достатні для нагрівання оброблюваної поверхні до температур вище фазових перетворень.

Метою цієї роботи є дослідження режимів зміцнення поверхні деталей і інструменту з використанням YAG-лазерів малої потужності, які працюють в імпульсному режимі, а також розробка режимів лазерного очищення сталевих виробів від іржі та інших видів забруднення з можливістю використання їх у польових умовах.

2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

У даній роботі лазерне зміцнення проводилося з використанням твердотілого YAG - лазера потужністю 5 Вт з діодним накачуванням (довжина хвилі випромінювання $\lambda = 1,064$ мкм), що працює в імпульсному режимі. Використання нелінійного кристала дозволило одержувати випромінювання з $\lambda = 0,355$ мкм (третя гармоніка). Були досліджені такі режими: обробка одиночними імпульсами тривалістю 0,1 ... 0,4 мс і багатоімпульсний, тобто обробка короткими (30...70 мкс) імпульсами, швидкість переміщення столу становила 8...2 мм/с. Енергія в імпульсі визначалася фотоелектричним методом. Лазерне очищення проводилось за допомогою CO₂-лазеру потужністю 80Вт.

Як матеріали досліджень обрані вуглецеві сталі з різним вмістом вуглецю: сталь 20, 45, У12, інструментальна швидкорізальна сталь Р6М5. Оцінка можливості гартування УФ-випромінюванням проводилось на сталях 20, 45, У12 та ШХ15.

Зразки із сталі 45 піддавалися попередній термічній обробці - гартуванню з охолодженням у воді та відпуску при температурі 600 °С (покращення, режим 1). Нормалізації (режим 2) піддавалися зразки із сталі 20, 45 та У12. З метою збільшення поглинальної здатності поверхні зразки після відпуску не полірувалися.

Відпрацювання режимів лазерного зміцнення інструменту проводили на інструментальних сталях: вуглецевій У12 і швидкорізальній Р6М5. Сталі піддавали стандартній термічній обробці: У12 – гартуванню і низькому відпуску, Р6М5 – гартуванню та триразовому відпуску. Шорсткість зразків становила $R_z = 20$ мкм, тому додаткові заходи по збільшенню поглинальної здатності поверхні не робилися.

Як параметр контролю властивостей зміцненого шару була обрана мікротвердість. Випробування мікротвердості найчастіше проводять на

приладі ПМТ-3 шляхом вдавнення стандартної 136-градусної алмазної піраміди з квадратною основою і навантаженнями 2, 5, 10, 20, 50, 100 і 200 м [7]. Великою перевагою приладу є пряме навантаження індентора, що забезпечує високу точність і стабільність величин докладених навантажень.

При випробуваннях на мікротвердість чисельним значенням результату вимірювання є частка від ділення навантаження P на бічну поверхню в мм^2 в припущенні, що кути у відбитку такі ж, як у самій піраміді:

$$H_{\mu} = \frac{P}{F_{\text{пов.отт.}}} = \frac{0,189 \cdot P}{d^2}, \quad (11)$$

де P – навантаження, Н;

d – діагональ відбитка, мм;

Технологія вимірювання довжини діагоналі відбитка досить трудомістка, а ймовірність внесення похибки, особливо при вимірюванні відбитків невеликих розмірів, досить істотна. Методика вимірювання мікротвердості досить відпрацьована для відбитків з величиною діагоналі більше 7 мкм. Для малих відбитків необхідно збільшення числа випробувань для отримання досить надійного середнього результату.

Якість очищення металу від іржі та технологічних забруднень оцінювалась по значенню шорсткості R_z обробленої поверхні. Шорсткість поверхні вимірювалася контактним способом, за допомогою профілометра TP-200.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

3.1 Розробка режимів гартування лазерами малої потужності

Першим завданням даної роботи є дослідження самої можливості лазерного гартування сталей за допомогою лазерів малої потужності. Незважаючи на переважну думку про те, що безперервний режим більш підходить для проведення термічної обробки [1, 2], використання імпульсного випромінювання дозволяє знизити потужність використовуваних лазерних пристроїв. Мала тривалість імпульсів і можливість фокусування випромінювання в пляму малого діаметра дозволяють створювати щільності потужності, достатні для нагрівання оброблюваної поверхні до температур вище фазових перетворень. На сталях із різним вмістом вуглецю в різному стані (в покращеному – режим 1 і нормалізованому – режим 2) досліджували вплив імпульсного випромінювання лазера малої потужності (рис. 1).

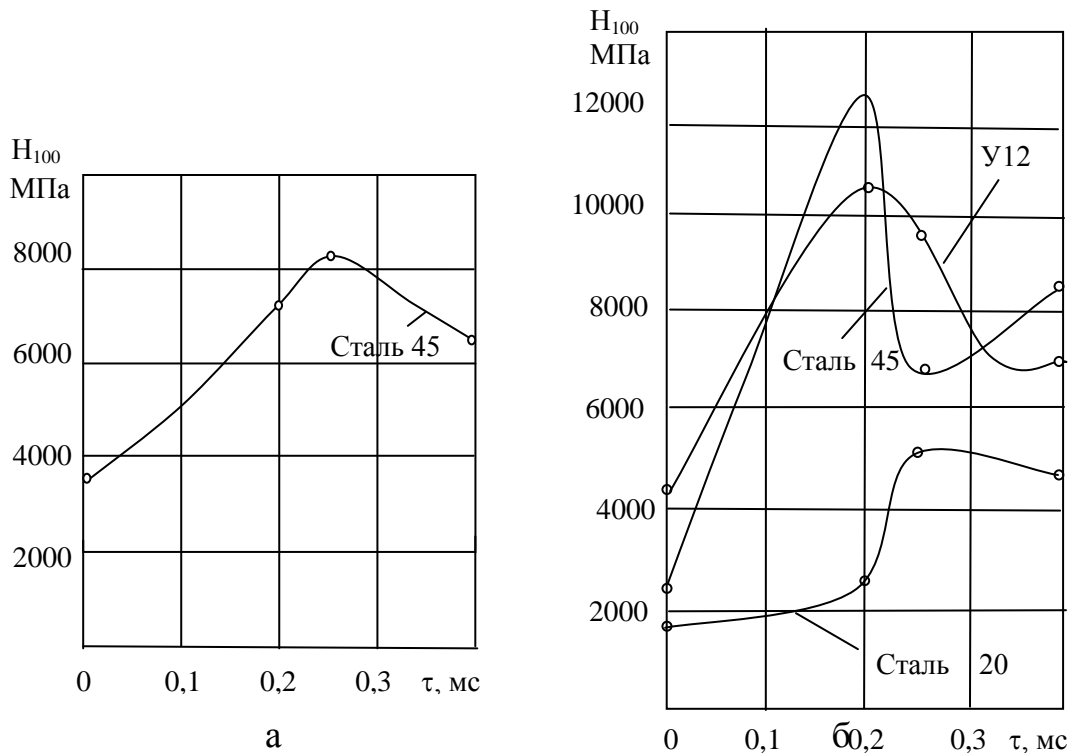


Рисунок 1 – Залежність мікротвердості вуглецевих сталей від тривалості імпульсу: а – режим 1; б – режим 2

Аналіз отриманих результатів показує, що попередня термічна обробка (вихідна структура) значно впливає на властивості поверхневих шарів після лазерного гартування. Покращення (режим 1) формує структуру сорбіт відпуску із сфероїдизованими карбідами, що рівномірно розподілені в матриці із фериту. Структура сталей 20 і 45 після нормалізації ферито-перлітна (пластинчасті карбіди), сталі У12 – перліт і цементит. Подальше лазерне гартування в імпульсному режимі призводить до утворення структур гартування. Для кожної сталі існує певне значення тривалості імпульсу, що дозволяє отримати максимальну твердість (рис. 1, б).

Дослідження показали, що відсутня залежності між вмістом вуглецю в сталі і оптимальною тривалістю імпульсу при лазерному гартуванні (рис. 1, б). Мікротвердість зміцнених лазерним гартуванням поверхневих шарів нормалізованої сталі 45 (рис. 1, б) значно вище, ніж покращеної (рис. 1, а), яка має більш дисперсну структуру сорбіт відпуску. Зі збільшенням кількості вуглецю мікротвердість зміцненого шару зростає.

Порівняння отриманих значень мікротвердості контрольних зразків (об'ємне гартування) показує, що лазерне зміцнення дає більш високі значення, причому максимальний приріст мікротвердості досягається на низьковуглецевій сталі 20 (табл.1).

Таблиця 1 – Вплив лазерної обробки на мікротвердість сталей різних марок в порівнянні з об'ємним гартуванням

Марка сталі	Приріст мікротвердості після лазерного гартування в порівнянні з об'ємним, %	
	Режим 1	Режим 2
Сталь 20	275	275
Сталь 45	76	14
Сталь У12	15	0

Попередня обробка за режимом 2 (рис. 1, б) дає значно більш неоднозначні результати. Першою особливістю такого режиму є відсутність залежності між вмістом вуглецю в сталі і оптимальною тривалістю імпульсу

при лазерному гартуванні. Друга особливість полягає в тому, що мікротвердість зміцнених лазерним гартуванням поверхневих шарів сталей 45 і У12, попередньо оброблених за режимом 2, значно вище, ніж на зразках, які піддавали покращенню (режим 1).

Ці результати не узгоджуються з результатами, отриманими в роботі [4], де максимальна твердість отримана на зразках з більш дисперсною вихідною структурою (тросит). Ймовірно, пояснення криється в умовах обробки, зокрема в короткочасності температурного впливу [5]. Неодимовий лазер малої потужності дозволяє отримувати імпульси дуже малої тривалості з великою щільністю енергії. Розміри області опромінення дуже малі, тому відбувається надшвидкісне охолодження металу. Можна припустити, що в таких умовах процеси, пов'язані з аустенізацією і розплавленням сталі, розчиненням карбідів, затвердінням і подальшим $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворенням, не встигають завершитися в повному обсязі, що і призводить до суперечливих результатів, які не узгоджуються з отриманими при обробці більш потужними імпульсними лазерами і лазерами безперервної дії.

Таким чином, на основі проведених досліджень можна зробити висновок про можливість поверхневого зміцнення сталей малопотужними лазерами при використанні імпульсного режиму. Однак продуктивність такого процесу низька, що не дозволяє зміцнювати поверхні деталей великої площини. В цьому випадку перспективним є проведення подальших досліджень на інструментальних сталях, тому що для інструменту не завжди потрібна значна площа зміцнення.

3.2 Багатоімпульсна лазерна обробка

В подальшій роботі були досліджені два режими: обробка одиночними імпульсами тривалістю 0,1 ... 0,4 мс і багатоімпульсна обробка короткими (30 ... 70 мкс) імпульсами.

Дослідженню піддавалася відпалена сталь 20, поверхня якої опромінювалася імпульсами з різною щільністю енергії (до 150 Дж/см^2) без оплавлення шліфа. Металографічні дослідження свідчать, що при опроміненні імпульсами з щільністю енергії менше 130 Дж/см^2 , структурних змін не відбувається. З підвищенням щільності енергії до 150 Дж/см^2 структура сталі змінюється. Вона складається з мартенситних кристалів і α -фази, що пройшла $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ -перекристалізацію (рис. 2). Зростання щільності енергії призводить до утворення мартенситної структури. До помітних структурних змін призводить і зміна кількості імпульсів випромінювання.

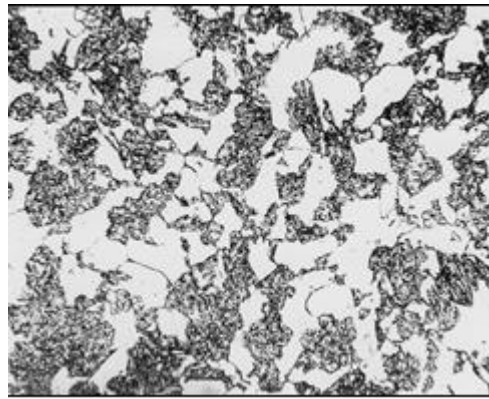


Рисунок 2 – Мікроструктура сталі 20 після лазерної обробки із щільністю енергії до 150 Дж/см^2 , $\times 350$

Після впливу двох імпульсів при щільності енергії 150 Дж/см^2 в α -фазі відбувається подрібнення зерен. Дуже суттєво змінюється мікроструктура під впливом 5 імпульсів – утворюється однорідний голчастий мартенсит (рис. 3).

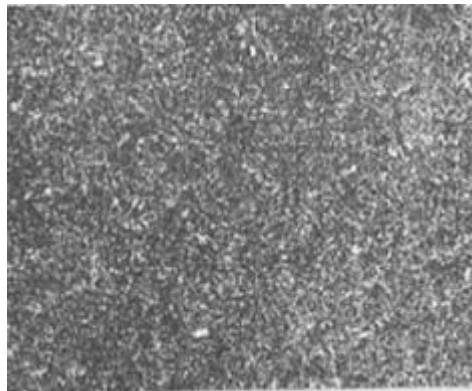


Рисунок 3 – Мікроструктура сталі 20 після лазерної обробки (кількість імпульсів – 5) $\times 350$

При достатній кількості імпульсів відбувається гомогенізація аустеніту, в результаті чого при охолодженні утворюється однорідна структура голчастого мартенситу.

Дослідження проводилися також на інструментальних сталях: вуглецевій У12 і швидкорізальній Р6М5. У табл. 2 наведені результати розрахунків щільності потужності в залежності від тривалості імпульсу для багатоімпульсної обробки.

Таблиця 2 — Розрахунок щільності потужності для багатоімпульсної обробки.

Режим	Тривалість імпульсу, мкс	40	50	60	70	400
	Енергія в імпульсі, Дж	0,7	1,45	2,38	3,55	0,25
Щільність потужності q , Вт/м ²		$7,3 \cdot 10^8$	$12,1 \cdot 10^8$	$16,5 \cdot 10^8$	$21,1 \cdot 10^8$	$8,8 \cdot 10^9$

Видно, що зі збільшенням тривалості імпульсу значення щільності потужності зростають. Ці дані добре узгоджуються з аналізом поверхні зміцнених зразків. Всі досліджені режими викликають нагрів оброблюваної поверхні вище температури розплавлення. Однак при обробці одиночними імпульсами спостерігається не тільки плавлення, а й спінення металу (рис. 4), а після кристалізації на поверхні утворюються мікротріщини (рис. 5).

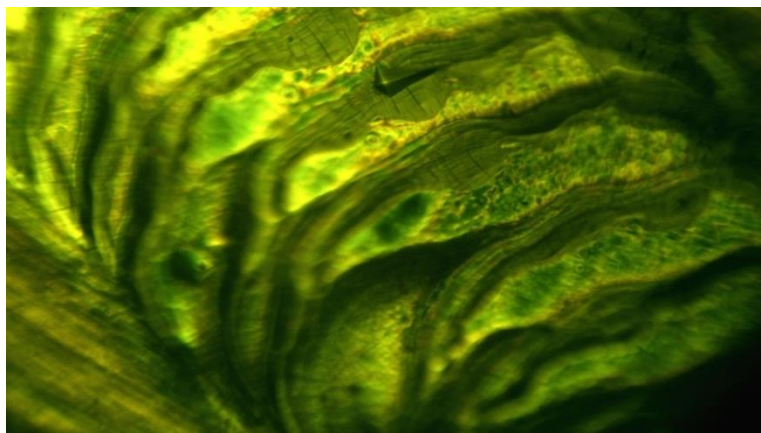


Рисунок 4 – Сталь У12, тривалість імпульсу 0,2 мс

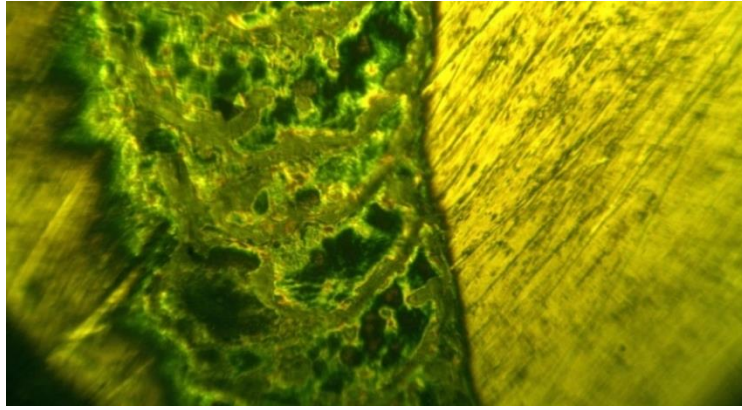


Рисунок 5 – Сталь У12, тривалість імпульсу 0,4 мс

Використання багатоімпульсної обробки хоча і призводить до плавлення, що в ряді випадків не бажано, все ж забезпечує більш високу якість поверхні (рис.6).

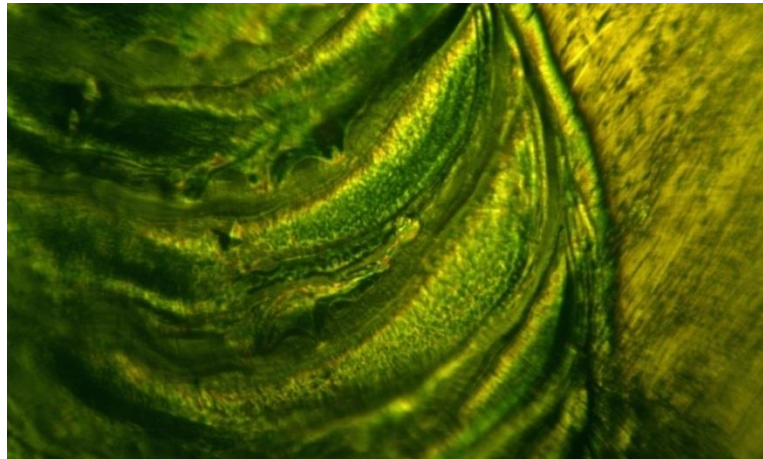


Рисунок 6 – Сталь У12, багатоімпульсна обробка, тривалість імпульсу 50 мкс

Результати досліджень мікротвердості представлені на рис.7. Порівняння двох режимів показує, що при обробці серіями коротких імпульсів мікротвердість сталі У12 вище, ніж при обробці одиночними імпульсами. Можна припустити, що при багатоімпульсній обробці внаслідок малого часу впливу лазерного випромінювання на матеріал і великій швидкості відводу тепла, дифузійні процеси, пов'язані з розчиненням карбідів при плавленні, не встигають завершитися в повному об'ємі. Тому вторинний цементит зберігається, відбувається подальше подрібнення зерна,

підвищення щільності дислокацій, що призводить до зростання рівня внутрішніх напружень, і, як наслідок – підвищення твердості.

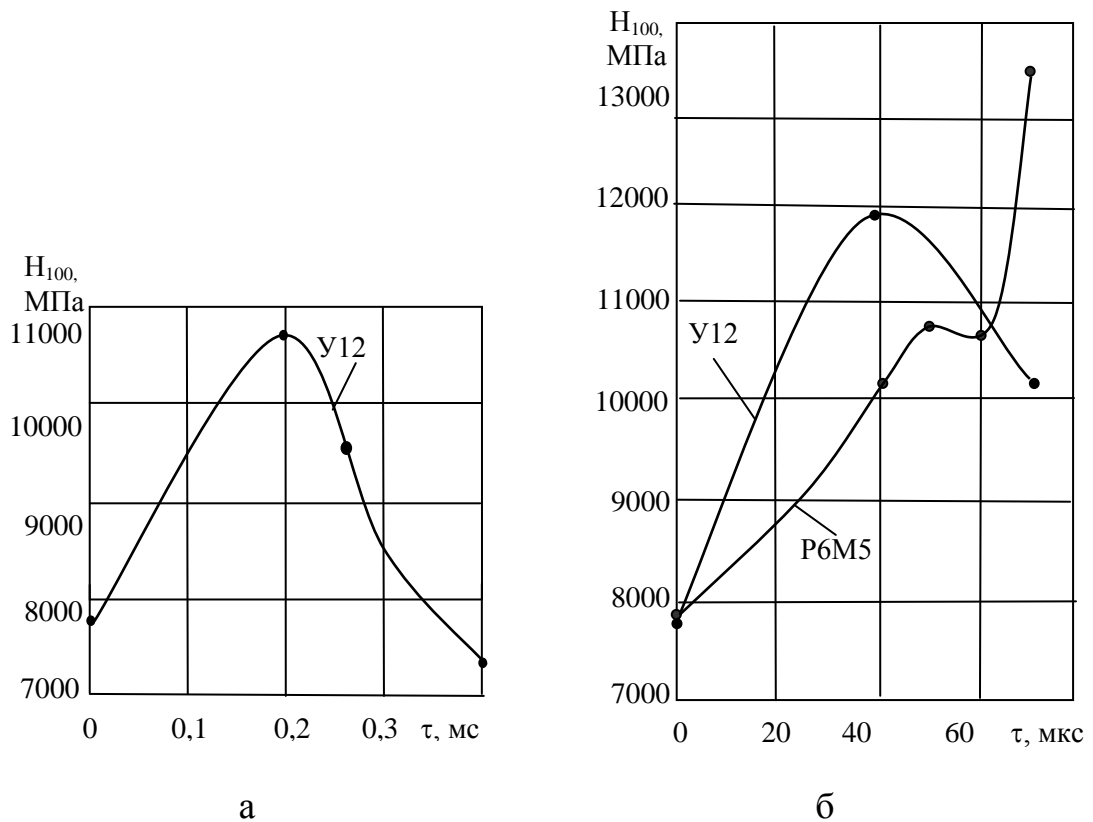


Рисунок 7 — Залежність мікротвердості від тривалості імпульсу: а - обробка одиночними імпульсами, б - багатоімпульсна обробка.

Для сталі У12 оптимальне значення тривалості імпульсу становить 40 мкс. Для сталі Р6М5 в розглянутому часовому інтервалі спостерігається майже монотонне зростання твердості. Можна припустити, по-перше, що проведення досліджень з більшою тривалістю імпульсу дозволить розробити оптимальний режим лазерного зміцнення для сталі Р6М5. По-друге, збільшення оптимальної тривалості імпульсу для сталі Р6М5 в порівнянні зі сталлю У12 пов'язано з її особливими теплофізичними властивостями: більш високою теплоємністю і більш низьким в порівнянні з вуглецевою сталлю коефіцієнтом теплопровідності (див. табл. 4).

На рис. 8 представлена структура зони лазерного впливу. Можна розрізнити зону плавлення, загартовану (світла), перехідну, основний метал.

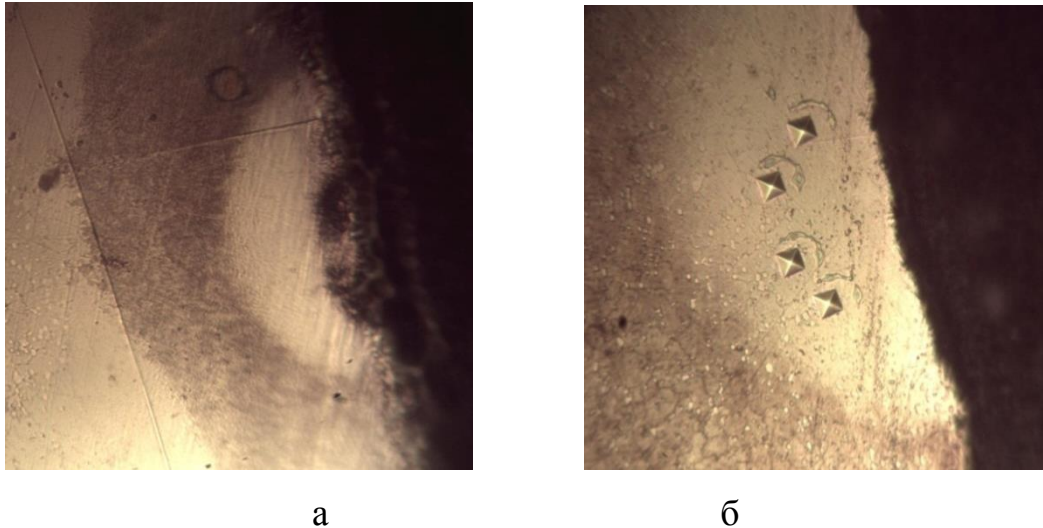


Рисунок 8 – Зони лазерного впливу при багатоімпульсній обробці: а – сталь У12, тривалість імпульсу 40 мкс, б – сталь Р6М5, тривалість імпульсу 60 мкс

Зона плавлення на сталі Р6М5 (рис. 8) значно менше, ніж для сталі У12. Глибина загартованої зони становить приблизно 150 мкм, що є досить гарним результатом для імпульсного режиму.

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

Як було показано, використання твердотілого лазера з довжиною випромінювання $\lambda = 1,06$ мкм дозволяє проводити гартування, але температура нагрівання поверхні все ж зависока - більша за температуру плавлення. Після лазерного впливу поверхня металу нерівна, шорсткість поверхні значно вище, ніж до обробки. Незважаючи на значне зміцнення, така обробка не може бути запропонована для відповідальних деталей.

3.3 Гартування УФ- випромінюванням

Відомо, що із зменшенням довжини хвилі зростає поглинальна здатність металів, тому перспективним є гартування сталей за допомогою короткохвильового УФ-випромінювання. Дослідження зразків, оброблених в

імпульсному режимі при середній потужності 5 Вт і швидкості сканування 25 мм/с показало, що оплавлення поверхні не відбувалось. Результати вимірювань мікротвердості наведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Мікротвердість різних сталей до та після гартування

Марка сталі	Мікротвердість, МПа		
	У вихідному стані	Гартування ІЧ-випромінюванням, $\lambda = 1,06$ мкм	Гартування УФ-випромінюванням, $\lambda = 0,355$ мкм
Сталь 20	2100	5770	6350
Сталь 45	2700	8050	9200
Сталь У12	8150	11050	11280
Сталь ШХ15	7950	10200	10150

Таким чином, на основі проведених досліджень можна зробити висновок про можливість поверхневого зміцнення сталей малопотужними лазерами УФ-діапазону при використанні імпульсного режиму. Однак продуктивність такого процесу низька, що не дозволяє зміцнювати поверхні деталей великої площини. В цьому випадку перспективним є проведення подальших досліджень на інструментальних сталях з метою розробки режимів зміцнення робочих поверхонь хірургічних або вимірювальних інструментів.

ВИСНОВКИ

1. Проведені дослідження довели можливість проведення лазерного гартування за допомогою лазерів малої потужності в імпульсному режимі.

2. Було показано, використання твердотільного лазера з довжиною випромінювання $\lambda=1,06\text{мкм}$ дозволяє проводити гартування, але температура нагрівання поверхні все ж зависока, більша за температуру плавлення.

3. Для зменшення теплового впливу потрібно зменшувати тривалість імпульсів, ретельно підбираючи частоту їх повторення, або використовувати багатоімпульсну обробку.

4. Проведені дослідження показали можливість гартування УФ-лазером малої потужності (5 – 10 Вт) в імпульсному режимі обробки. Показано, що використання лазера з довжиною хвилі $\lambda = 0,355\text{ мкм}$ дозволяє проводити зміцнення без оплавлення поверхні. Обрано деталі для яких можна рекомендувати таку обробку.

4. Результати роботи впроваджено у навчальному процесі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера/ В.С. Коваленко, Л.Ф.Головко, В.С.Черненко.– К.: Техника, 1990. – 192с.
2. ГригорьянцА.Г., ШигановИ.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки.: Учеб. Пособие для вузов / Под ред. А.Г.Григорьянца.– М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. – 664 с.
3. Басов Н.Г. О квантовой электронике: Ст. и выступления. - М.: Наука, 1987.-398 с.
4. Владимиров О.В. Упрочнение рабочих поверхностей деталей и измерительного инструмента высокой точности с помощью СО₂-лазера // Металловедение и термическая обработка. 1983. - №5. – С. 17-18.
5. Бураков В.А., Федосиенко С.С. Формирование структур повышенной износостойкости при лазерной закалке металлообрабатывающего инструмента // Металловедение и термическая обработка. 1983. – №5. – С. 16-17.
6. Марочник сталей и сплавов/ В.Г.Сорокин, А.В.Волосникова, С.А.Вяткин и др.; Под общей редакцией В.Г.Сорокина. – М. : Машиностроение, 1989. – 640с.
7. Григорович В.К. Твёрдость и микротвёрдость металлов. М.: «Наука», 1976.-230 с.
8. В. И. Мощенок, Н. А. Лалазарова, О. Н. Тимченко Измерение микротвердости с наноточностью/Вестник ХНАДУ, 2008.-вып.42,с.83-85
9. Дощечкина И.В. Условия лазерной обработки для получения максимальной твёрдости поверхности среднеуглеродистых сталей / И.В. Дощечкина // Вестник ХНАДУ, 2008. –Вып. 42. – С. 52–54
10. Крапошин В.С. Выбор режима нагрева поверхностным тепловым источником для получения заданной глубины закалки и заданного

структурного состояния.: Учебн. пособие. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 40с.

11. Влияние импульсной лазерной обработки на свойства инструментальных сталей. Афанасьева О.В., Лалазарова Н.А. Матеріали Міжнародної науково-практичної та науково-методичної конференції «Перспективы развития современных технологий металлов», Харків, ХНАДУ, 2016. – С.95-98.

12. Коптяков А.В., Афанасьева О.В. Лазерная очистка металлов// Materials of the XV International scientific and practical Conference Cutting-edge science - 2019 , April 30 - May 7, 2019 Technical science. : Sheffield. Science and education LTD , p. 67-72.

13. Материаловедение: Учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др. Подобщей ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина / 3-е издание, переработ. и доп. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.

14. Материаловедение/ А.М. Адашкин, В.М. Зуев. М.: Издательский центр «Академия» 2004. - 240 с.

15. Гуреев Д.М., Ямщиков С.В. Основы физики лазеров и лазерной обработки материалов: Учебн. пособие. Самара: Издательство «Самарский Университет», 2001.

16. Дьяченко В.С., Кирчатый В.И. Оптимизация режимов лазерной обработки конструкционных сталей//Импульсные процессы в механике сплошных сред. – Николаев, 2002.

17. Айхлер Ю.Айхлер Г.-И. Лазеры. Исполнение, управление, применение.–М.:Техносфера, 2008. – 440 с.