

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.9.048.7:621.373.826:631.31

Ковальчук Ю.О.

Уманський національний університет садівництва

Пушка О.С.

Уманський національний університет садівництва

Войтук А.В.

Уманський національний університет садівництва

АНАЛІЗ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У РЕЗУЛЬТАТІ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ ІЗ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ

У статті розглянуто особливості формування мікроструктури в зоні лазерного впливу для залізвуглецевих сплавів у результаті застосування методу поверхневої лазерної обробки. Показано розподіл мікротвердості за глибиною гартування відповідних зразків під час обробки лазером безперервної дії. Наведено залежність глибини зони лазерного впливу від швидкості лазерної обробки. Визначено швидкість переміщення лазерного променя по поверхні зразка, за якої з'являється зона плавлення. Показано розподіл залишкових напружень на поверхні залізвуглецевих сплавів, що виникають унаслідок лазерної обробки.

Ключові слова: метод поверхневої лазерної обробки, зона лазерного впливу, зміцнення, гартування, залишкові напруження.

Постановка проблеми. Нині не втрачає своєї актуальності збільшення ресурсу виробітку різних деталей сільськогосподарської техніки. Одним із першочергових завдань, що стоять перед виробниками сільськогосподарських машин, є забезпечення вищої міцності та зносостійкості деталей, які найбільше піддаються зносу й виходять із ладу.

Для зміцнення різноманітних деталей сільськогосподарської техніки може застосовуватися метод поверхневої лазерної обробки. Вона є одним із методів покращення характеристик деталей сільськогосподарської техніки із залізвуглецевих сплавів. Лазерна обробка може забезпечити значне підвищення міцності, а за правильного вибору марки сплаву, режимів застосування лазерного випромінювання та подальшої обробки зміцнених зразків ще й підвищення пластичності, ударної в'язкості та зносостійкості матеріалу.

У результаті одних досліджень робляться висновки про незначне підвищення міцності та зносостійкості зміцнюваних лазерним випромінюванням сплавів, в інших дослідженнях наводяться результати про значне підвищення міцності матеріалу, але незадовільні показники його

зносостійкості. Але мають місце численні, на жаль, також несистемні дослідження, що вказують як на значне підвищення міцності, так і на значне підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарських машин.

Ці характеристики сплавів безпосередньо пов'язані, зокрема, також із залишковими напруженнями на їх поверхні внаслідок лазерної обробки.

Розбіжність результатів пояснюється тим, що різні дослідження виконуються за різних умов лазерної обробки. Не відбувається їх узагальнення й систематизації.

Тому системне дослідження впливу лазерного випромінювання на зміцнювану поверхню матеріалу натеper є актуальним і важливим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наявні дослідження лазерної обробки різноманітних деталей сільськогосподарської техніки [1–5] у державі мають локальний характер, оскільки потребують як теоретичних та експериментальних досліджень на відповідних лазерних установках і комплексах, так і практичного визначення результатів і на спеціальних стендах та обладнанні, і в полі. Усе це вимагає чималого фінансування, яке фактично відсутнє. Сучасні спроби теоретичних

і практичних досліджень цього питання лазерної обробки проводились також ученими за кордоном [6–10], але недостатньою мірою.

Найбільш широкі дослідження впливу лазерного випромінювання на характеристики сплавів здійснено, зокрема, А.Г. Григор'янцем у праці [6], де розкривались особливості внутрішніх перетворень під дією лазерного променя та вплив деяких параметрів процесу лазерної обробки на отримвані характеристики сплавів.

Останнім часом питання впливу лазерного зміцнювального випромінювання на зразки із залізобуглецевих сплавів розглядались, зокрема, П.А. Огіним, який досліджував структуру й властивості зон перекриття під час лазерної обробки [7] і підвищення експлуатаційних характеристик деталей шляхом застосування оптоволоконного лазера [10]. Дослідженням різних аспектів лазерного зміцнення колінчатих валів активно займався О.С. Завойко [4].

Указані вище та багато інших досліджень у більшості мають несистемний характер. Питання узагальнення й систематизації різноманітних окремих досліджень залишається до кінця не вирішеним. Також недостатньо досліджений вплив окремих параметрів процесу лазерного зміцнення на міцність і, що особливо важливо, зносостійкість сплавів. Невирішеним залишається питання дослідження можливих комбінованих методів зміцнення сплавів із застосуванням лазерної обробки.

Досить суперечливі дані можна зустріти в різних авторів щодо залишкових напружень на поверхні залізобуглецевих сплавів, їх значень і знаків при подібних параметрах лазерної обробки.

Постановка завдання. Метою роботи є визначення впливу лазерної зміцнювальної обробки на структуру і властивості залізобуглецевих сплавів, аналіз особливостей формування мікроструктури й розподілу мікротвердості за глибиною гартування відповідних зразків, дослідження розподілу залишкових напружень на поверхні оброблюваних сплавів, що, у свою чергу, дасть можливість розроблення оптимальних параметрів процесу лазерного зміцнення та призведе до покращення експлуатаційних характеристик відповідних деталей сільськогосподарської техніки.

Виклад основного матеріалу дослідження. Якщо розглянути поперечний переріз зміцненої лазерним випромінюванням смуги залізобуглецевих сплавів за допомогою CO₂-лазера безперервної дії, то в ньому можна виділити декілька основних зон (рис. 1) [11]: зону оплавлення (зону

загартування з рідкого стану), зону загартування, зону відпуску та вихідну структуру матеріалу. У низці випадків деякі із цих зон можуть бути відсутніми (наприклад, може бути відсутньою зона оплавлення при загартуванні без оплавлення поверхні або зона відпуску при загартуванні попередньо відпаленого металу). Характерний зовнішній вигляд зміцнених доріжок без оплавлення і з оплавленням поверхні наведено на рис. 2.

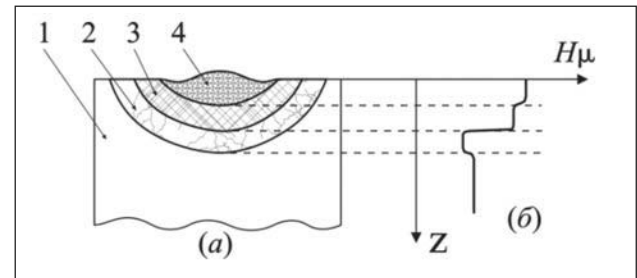


Рис. 1. Схема поперечного перерізу зони лазерної обробки (а) і розподілу мікротвердості за глибиною зони обробки (б): 1 – вихідний метал, 2 – зона відпуску, 3 – зона загартування, 4 – зона загартування з рідкого стану

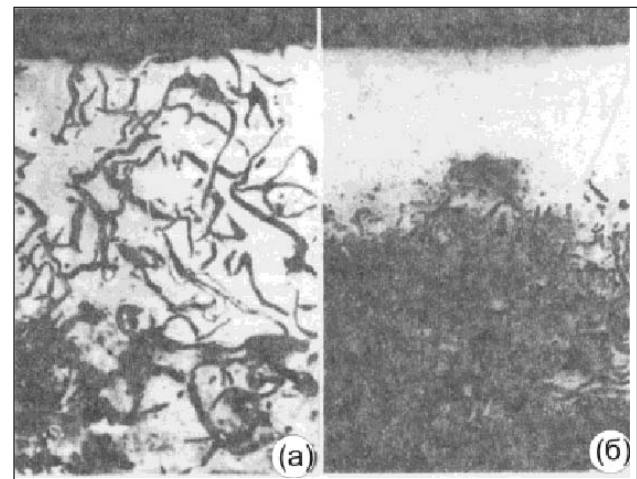


Рис. 2. Структура загартованих зон після лазерної обробки зразків із сірого перлітного чавуну випромінюванням CO₂-лазера: (а) – загартування без оплавлення (x50); (б) – загартування з оплавленням (x25)

Кожна зона, у свою чергу, може складатися з декількох шарів і мати за своїм перерізом відмінності в мікроструктурі, елементному складі, співвідношенні складників своїх фаз тощо. У сталях типовою є дендритна будова зони оплавлення, причому дендрити ростуть перпендикулярно межі поділу в напрямку відводу тепла в тіло зразка. Карбіди при цьому зазвичай розчиняються, й основним структурним складником є мартенсит.

Під час оплавлення чавунів графіт розчиняється в розплаві, і після кристалізації форму-

ється дрібнодисперсна структура білого чавуну. Ступінь розчинення графіту залежить від його виду (пластинчастий, кульовий) і тривалості термічного циклу. Виділення газів, адсорбованих графітом, часто призводить до утворення пір (як це видно на рис. 2б). Поширеними дефектами є також тріщини.

Зони загартування сталі у твердому стані неоднорідні за перетином. Як і впливає із загальних положень, у глибині поряд із мартенситом є елементи вихідної структури: ферит (для доевтектоїдної сталі) і цементит (для заевтектоїдної сталі), а ближче до поверхні після охолодження гомогенізованого аустеніту формується мартенсит і залишковий аустеніт. Перекристалізація супроводжується подрібненням зерна й гомогенізацією аустеніту, особливо якщо проводити її протягом достатнього часу без сильного перегріву, тобто з витримкою при температурі вище за T_a . Розчинення надлишкового цементиту при перегріві заевтектоїдних сталей призводить до підвищення частки залишкового аустеніту і зниження мікротвердості порівняно із зоною оптимального нагріву, що містить поряд із мартенситом нерозчинені карбіди.

При лазерному загартуванні без оплавлення фазові перетворення в мат-риці чавунів пов'язані з її структурою та зі ступенем насиченості її вуглецем. Найбільшою мірою матриця насичується вуглецем поблизу скупчень графіту, особливо якщо вони мають розвинену поверхню й достатньо довгий час нагрівання. Мікротвердість у зоні загартування, зважаючи на велику неоднорідність структури, відрізняється великим діапазоном значень (від 3000 до 9000 МПа), причому у феритних чавунах мікротвердість завжди менша, ніж у перлітних.

Ступінь загартування передусім характеризується твердістю матеріалу. Кожна зона обробленої лазерним випромінюванням смуги має свою мікротвердість, і, як правило, розподіл мікротвердості за глибиною матеріалу має вигляд, зображений на рис. 1б.

Глибина зміцненого шару також залежить від нанесених на зміцнювану поверхню поглинаючих покриттів. У разі їх правильного підбору для конкретної сталі значно підвищується ступінь поглинання поверхнею матеріалу лазерного випромінювання, що призводить до збільшення глибини зміцненого шару (рис. 3) [5]. Для випадку збільшення швидкості обробки ($v > 66$ мм/с) при заданих параметрах лазерного зміцнення оплавлення поверхні дослідного зразка не відбувається.

Під час лазерної обробки сплавів спостерігається велика нерівномірність розподілу температури, що призводить до значної структурної неоднорідності за товщиною та шириною зони лазерного впливу (далі – ЗЛВ). Це може викликати значну неоднорідність розподілу залишкових напружень за товщиною та шириною ЗЛВ і призвести до деформації виробів.

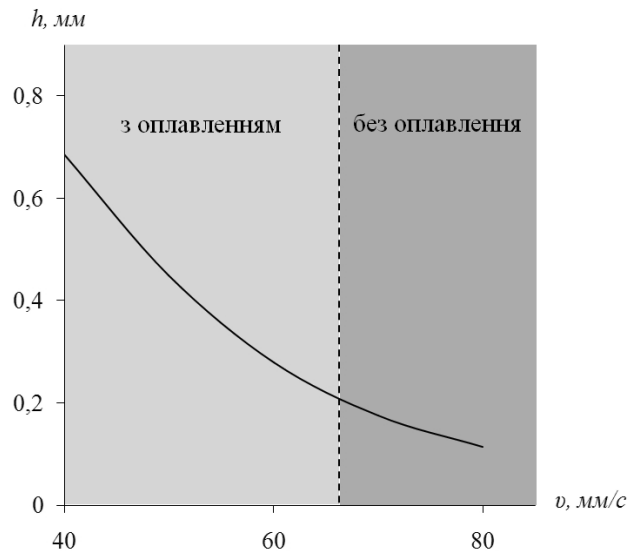


Рис. 3. Вплив швидкості лазерної обробки на глибину ЗЛВ сталі 45 ($P = 3,1$ кВт, поглинаюче покриття – сажа)

В основному аналізувалися залишкові напруження, що діють у поперечному напрямку – σ_y . Перевірка показала, що характер розподілу поздовжніх напружень σ_x аналогічний.

На рис. 4 представлені криві розподілу залишкових напружень σ_y в технічному залізі на різній відстані від центру зміцненої смуги залежно від потужності лазерного випромінювання [11]. Як випливає з отриманих результатів, на поверхні зразків, оброблених випромінюванням CO_2 -лазера безперервної дії, спостерігається неоднорідний розподіл залишкових макронапружень, причому є певна симетричність щодо центру смуги. За потужності випромінювання $P_0 = 0,9$ і $1,3$ кВт (обробка без оплавлення поверхні) в центрі смуги виникають незначні розтягувальні напруження $\sigma_y \sim 70$ Н/мм². На межі з неопромінених поверхнею ЗЛВ по обидві її боки розтягувальні напруження зростають до $170 \dots 270$ Н/мм², а в разі віддалення від центру смуги в неопромінену шліфовану поверхню напруження плавно знижуються до $\sigma_y = -50 \dots -70$ Н/мм². Перехід до лазерної обробки з оплавленням поверхні змінює вид розподілу залишкових напружень. На поверхні оплавленого металу в

центрі смуги напруження знижуються до нуля при $P_0 = 3$ кВт і $\sigma_y = -90$ Н/мм² при $P_0 = 2$ кВт, а на межі вони збільшуються до 240...290 Н/мм². Крім того, у разі підвищення потужності разом зі збільшенням ширини зміцненої смуги ділянка розтягувальних напружень віддаляється від центру смуги на більшу відстань.

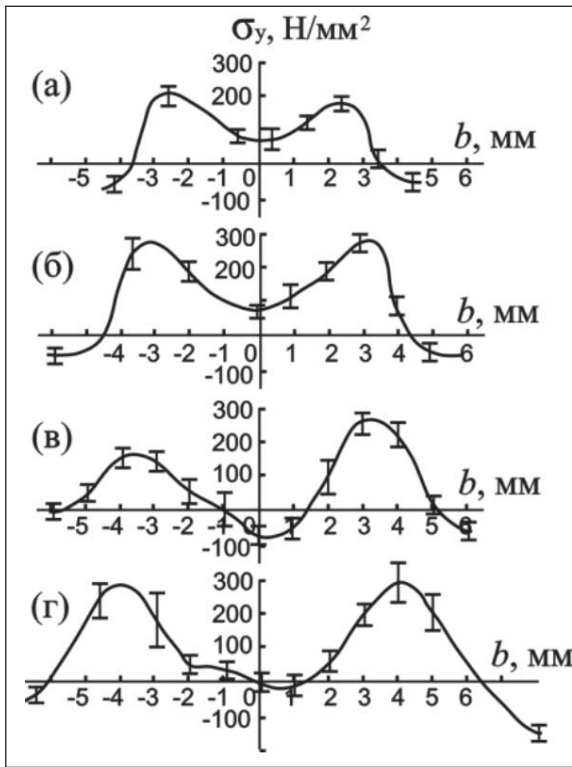


Рис. 4. Розподіл залишкових напружень σ_y на поверхні технічного заліза залежно від відстані від центру смуги під час обробки зі швидкістю $v = 2$ м/хв. і різною потужністю: (а) – 0,9 кВт; (б) – 1,3 кВт; (в) – 2 кВт; (г) – 3 кВт.

Під час лазерної обробки залізвуглецевих сплавів на стадії охолодження взаємодія стискувального об'єму металу в ЗЛВ з холодним неопроміненим об'ємом призводить до формування в ЗЛВ розтягувальних напружень, а взаємодія розтягувального об'єму мартенситу з вихідною структурою – стискувальних напружень.

Аналіз результатів дослідження показав, що в разі підвищення потужності випромінювання змінюється не тільки величина напружень у центрі смуги, а й характер їх розподілу в поперечному напрямку.

Величина і знак залишкових напружень на поверхні зміцнених лазером смуг залежать від співвідношення об'ємних змін, зумовлених тепловим впливом і структурними перетвореннями. Утворення в процесі охолодження досить насиченого вуглецем мартенситу призводить до

формування в центрі смуги сталей 45, 40Х та інших стискувальних залишкових напружень. Зменшення вмісту вуглецю в мартенситі призводить до зменшення об'ємного ефекту при охолодженні й частки стискувальних напружень на поверхні.

Використання сканування лазерного випромінювання поперек руху з частотою в декілька сотень герц дає змогу створити необхідний розподіл щільності потужності на оброблюваній поверхні, збільшити геометричні розміри зміцнених смуг, підвищити однорідність структури в них. Разом із тим після лазерного гартування широкими смугами на велику глибину через значні внутрішні залишкові напруження недостатньо масивні й жорсткі вироби істотно деформуються та виникає потреба вживання спеціальних заходів для ліквідації залишкових напружень.

Висновки. У роботі розглянуто особливості формування мікроструктури в зоні лазерного впливу для залізвуглецевих сплавів, показано розподіл мікротвердості за глибиною гартування відповідних зразків і наведено залежність глибини зони лазерного впливу від швидкості лазерної обробки. Для випадку збільшення швидкості обробки ($v > 66$ мм/с) при заданих параметрах лазерного зміцнення оплавлення поверхні дослідного зразка не відбувається.

Як впливає з отриманих результатів, на поверхні зразків, оброблених випромінюванням СО₂-лазера безперервної дії, спостерігається неоднорідний розподіл залишкових макронапружень, причому є певна симетричність щодо центру смуги.

Крім того, в разі підвищення потужності разом зі збільшенням ширини зміцненої смуги ділянка розтягувальних напружень віддаляється від центру смуги на більшу відстань.

Використання сканування лазерного випромінювання поперек руху з частотою в декілька сотень герц дає змогу створити необхідний розподіл щільності потужності на оброблюваній поверхні, збільшити геометричні розміри зміцнених смуг, підвищити однорідність структури в них.

Отже, залізвуглецеві сплави, що використовуються вітчизняними виробниками деталей сільськогосподарської техніки, можуть ефективно оброблятися лазерним випромінюванням, що, у свою чергу, може забезпечити значне підвищення експлуатаційних характеристик відповідних виробів.

Список літератури:

1. Черненко В.С., Кіндрачук М.В., Дудка О.І. Променеві методи обробки: навчальний посібник. Київ, 2008. 166 с.
2. Бобрицький В.М. Підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.04. Київ, 2007. 20 с.
3. Пашкова Г.І. Підвищення працездатності чавунних колінчастих валів потужних транспортних дизелів комбінованими методами зміцнення: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.01 Харків, 2008. 24 с.
4. Завойко О.С. Дослідження лазерного зміцнення колінчатих валів та механіко-термічної обробки при руйнуванні на втому та знос. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2014. Т. 15. № 4. С. 846–855.
5. Ковальчук Ю.О., Невзоров А.В., Кравченко В.В. Застосування лазерної обробки сталі 45 для підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарських машин. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. 2015. Вип. 3. С. 171–176.
6. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учебное пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца. 2-е изд., стереотип. Москва, 2008. 664 с.
7. Огин П.А. Структура и свойства зон перекрытия при лазерной закалке сталей и чугунов. *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2015. № 2 (32-2). С. 130–135.
8. Бирюков В.П. Повышение износостойкости деталей сельскохозяйственной техники и почвообрабатывающих орудий лазерным упрочнением и наплавкой. *Лазерные технологии в сельском хозяйстве: тематический сборник*. Москва, 2008. С. 256–264.
9. Буханова И.Ф., Дивинский В.В., Журавель В.М. Применение лазерного излучения для упрочнения и восстановления деталей сельскохозяйственного машиностроения. *Лазерные технологии в сельском хозяйстве: тематический сборник*. Москва, 2008. С. 264–270.
10. Огин П.А. Повышение эксплуатационных характеристик деталей из чугунов с применением закалки оптоволоконным лазером. *Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института. Серия «Технические науки»*. 2015. № 12 (55). С. 55–58.
11. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В.Я. Панченко. Москва, 2009. 664 с.

АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ИЗ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

В статье рассмотрены особенности формирования микроструктуры в зоне лазерного воздействия для железоуглеродистых сплавов в результате применения метода поверхностной лазерной обработки. Показано распределение микротвердости по глубине закалывания соответствующих образцов при обработке лазером непрерывного действия. Приведена зависимость глубины зоны лазерного воздействия от скорости лазерной обработки. Определена скорость перемещения лазерного луча по поверхности образца, при которой появляется зона плавления. Показано распределение остаточных напряжений на поверхности железоуглеродистых сплавов, возникающих в результате лазерной обработки.

Ключевые слова: метод поверхностной лазерной обработки, зона лазерного воздействия, упрочнение, закалывание, остаточные напряжения.

ANALYSIS OF RESIDUAL STRESSES AS A RESULT OF LASER TREATMENT OF AGRICULTURAL TECHNICS DETAILS FROM IRON-CARBON ALLOYS

Features of formation of a microstructure in a zone of laser influence for iron-carbon alloys as a result of application of a method of superficial laser processing are considered. The microhardness distribution over the depth of hardening of the corresponding samples treated at continuous laser is shown. The dependence of the depth of the zone of laser influence on the speed of laser processing is given. The moving speed of the laser beam on the sample surface, at which the melting zone appears, is determined. The distribution of residual stresses on the surface of iron-carbon alloys resulting from laser processing is shown.

Key words: method of surface laser treatment, laser treatment zone, hardening, tempering, residual stresses.