

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторної роботи № 4
«Поверхнева обробка металів лазером»
з дисципліни «Інженерія поверхні»
для студентів освітньої програми «Відновлення та підвищення
зносостійкості деталей і конструкцій» для всіх форм навчання

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи № 4 «Поверхнева обробка металів лазером» з дисципліни «Інженерія поверхні» для студентів освітньої програми «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» для всіх форм навчання / Укл.: С.П.Бережний. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. – 14 с.

Укладач: С.П. Бережний, к.т.н., доцент.
Рецензент: О.Г. Биковський, д.т.н. ,проф.
Відповідальний за випуск: С.П. Бережний

Затверджено
на засіданні кафедри ОТЗВ
Протокол № 10 від 18.05.2018 р.

Рекомендовано до видання
НМК ІФФ
Протокол № 10 від 19.06.2018

ЗМІСТ

1 МЕТА РОБОТИ.....	4
2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ.....	4
2.1 Суть методу лазерного зміцнення.....	4
2.2 Властивості зміцнених матеріалів	11
3 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ І КОНТРОЛЮ ПІДГОТОВЛЕНОСТІ СТУДЕНТІВ ДО РОБОТИ.....	12
4 МАТЕРІАЛИ, ІНСТРУМЕНТ, ПРИЛАДИ, ОБЛАДНАННЯ	12
5 ВКАЗІВКИ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ	12
6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ.....	13
7 ЗМІСТ ЗВІТУ	14
8 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....	14

1 МЕТА РОБОТИ

Вивчити техніку й технологію поверхневої лазерного обробки металів, дослідити вплив параметрів на стан обробленої поверхні.

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

2.1 Суть методу лазерного зміцнення

Закономірності лазерного зміцнення. Лазерне термозміцнення сталей за аналогією з іншими видами загартування полягає у формуванні на етапі нагрівання аустенітної структури і її подальшому перетворенні на мартенсит на етапі охолодження.

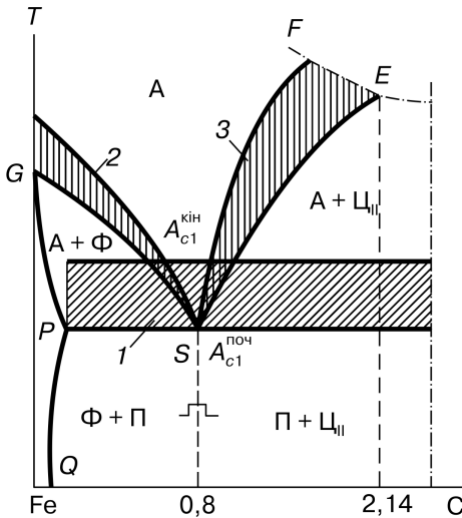
Високотемпературне нагрівання, характерне для процесу лазерного загартування, змінює кінетику утворення аустеніту. Теплова енергія, яка підводиться, перевищує енергію, необхідну для перебудови кристалічної ґратки, а сама перебудова відбувається з деякою скінченною швидкістю. Внаслідок цього перетворення здійснюється не ізотермічно, а в деякому інтервалі температур від $A_{c1}^{поч}$ до $A_{c1}^{кін}$, тобто відбувається зміцнення закінчення аустенітного перетворення в область високих температур (рис. 2.1, область 1). При досить високій температурі нагрівання або при відносно тривалому часі впливу можливе формування однорідного аустеніту.

Зниження температури нагрівання і скорочення часу впливу внаслідок підвищення критичних точок і уповільнення процесу гомогенізації приводить до збільшення неоднорідності аустеніту в сталі, особливо за вуглецем. Крім того, в цих умовах при високій температурі можливе існування нерозчинних карбідів.

Ступінь неоднорідності структури, утвореної внаслідок лазерного нагрівання, залежить від дисперсності вихідної структури: чим більше подрібнена вихідна структура, тим менша неоднорідність аустеніту.

Для отримання мартенситу в сплавах залізо-вуглець в інтервалі температур мінімальної стійкості аустеніту (673—873 К) необхідно забезпечити швидкості охолодження, більші, ніж критичні, які для

сплавів заліза знаходяться в інтервалі 50—200 К/с. Охолодження при лазерному термозміцненні без оплавлення характеризується значно більшими швидкостями.



A - аустеніт; Ф - ферит; Ц - цементит; П - перліт

Рисунок 2.1 - Ділянка діаграми стану Fe—Fe₃C з

особливостями структурних перетворень при високошвидкісному нагріванні

При лазерному термозміцненні в сталях отримують ті ж фази і структури, що й при звичайному загартуванні: мартенсит, цементити (карбіди, залишковий аустеніт), але високі швидкості охолодження спричиняють більшу неоднорідність структури, пов'язану з негомогенністю аустеніту. Виникає підвищена дефектність структури внаслідок посилення фазового наклепу, уповільнення процесів відпочинку і рекристалізації. При цьому спостерігається подрібнення блоків, збільшення щільності дислокацій і зростання напружень у кристалічній ґратці. Утворений мартенсит більш дисперсний, ніж за звичайного загартування.

Поверхня металу в центрі плями нагрівання ($r = 0$, $Z = 0$) на момент закінчення імпульсу випромінювання лазера має найвищу температуру:

$$T_{\text{пов}} = T(0, \tau) = \frac{2 q_s \sqrt{a \tau}}{\sqrt{\pi \lambda}}. \quad (2.1)$$

Швидкість нагрівання в загальному випадку в зоні дії променя лазера без істотного порушення поверхні металу можна отримати з виразу:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{q_s \sqrt{a}}{\lambda \sqrt{\tau}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-Z^2/4a\tau}, \quad (2.2)$$

де a — коефіцієнт теплопровідності;

λ — коефіцієнт теплопровідності;

q_s — питома теплова потужність імпульсу випромінювання.

Наприклад, для сталі 45 при $q_s = 10^5$ Вт/(см · К), $\tau = 1$ мс, $a = 0,1$ см²/с, $\lambda = 0,335$ Вт/(см · К) на глибині $Z = 10^{-3}$ см швидкість нагрівання становить $\frac{\partial T}{\partial t} = 1,7 \cdot 10^6$ К/с, а на поверхні ($Z = 0$) —

$\frac{\partial T}{\partial t} = 1,6 \cdot 10^6$ К/с. Зі збільшенням глибини за сталої тривалості

випромінювання лазера швидкість нагрівання матеріалу зменшується, оскільки для глибини $Z = 5 \cdot 10^{-2}$ см маємо

$\frac{\partial T}{\partial t} = 3,38 \cdot 10^3$ К/с, а для $Z = 10^{-1}$ см — $\frac{\partial T}{\partial t} \approx 0$.

Залежність глибини загартування від ефективного розміру, швидкості пересування і потужності променя лазера запишеться у вигляді:

$$Z = \sqrt{8 a r / \pi w - \pi a c r^2 \rho T_0 / A P}, \quad (2.3)$$

де r — ефективний розмір плями нагрівання;

P — потужність променя;

w — швидкість відносного пересування лазера та виробу.

Для випадку одновимірного нагрівання напівнескінченного

середовища необмеженим поверхневим джерелом зі сталою інтенсивністю потоку $q = AP_0/(\pi r^2)$ протягом часу $t = 2r/v$ (при виконанні умови $r \gg \sqrt{at}$) рекомендовані формули для визначення низки технологічних параметрів лазерного поверхневого зміцнення залізовуглецевих сплавів безперервним випромінюванням лазера на CO_2 (тут A — коефіцієнт поглинання оброблюваного матеріалу; P_0 — потужність випромінювання лазера).

Формули справедливі за умови, що глибина загартування досягає максимального значення Z_{\max} при встановленні на поверхні температури плавлення $T_{\text{пл}}$. Для цього інтенсивність теплового джерела має становити:

$$q_{\text{пл}} = T_{\text{пл}}\lambda(\pi/4at), \quad (2.4)$$

час загартування:

$$t_{\text{заг}} = \frac{\pi Z_{\text{заг}}^2}{4a} (T_{\text{пл}} / (T_{\text{пл}} - T_{\text{заг}})), \quad (2.5)$$

необхідна швидкість загартування:

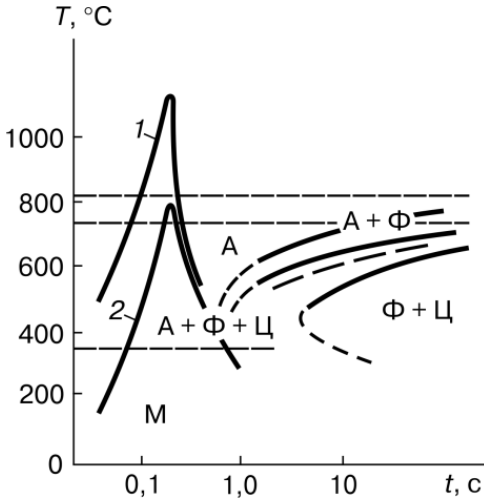
$$w_{\text{заг}} = \frac{8a(T_{\text{пл}} - T_{\text{заг}})^{3/2}}{\pi T_{\text{пл}}^2 Z_{\text{заг}}^{3/2}}. \quad (2.6)$$

Глибину зміцнення можна визначити з виразу:

$$Z_{\text{заг}} = (4at/\pi)^{1/2} (T_{\text{пл}} - T_{\text{заг}})/T_{\text{пл}}. \quad (2.7)$$

Процес зміни структури сплаву ілюструє рис. 2.2.

Залізовуглецевий сплав (сталь) з аустенітного стану, в якому він перебуває при високій температурі, має охолоджуватися зі швидкістю, більшою, ніж критична швидкість загартування. При цій швидкості весь аустеніт охолоджується до температури початку мартенситного перетворення, тобто забезпечується отримання мартенситних структур.



1 — крива зміни температури на поверхні зразка завтовшки 10 мм; 2 — крива зміни температури на глибині 0,5 мм (А — аустеніт, Ф — ферит, Ц — цементит, М — мартенсит)

Рисунок 2.2 - Діаграма ізотерм фазових переходів у вуглецевій сталі (густина поглиненого потоку випро-мінювання — $3 \cdot 10^3$ Вт/см², час взаємодії — 0,2 с)

Криві 1 і 2 (рис. 2.2) являють собою розрахункові залежності температури відповідно на поверхні і на глибині 0,5 мм, що накладені на діаграму ізотермічного перетворення аустеніту на мартенсит. Праворуч розміщені області існування інших структур. Загартування відбувається приблизно за 1 с при поглиненому потоці $3 \cdot 10^3$ Вт/см². У загартованій структурі наявний у переважній кількості мартенсит.

Взагалі ступінь загартування при різних швидкостях охолодження (тобто, законах зміни температури металу від часу), як видно з рис.2.2, можна якісно оцінити шляхом порівняння кривих охолодження і термокінетичних діаграм розпаду переохолодженого аустеніту.

При швидкостях охолодження 10^3 — 10^6 К/с спостерігається дендритна ліквіація, коли центральні осі дендритів збагачені тугоплавкими елементами, а межові ділянки зерен — легкоплавкими. При забезпеченні надвисоких швидкостей охолодження можливе утворення аморфних структур, коли не

встигають утворюватися центри кристалізації, і об'єм металу твердне, як склоподібна маса, в якій існує ближній порядок.

Залежно від ступеня виявлення вказаних умов у матеріалах розрізняють кілька видів лазерного зміцнення (модифікації структури матеріалу). Їх реалізація здебільшого визначається густиною потужності випромінювання.

У табл. 2.1 наведені види лазерного зміцнення і деякі їх характеристики.

Таблиця 2.1 - Види і характеристики лазерного зміцнення

Зміцнення	Густина потужності, Вт/см ²	Швидкість охолодження, К/с	Глибина зони термічного впливу h , мм
Без фазового переходу	$10^3—10^4$	$10^4—10^5$	0,02—0,5
З фазовим переходом	$10^4—10^5$	$10^4—10^6$	0,2—3
Лазерне легування	$10^4—10^6$	$10^4—10^6$	0,2—2
Лазерне наплавлення	$10^4—10^6$	$10^4—10^6$	0,2-1 (товщина шару)
Аморфізація поверхні	$10^8—10^{10}$	$10^6—10^{10}$	0,01—0,1

Зміцнення без фазового переходу передбачає структурні зміни в матеріалі при такому рівні густини потужності випромінювання, який не зумовлює розплавлення опроміненої зони. Вихідна шорсткість обробленої поверхні не змінюється.

Зміцнення з фазовим переходом передбачає плавлення матеріалу в опроміненій зоні. Такий вид зміцнення потребує більшої густини потужності випромінювання. Плавлення матеріалу порушує вихідну шорсткість поверхні.

При лазерному легуванні для насичення поверхневого шару легуючими елементами потрібне спеціальне середовище (газове, рідке, тверде). На оброблюваній поверхні утворюється новий сплав, який відрізняється за складом і структурою від матричного матеріалу.

Аморфізація поверхні в умовах швидкісного опромінення — новий різновид лазерного зміцнення. Надвисокі швидкості відведення тепла забезпечують своєрідне заморожування розплаву, створення металевого скла чи аморфного стану поверхневого шару. При аморфізації поверхні матеріали набувають високої твердості, корозійної стійкості, поліпшених магнітних характеристик й інших

специфічних властивостей.

При лазерному термозміцненні окремі шари ділянки, яка обробляється, прогриваються вглиб до різних температур, внаслідок чого зона термічного впливу (ЗТВ) лазерного випромінювання має шарову будову. Залежно від мікроструктури і мікротвердості в сталях розрізняють три шари.

Перший шар — зона оплавлення; властива при загартуванні з розплавленого стану. Зона оплавлення характеризується стовпчастою будовою з кристалами, які витягнуті в напрямку відведення тепла. Основна структурна складова — мартенсит, карбіди, як правило, розчиняються. При лазерному загартуванні без оплавлення перший шар відсутній.

Другий шар — зона загартування з твердої фази. Його нижня межа визначається температурою нагрівання до A_{c1} .

У цьому випадку разом з повним загартуванням спостерігається і неповне. Структура шару за глибиною неоднорідна. Ближче до поверхні знаходяться мартенсит і залишковий аустеніт, а ближче до вихідного металу разом з мартенситом — елементи вихідної структури (ферит в доевтектоїдній сталі і цементит — у заевтектоїдній).

Третій шар — перехідна зона, в якій метал нагрівався нижче від точки A_{c1} . Для загартованої чи відпущеної сталі результатом лазерного зміцнення є структури троостит і сорбіт, які мають знижену мікротвердість.

Збільшення вмісту вуглецю до 0,6 % в середньовуглецевих сталях призводить до значного зростання твердості мартенситу (7000—8500 МПа). Зона загартування без оплавлення у верхній області має мартенсит з такою мікротвердістю, як у зоні оплавлення. У нижній області по глибині спостерігається неоднорідність структури в послідовності: мартенсито-троостит, мартенсит і трооститна сітка, яка переходить в троостито-феритну, а на межі з вихідною структурою — у феритну структуру.

В евтектоїдних і заевтектоїдних вуглецевих сталях лазерне зміцнення з оплавленням характеризується наявністю в зоні оплавлення, крім дрібнодисперсного мартенситу, залишкового аустеніту, вміст якого сягатиме 40 %. Нерозчинений цементит відсутній, тому мартенсит і аустеніт значною мірою насичені вуглецем. Завдяки цьому мікротвердість мартенситу підвищується і в сталях із вмістом С від 1 до 1,2 % становить 12 000—13 000 МПа.

У зоні загартування з твердої фази виділяють верхню область, розташовану ближче до поверхні, де є розчинені карбіди, і нижню, де є нерозчинені карбіди. У верхній області твердий розчин насичений вуглецем, що сприяє утворенню підвищеної кількості залишкового аустеніту. У нижній його значно менше і метал має максимальну твердість. Тому заевтектоїдні сталі зміцнюються з якнайвищою швидкістю для отримання структур з нерозчиненими карбідами.

2.2 Властивості зміцнених матеріалів

Лазерне зміцнення підвищує зносостійкість пар тертя, які працюють в умовах сухого тертя і в абразивно-мастильному середовищі. При цьому спостерігається підвищення зносостійкості не тільки зміцненої поверхні, а й контртіла. Найбільш ефективним є лазерне зміцнення для деталей, що працюють у вузлах тертя з мастилом.

Підвищення зносостійкості спостерігається внаслідок значного зменшення (іноді до 2 разів) коефіцієнта тертя.

У парах тертя “інструментальний матеріал - сталь” процес тертя є однією зі складових механічного зношування металорізальних інструментів.

Можливість поліпшення і керування в широкому діапазоні триботехнічними властивостями визначається тим, що ділянки з литою структурою (опромінені) не схильні до сколів, відшарування і мають достатню механічну міцність, а пористі (неопромінені) є своєрідним демпфером і “мастильним акумулятором”.

Механічні властивості матеріалів, такі, як границя міцності σ_b , границя плинності $\sigma_{0,2}$, ударна в'язкість a_n , також змінюються внаслідок лазерного опромінення. Ступінь їх зміни залежить від режиму обробки, типу матеріалу. Так, для інструментальних сталей зі збільшенням густини потужності випромінювання спостерігається деяке зниження границі міцності і ударної в'язкості, в той час як на зміну границі плинності лазерне зміцнення практично не впливає. Для загартованої сталі ударна в'язкість знижується після лазерної обробки від 5 до 1,32 МДж/м².

3 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ І КОНТРОЛЮ ПІДГОТОВЛЕНOSTІ СТУДЕНТІВ ДО РОБОТИ

1. Суть процесу лазерної поверхневої обробки металів.
2. Які основні технологічні варіанти лазерного зміцнення?
3. Які параметри режимів впливають на глибину поверхневого лазерного зміцнення металів?
4. Які основні закономірності структурних перетворень при лазерному зміцненні?

4 МАТЕРІАЛИ, ІНСТРУМЕНТ, ПРИЛАДИ, ОБЛАДНАННЯ

1. Пластини із відпаленої сталі Ст. 45 товщиною 10-15 мм.
2. Розчин азотної кислоти 7 %.
3. Наждачний папір.
4. Лещата, обценьки.
5. Штангенциркуль.
6. Секундомір.
7. Струбцина.
8. Міліметрова лінійка.
9. Ємкість для травлення зразків.
10. Твердомір ТК-14-250.
11. Установка лазерна СЛС-10-1.

5 ВКАЗІВКИ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

1. Роботи з поверхневого лазерного зміцнення металів виконують на спеціально обладнаному робочому місці при ввімкненій місцевій витяжній вентиляції.
2. Корпус машини і робочий стіл мають бути заземлені.

3. Роботи виконують тільки в захисних окулярах і захисному спецодязі.

4. У процесі виконання роботи поблизу робочого місця не повинно бути легкозаймистих предметів.

5. Умикати й вимикати обладнання слід суворо згідно з інструкцією. Усі досліди провадити під наглядом майстра або лаборанта.

6. Ставити та поправляти пластини-зразки тільки в брезентових рукавицях. Гарячі зразки брати тільки плоскогубцями.

7. Після закінчення роботи вимкнути обладнання.

8. При роботі з розчином кислоти використовувати захисні окуляри, захисний одяг та гумові рукавички. Роботи проводити при ввімкненій місцевій витяжній вентиляції.

6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

1. Налаштувати установку на робочий режим. Щільність потужності 10^2 - 10^3 Вт/см². Ширина сліду променю 1 мм. Час впливу лазерного променю 1 с.

2. За допомогою секундоміра та лінійки налаштувати швидкість переміщення 10 мм /с.

3. Скласти зразки на зварювальному столі і стягнути їх струбиною. Виконати поверхнєве лазерне зміцнення зразків.

4. Повторити на інших зразках експеримент на швидкостях переміщення лазерного променю 16 та 18 мм/с.

5. Після охолодження розібрати зразки.

6. Зачистити наждачним папером торцеві поверхні зразків.

7. Протравити, промити та висушити оброблені поверхні.

8. Візуально визначити ділянки термічного впливу.

9. Виміряти твердість на зовнішній та торцевій поверхні зразків.

10. Нарисувати схему розподілу твердості по поверхні та перетину зразків.

7 ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Тема та мета роботи.
2. Короткі теоретичні данні
3. Стислий опис проведених дослідів з фіксацією параметрів процесів. Характер стан зовнішньої поверхні одержаних розрізів.
4. Схема розподілу твердості по поверхні та перетину зразків.
5. Оцінка отриманих результатів з очікуваними за розрахунками. При необхідності, вказати методи коригування процесу з метою отримання бажаних результатів.
6. Висновки по роботі.

8 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Ющенко, К.А. Інженерія поверхні [Текст] / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов та ін. – К.: Наук. думка, 2007. – 558 с.
2. Кузнецов, В.Д. Фізико-хімічні основи інженерії поверхні [Текст]: навч. посібник / В.М Пашенко, К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов. – К.: ВІПОЛ, 2005. – 372 с.
3. Папартович А.П. Справочник по лазерной технике. Перевод с неметкого Белоусова В.Н. – М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 544 с.