

SECTION 7. MECHANICAL ENGINEERING

DOI: 10.46299/ISG.2025.MONO.TECH.2.7.1

7.1 Лазерне зміцнення деталей сільськогосподарської техніки

Питання збільшення ресурсу виробітку різноманітних деталей сільськогосподарської техніки нині не втрачає своєї актуальності. Забезпечення вищої міцності тих зон деталей, які найбільше піддаються зносу, є однією із першочергових задач, що стоять перед виробниками сільськогосподарської техніки.

На даний момент у виробництві багатьох країн світу для зміцнення виробів із сталі та сплавів ефективно використовується метод поверхневої лазерної обробки. Тому має сенс дослідження можливості ефективного застосування на практиці методу поверхневої лазерної обробки для зміцнення відповідних деталей машин у галузі сільського господарства.

Для цього необхідно звернути увагу на особливості використання даного методу та дослідити ефективність його застосування для зміцнення зон найбільшого зносу і вплив на ресурс виробітку відповідних деталей сільськогосподарської техніки.

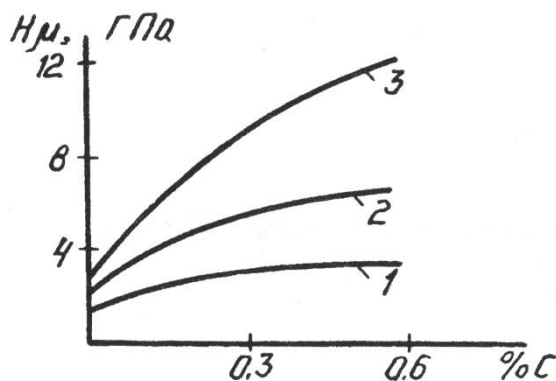
7.1.1 Застосування лазерного зміцнення сталі 65Г для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних знарядь

Для виробників ґрунтообробних машин важливою задачею є забезпечення вищої міцності тих зон робочих органів, які найбільше піддаються зносу. Внаслідок абразивного зношування робочих поверхонь відбувається втрата первинної форми різальних елементів, що призводить до збільшення тягового опору ґрунтообробних машин та витрат паливно-мастильних матеріалів. Виникає потреба в заточуванні або заміні зіпсованих деталей.

Зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин може успішно здійснюватися за допомогою методу поверхневої лазерної обробки [334-338].

Для виготовлення робочих органів ґрунтообробних машин в абсолютній більшості випадків використовується сталь 65Г [334]. Тому актуальним є дослідження властивостей цієї сталі після лазерного зміцнення.

Як відомо, лазерне зміцнення сталі забезпечить тим вищу твердість матеріалу, чим більший вміст у сталі вуглецю (рис. 1) [336].



1 – без зміцнення; 2 – звичайне гартування; 3 – лазерне гартування

Рисунок 1. Вплив вуглецю на твердість сталей

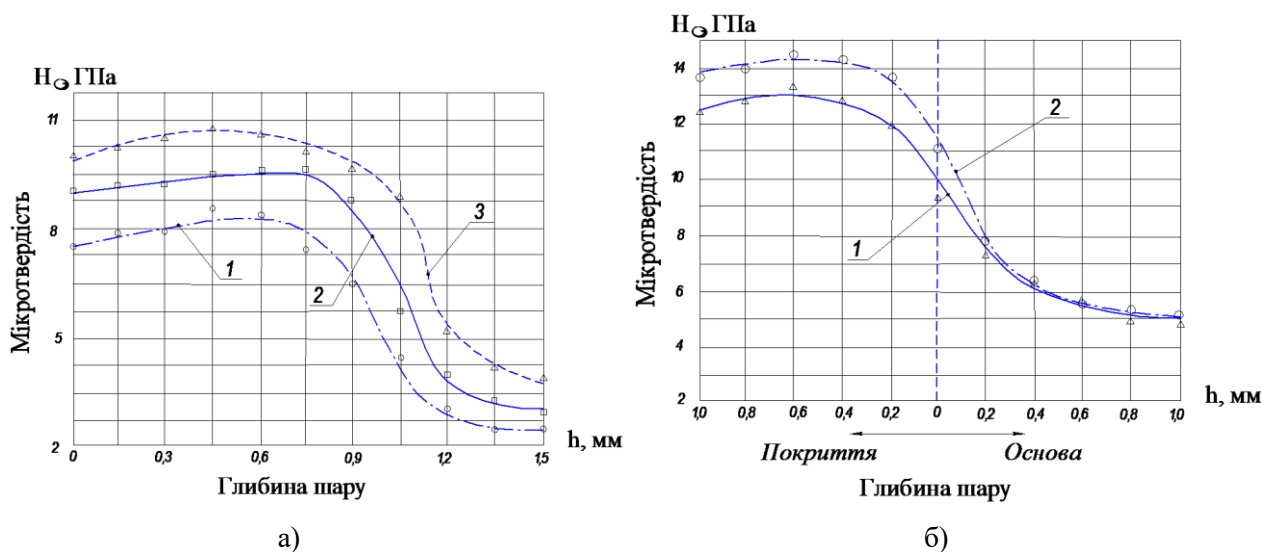
З цих позицій застосування лазерного зміцнення сталі 65Г є більш ефективним, ніж інших сталей з меншим вмістом вуглецю, таких як 45 чи Л53.

При дослідженні методу поверхневої лазерної обробки робочих органів ґрунтообробної техніки, виготовлених із сталі 65Г, необхідно обґрунтувати раціональні режими лазерної обробки для отримання потрібних властивостей і оптимальної товщини зміцненого шару з метою створення умов самозагострювання та провести комплекс досліджень властивостей зміцнених поверхневих шарів зразків деталей робочих органів ґрунтообробних машин.

Доцільність застосування технологій лазерного зміцнення різальних елементів при виготовленні деталей робочих органів ґрунтообробних машин показали стендові та експлуатаційні дослідження, які виявили підвищення їх зносостійкості, реалізацію ефекту самозагострювання і подовження ресурсу.

Відомо, що у процесі зношування поверхонь робочих органів та для реалізації умов самозагострювання під час їх зміцнення важливим фактором є глибина зміцненого шару, на яку впливають параметри поверхневої лазерної обробки.

В результаті застосування лазерного зміцнення таких сталей, як 45, Л53 та 65Г видно, що найбільшу мікротвердість по глибині зміцненого шару серед них має сталь 65Г (рис. 2а) [335], так як в ній найбільше міститься вуглецю, що підтверджує наведену вище закономірність (див. рис. 1). У випадку лазерного наплавлення на сталь 65Г покриття зі сплаву ПС-14-60 досягається збільшення мікротвердості у наплавленому шарі, а додавання карбіду бора у даний сплав (ПС-14-60 + 6%B₄C) дозволяє отримати ще більше підвищення мікротвердості поверхні зміцненого матеріалу (рис. 2б) [335].



- а) – розподіл мікротвердості в сталях після лазерного зміцнення ($q = 8 \cdot 10^7$ Вт/м²; $\tau = 0,3$ с):
1 – сталь 45, 2 – сталь Л53, 3 – сталь 65Г;
б) – розподіл мікротвердості в покриттях після лазерного наплавлення на сталь 65Г
сплаву ПС-14-60 (крива 1) та сплаву ПС-14-60 + 6%B₄C (крива 2)

Рисунок 2. Розподіл мікротвердості по глибині зміцненого шару

Дослідження специфічного впливу лазерного випромінювання на властивості зразків і деталей робочих органів ґрунтообробних машин, проведені в даній роботі [335], показують утворення дрібнодисперсної мартенситної структури, рівномірний розподіл карбідів і боридів в матриці поверхневого шару, перерозподіл атомів легуючих елементів і домішок у зонах лазерного впливу, зменшення піку сполуки Fe₂O₃ після лазерної обробки у порівнянні з об'ємною термообробкою, зменшення (до 5%) пористості шарів при лазерному наплавленні у порівнянні з наплавленням СВЧ; плавний перехід мікротвердості зміцненого шару до мікротвердості основи (максимальна мікротвердість при

лазерній термообробці складає 8–12 ГПа, а при лазерному наплавленні – 12–14 ГПа); підвищення міцності зчеплення шару наплавлених покриттів з основою.

Найменший лінійний знос та інтенсивність масового зносу за результатами стендових досліджень спостерігаються для дослідних зразків робочих органів зі сталі 65Г, зміцнених методом поверхневої лазерної обробки.

У порівнянні з об'ємним гартуванням лазерна термообробка дозволяє в 1,3–1,4 рази зменшити знос відповідних поверхонь робочих органів ґрунтообробних машин, а в порівнянні з базовою технологією індукційного наплавлення застосування лазерного наплавлення сплаву ПС-14-60 + 6%B₄C дозволяє зменшити знос у 1,7–1,8 рази. Застосування технології лазерного наплавлення з додаванням карбиду бора дозволяє тривалий час зберігати вихідну геометричну форму деталі. Застосування технологій лазерного зміцнення стримує підвищення тягового опору в процесі обробітку ґрунту робочими органами ґрунтообробних машин, що позитивно впливає на економію паливно-мастильних матеріалів.

Для створення зносостійких шарів на різальних елементах робочих органів ґрунтообробних машин та забезпечення реалізації ефекту самозагострювання існують розроблені технологічні схеми зміцнення з використанням методу поверхневої лазерної обробки. За рахунок зменшення енергетичних витрат при зміцненні та підвищенні ресурсу робочих органів спостерігається значний загальний економічний ефект від впровадження технології лазерного наплавлення у виробництво стрілочастих лап культиваторів.

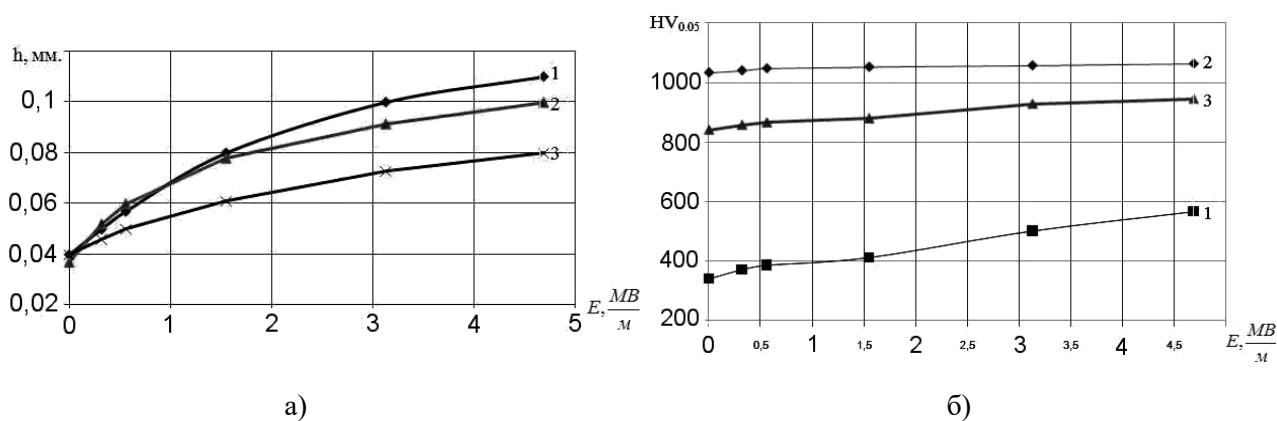
На даний момент вже розроблено технологію зміцнення дисків для борін зі сталі 65Г [338]. В ній пропонується додатково керувати процесом лазерного термозміцнення металів шляхом використання електростатичного поля. Розроблено методику розрахунку параметрів технологічних процесів термозміцнення, що застосовується на етапі технологічної підготовки виробництва, яка визначає умови досягнення заданої глибини термозміцнення металів під впливом лазерного випромінювання в електростатичному полі.

Наявність двох зон у поверхні металу показують результати мікроструктурного аналізу загартування сталі 65Г без оплавлення при впливі енергії накачування активного елемента лазера $W = 3,8$ КДж. Перша зона має структуру мартенситу, її мікротвердість становить $841 \text{ HV}_{0.05}$. Друга зона являє собою мартенсит і троостит, її мікротвердість складає величину $494 \text{ HV}_{0.05}$. Глибина зони термічного впливу становить $0,04$ мм.

Під впливом електростатичного поля під час лазерного загартування твердість першої зони зростає до $946 \text{ HV}_{0.05}$, а твердість другої зони майже не змінюється й становить $501 \text{ HV}_{0.05}$. При цьому глибина зони термічного впливу зростає до $0,08$ мм.

На цих дослідних зразках спостерігається різка границя переходу від зміцненої зони до матриці, зона термічного впливу виявляється чітко.

Певне збільшення мікротвердості й значне збільшення глибини зміцненої зони до 2-х разів у порівнянні зі звичайною обробкою спостерігається в результаті мікроструктурного аналізу сталей при обробці лазерним випромінюванням у режимах, близьких до температури плавлення й під впливом електростатичного поля напруженістю 5 МВ/м (рис. 3) [338].



а) – залежність глибини h ; б) – залежність твердості $\text{HV}_{0.05}$
1 – Сталь 10, $W = 3$ кДж; 2 – Сталь 65Г, $W = 4,5$ кДж; 3 – Сталь 65Г, $W = 3,8$ кДж

Рисунок 3. Залежність глибини h та твердості $\text{HV}_{0.05}$ зміцненої зони від напруженості електростатичного поля E

Аналіз отриманих даних показує, що чим більше вміст вуглецю й легуючих елементів в металі, тим менший вплив на твердість металу при імпульсному лазерному випромінюванні надає електростатичне поле.

Процес лазерного загартування відбувається в поверхневому шарі металу на глибину h . Для забезпечення впливу лазерного випромінювання на задану глибину з потрібною точністю необхідно забезпечити наявність прецизійної системи позиціонування оптики довгофокусного лазерного технологічного комплексу. Використовуючи високоточний фотоелектричний датчик кутового позиціонування оптичної системи можна забезпечити точне положення фокусу лазерного променя на поверхні деталі. До точності датчика пред'являються високі вимоги, що вимірюються десятками кутових секунд, що відповідає відхиленню плями на поверхні металу на десяті долі міліметра.

В інших дослідженнях впливу методу поверхневої лазерної обробки на показники зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин [338] проведено дослідницьку роботу з лазерного наплавлення матеріалів на ґрунтообробні знаряддя зі сталі 65Г, при цьому для просторового керування лазерним променем використовувався сканер. На поверхню дослідних зразків наносилася обмазка на водяній основі оксиетилцелюлози з порошком ФБХ6-2. Середня твердість матеріалу основи дослідних зразків становила 2200 МПа.

В результаті впливу на поверхню зразка № 1 лазерного променя потужністю 1400 Вт з частотою сканування 200–225 Гц був отриманий видозмінений шар, геометричні параметри якого визначаються зоною термічного впливу шириною 7 мм при глибині 1,1 мм, шириною легованого шару 4,5 мм. Глибина зони загартування із твердого стану становила 0,6 мм, а легованого шару – 0,3 мм. Також при цьому присутній невеликий шар наплавленого порошку товщиною 0,2–0,3 мм.

Для зразка № 2 геометричні параметри зони термічного впливу склали: ширина зони – 8,1 мм, ширина легованого шару – 5 мм, загальна глибина зон загартування, легування й наплавлення – 1,35 мм, у тому числі легованого шару – 0,5 мм і наплавленого шару 0,3–0,35 мм.

Результати дослідження їхньої мікротвердості наведені на рис. 4 [338]. У зразку № 2 мав місце більш глибокий перепад, тому швидкість охолодження матеріалу була нижча, що вплинуло на зменшення мікротвердості. У результаті обробки за першим режимом (зразок № 1) спостерігалась незначна зміна геометричних розмірів. Це важливо для практичної обробки деталей, оскільки при наплавленні ріжучої кромки ґрунтообробних знарядь геометрія робочої поверхні не повинна змінюватися.

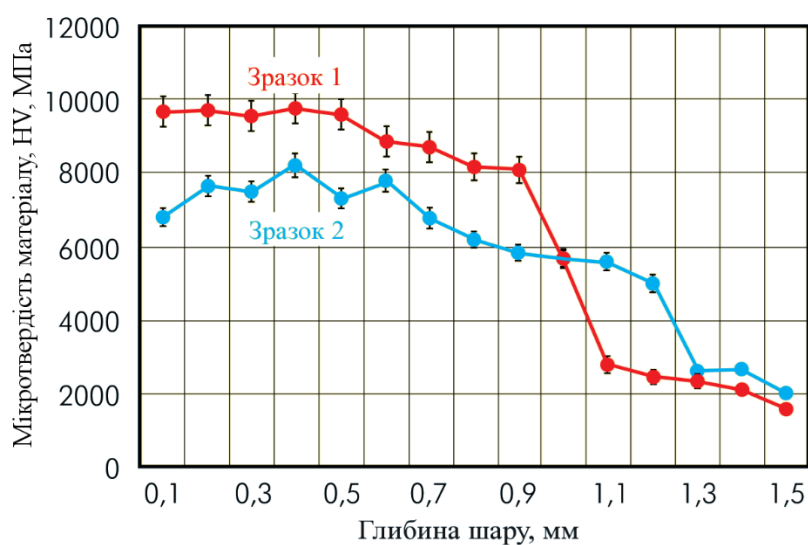


Рисунок 4. Залежність мікротвердості сталі від глибини зони лазерного впливу

Товщини шарів (наплавленого, легованого і загартованого), отриманих методом поверхневої лазерної обробки, достатні для зниження корозійного й абразивного зношування поверхні інструментів. У порівнянні із загартуванням зразків струмами високої частоти ці результати вищі в 3–5 разів, а в порівнянні з індукційним наплавленням такого ж порошку – вищі в 3–4 рази.

Крім цього, розроблено технологію зміцнення дисків для борін зі сталі 65Г [338], що включає в себе лазерне зміцнення та наплавлення. Відбувалось зміцнення зони шириною 15–16 мм, а ширина наплавленої зони становила 16–18 мм.

Випробування дослідних дисків разом із серійними відбувались в польових умовах. Величина лінійного зносу за висотою для дослідних дисків борін, зміцнених лазерним випромінюванням, зменшилась на 82% порівняно із

серійними дисками, а для дисків, зміцнених лазерним наплавленням, зменшилась на 70%. Дослідні диски у порівнянні із серійними мали менший знос за масою на 31%.

На твердість сталі, що різними авторами у своїх дослідженнях піддавалась лазерному зміцненню, також додатково впливають такі фактори, як тип лазерного технологічного комплексу, частота та час дії зміцнюючого лазерного випромінювання тощо.

Також існує методика, коли за один прохід у декілька разів збільшується ширина лазерної доріжки зміцнення при незмінній потужності лазера шляхом відмови від традиційної круглої форми фокальної плями і переходу до плями у формі вузької смужки, переміщуваної перпендикулярно своїй довгій стороні [337]. Зміна форми фокальної плями призводить до зміни термічного циклу нагрівання і охолодження оброблюваного матеріалу. У випадку забезпечення рівності інтенсивностей і швидкостей переміщення джерел нагрівання по поверхні оброблюваної деталі час нагрівання і теплонасичення для джерела смужкової форми менші, а градієнт температури і швидкість охолодження вищі, ніж для джерела круглої форми і такої ж площі.

Використання динамічного фокусатора дозволяє у випадку обробки деталей, розміри яких більше довжини лазерної смужки, сформувати смужковий пучок із спеціальним неоднорідним розподілом інтенсивності за довжиною смужки, при якому інтенсивність до кінців смужки збільшується за певним законом. У цьому випадку обробка поверхні деталі повинна проводитись смугами впритул, без накладання.

У випадку застосування смужкового лазерного пучка у порівнянні з обробкою пучком круглої форми тієї ж потужності забезпечується при цілком достатній для практики глибині зміцненого шару 0,5–0,7 мм збільшення у 2–4 рази площі оброблюваної поверхні за одиницю часу (залежно від режиму обробки).

Застосовування динамічних фокусаторів смужкового випромінювання розширяє можливості використання методу лазерного зміцнення також і для

робочих органів ґрунтообробних машин, підвищуючи його продуктивність та конкурентоспроможність.

На ефективність процесу лазерного зміцнення також суттєво впливає вибір типу лазера. У випадку використання волоконних лазерів ефективність процесу зміцнення з урахуванням потужності випромінювання лазера, глибини гартування та швидкості руху виробу порівняно із ефективністю CO₂-лазера може збільшуватися у 12 раз [338], що також підвищує конкурентоспроможність даного методу.

Отже, сталь 65Г, що використовується вітчизняними виробниками робочих органів ґрунтообробних машин, може успішно піддаватись лазерному зміцненню та наплавленню, що забезпечить значне підвищення зносостійкості цих знарядь. Такі заходи, як додавання карбідів бора у сплави для наплавлення на сталь, додаткове застосування під час лазерного зміцнення електростатичного поля, використання волоконних лазерів та лазерного пучка смужкової форми дозволять ще більше підвищити рівень зносостійкості робочих органів відповідних машин та забезпечити ефективне впровадження методу поверхневої лазерної обробки у виробництво.

7.1.2 Використання лазерного зміцнення сталі 45 для підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарської техніки

Метод поверхневої лазерної обробки може застосовуватися для різноманітних деталей сільськогосподарської техніки.

Багато деталей сільськогосподарської техніки, до яких висуваються відповідні вимоги щодо міцності та зносостійкості, виготовляються зі сталі 45. До них належать різноманітні деталі тракторів, комбайнів, засобів механізації тваринництва та інших сільськогосподарських машин, такі як колінчаті, розподільчі та шліцеві вали, складові кривошипно-шатунного механізму, шестерні, зубчаті колеса, зірочки, плунжери тощо.

Тому аналіз впливу методу поверхневої лазерної обробки на властивості сталі 45 з метою збільшення ресурсу виробітку відповідних деталей сільськогосподарської техніки є актуальним та важливим.

Для детального дослідження впливу потужного лазерного випромінювання на поверхню сталі 45 потрібно мати чіткі уявлення про всі ті внутрішні процеси, що при цьому відбуваються.

Тому розглянемо особливості формування мікроструктури в зоні лазерного впливу (ЗЛВ) для сталі 45 [339]. У процесі лазерного термозміцнення даної сталі ступінь завершеності аустенітизації визначається максимальними температурами, до яких нагріваються ті чи інші зони, швидкостями нагрівання й охолодження, а також часом перебування при температурах вище A_{c1} . У верхніх шарах, нагрітих до температур плавлення й біясолідусних температур (зона оплавлення та верхня частина зони термічного впливу (ЗТВ)), відбувається повне перетворення надлишкового фериту в аустеніт і повне насичення колишніх феритних ділянок вуглецем. При цьому в процесі охолодження утворюється дрібнодисперсний мартенсит з рельєфними границями між пластинами, а в деяких випадках – з невеликою кількістю бейніту.

У нижніх шарах, нагрітих до більш низьких температур, насичення вуглецем колишніх феритних ділянок відбутися не встигає. Це призводить до зниження стійкості аустеніту, збільшення критичної швидкості охолодження, а при порівняно невисоких швидкостях охолодження металу цієї зони – утворення трооститної, трооститоферитної або феритної сіток.

При різних швидкостях обробки спостерігається деяка відмінність у формуванні термозміцненої зони. В основному це стосується зони гартування із твердого стану.

У випадку високої швидкості обробки дифузійний перерозподіл вуглецю між надлишковим феритом і перлітними колоніями вповільнюється. В результаті цього мартенсит, що утворюється на місці перлітних колоній, може мати концентрацію вуглецю, близьку до евтектоїдної. Частина цементитних пластин у перліті залишається нерозчиненою; біля них у збагачених вуглецем ділянках

утворюється мартенсит і деяка кількість аустеніту, а в центральній частині, де твердий розчин мало насичений вуглецем, – низьковуглецевий мартенсит.

Загальний вид ЗЛВ нормалізованої сталі 45 показаний на рис. 5. При режимах з високими швидкостями охолодження в зоні оплавлення та у верхній частині ЗТВ нормалізованої сталі 45 утворюється дрібнодисперсний мартенсит з рельєфними границями між пластинами (рис. 6, *а* та *б*). Очевидно, це рейковий мартенсит, можливо, з деякою кількістю бейніту. Мікротвердість зони оплавлення коливається в межах від 7000 до 8500 МПа, причому більш високі її значення спостерігаються в нижній частині зони, що можна пояснити більшою швидкістю охолодження. Зі збільшенням глибини ЗТВ неоднорідність структури зростає: спочатку утворюється мартенситотроостит (див. рис. 6, *б*), а потім – мартенсит і трооститна сітка, що переходить у трооститоферитну (рис. 6, *в*) і на границі з вихідною структурою – у феритну (рис. 6, *г*).

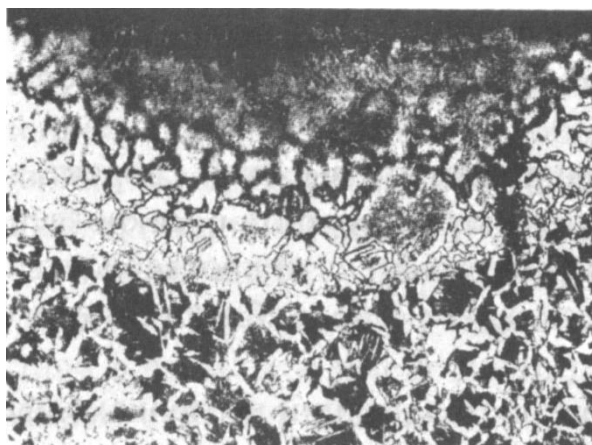


Рисунок 5. Загальний вигляд ЗЛВ нормалізованої сталі 45

При малій швидкості обробки під зоною оплавлення у верхній частині ЗТВ утворюється вузький шар однорідного мартенситу. У цьому шарі, нагрітому до високої температури, відбувається повне перетворення надлишкового фериту в аустеніт та повне насичення цих ділянок вуглецем. На більшій частині ЗТВ формується відносно однорідна мартенситна структура. Для нормалізованої сталі 45 у верхніх шарах ЗТВ із мікротвердістю $H_{50} = 7300 \pm 200$ МПа довжина пластин мартенситу більша, чим у середніх. У середині ЗТВ мікротвердість

знижується до 5320 МПа , що може бути обумовлено наявністю трооститу. У нижній частині ЗТВ існує область, у якій поруч із мартенситом є сітки трооститу, трооститофериту та фериту. Мікротвердість мартенситу в області трооститної сітки $H_{50} = 7520 \text{ МПа}$, а в області феритної – 6440 МПа . Це свідчить про меншу насиченість твердого розчину при аустенізації.

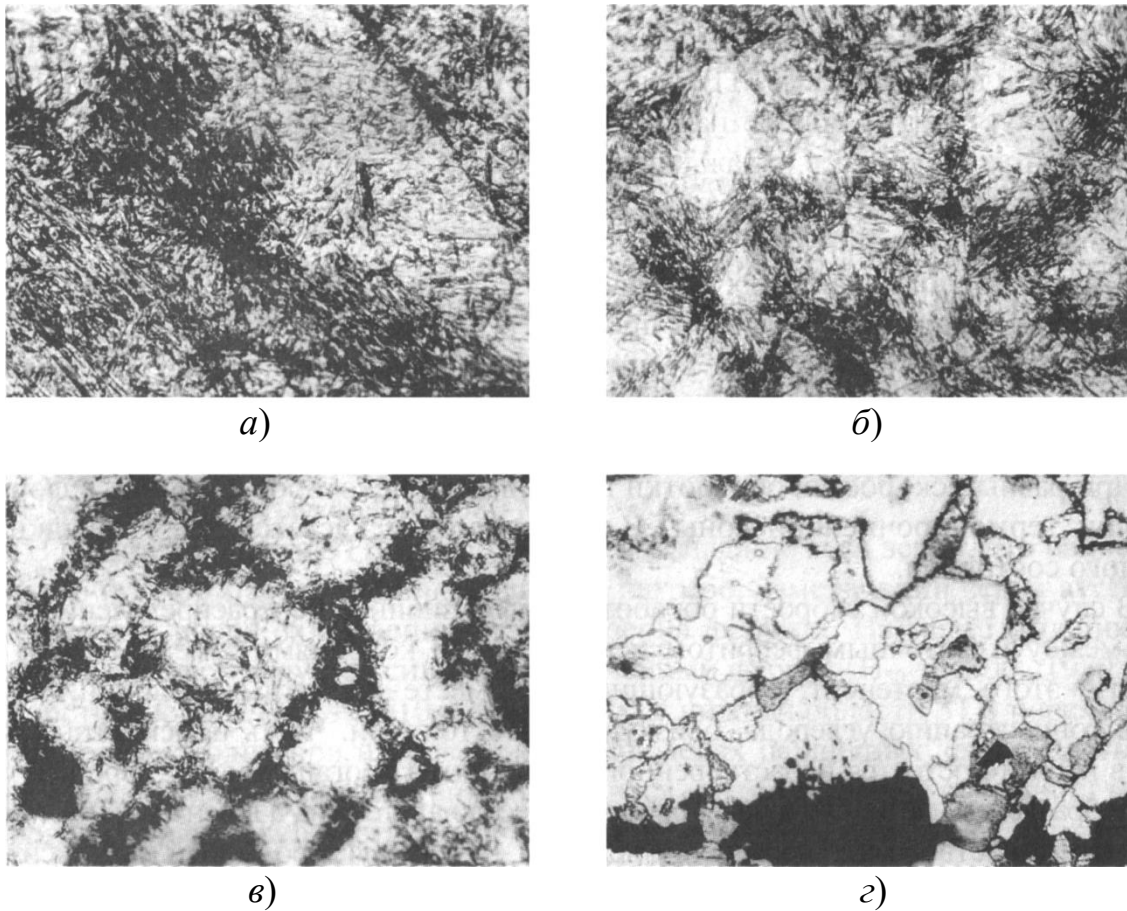


Рисунок 6. Мікроструктура різних шарів ЗЛВ нормалізованої сталі 45 (x400):

a – зона оплавлення; *б* – верхня частина ЗТВ; *в* – середина ЗТВ;
з – нижня частина ЗТВ

При виборі режимів лазерної обробки сталі 45 необхідно враховувати зазначені закономірності формування структури ЗЛВ.

Так як після гартування сталі твердість мартенситу різко зростає, то для реалізації цього процесу доцільно використовувати безперервне лазерне випромінювання та здійснювати зміцнення при невисоких швидкостях.

Слід враховувати, що при лазерній обробці нормалізованої або відпаленої сталі без оплавлення з підвищеними швидкостями або при імпульсному гартуванні область однорідного мартенситу відсутня і трооститоферитна сітка навколо мартенситу може досягати поверхні зразка, що призводить до зниження загальної твердості ЗЛВ.

Необхідно мати на увазі, що при лазерному гартуванні сталі після її поліпшення, тобто після гартування та високого відпуску, область однорідного мартенситу збільшується.

У процесі застосування поверхневого лазерного зміцнення з оплавленням поверхні твердість двох перших шарів зони нагріву сталі збільшується з ростом вмісту вуглецю в сталі (рис. 7) [336]. Причиною цього є збільшення ступеня тетрагональності мартенситу в сталі 45 щодо сталі 20.

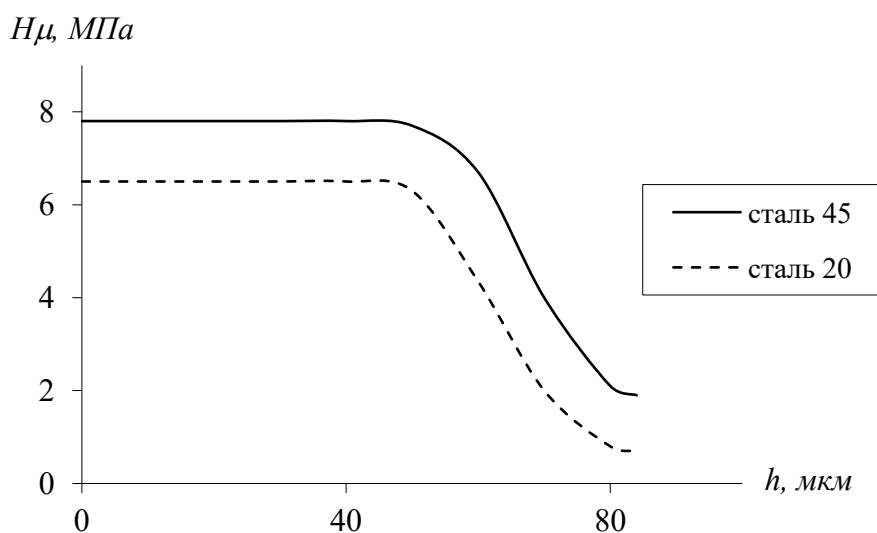


Рисунок 7. Твердість зон нагріву на вуглецевих сталях

Відомо, що під час лазерного зміцнення деталей сільськогосподарської техніки важливим фактором впливу на їх ресурс виробітку є глибина зміцненого шару, яка залежить від параметрів поверхневої лазерної обробки, нанесених на зміцнювану поверхню поглинаючих покриттів тощо. Зокрема, глибина ЗЛВ зростає при збільшенні потужності лазерного випромінювання під час зміцнення сталі 45 (рис. 8) [339].

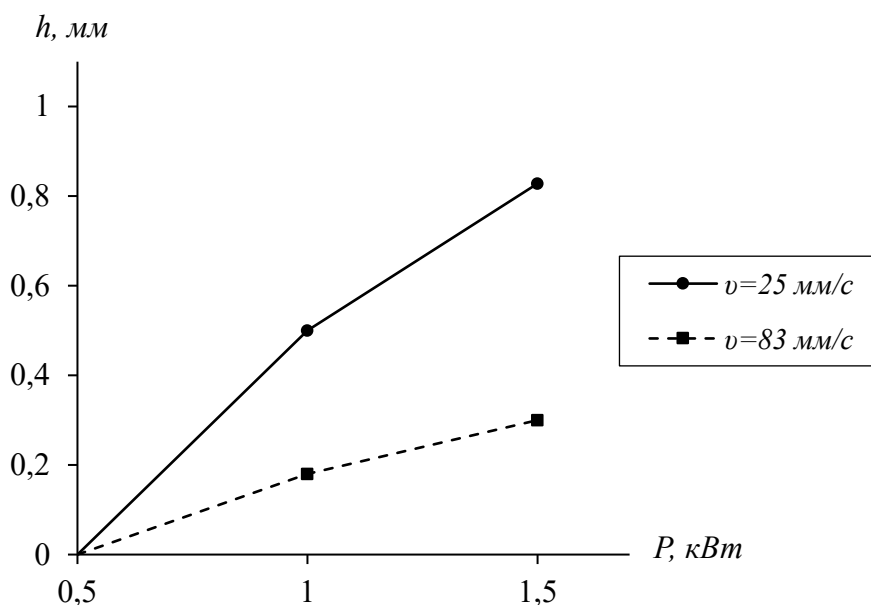


Рисунок 8. Залежність глибини ЗЛВ сталі 45 від потужності
лазерного випромінювання

Значення глибини ЗЛВ на полірованому зразку зі сталі 45 при використанні різних поглинаючих покриттів зображені на рис. 9 [339]. Слід зазначити, що ефективність застосування поглинаючих покриттів та в цілому лазерного зміцнення залежить також від швидкості обробки, що визначає час впливу лазерного випромінювання та температуру відповідної поверхні. При збільшенні швидкості лазерної обробки ($v > 6$ мм/с) оплавлення поверхні дослідного зразка не відбувається. Найкращі результати мають місце у випадку застосування покриттів, що містять оксиди алюмінію та цинку, а також сажу у вигляді аерозолі (криві 1-4). При цьому відбувається значне збільшення глибини ЗЛВ.

Також лазерне гартування сталі 45 при використанні даних поглинаючих покриттів може успішно використовуватись і при вищих швидкостях обробки, але при цьому відбувається значне зменшення глибини зміцненого шару (рис. 10) [339].

Безумовно, розглянуті вище приклади лазерного гартування сталі 45 при використанні різних поглинаючих покриттів не охоплюють всіх можливих випадків. Питання розробки нових, більш ефективних, дешевих та технологічних

покриттів для лазерної поверхневої обробки сталі не можна вважати вирішеним, необхідно й надалі продовжувати дослідження в даному напрямку.

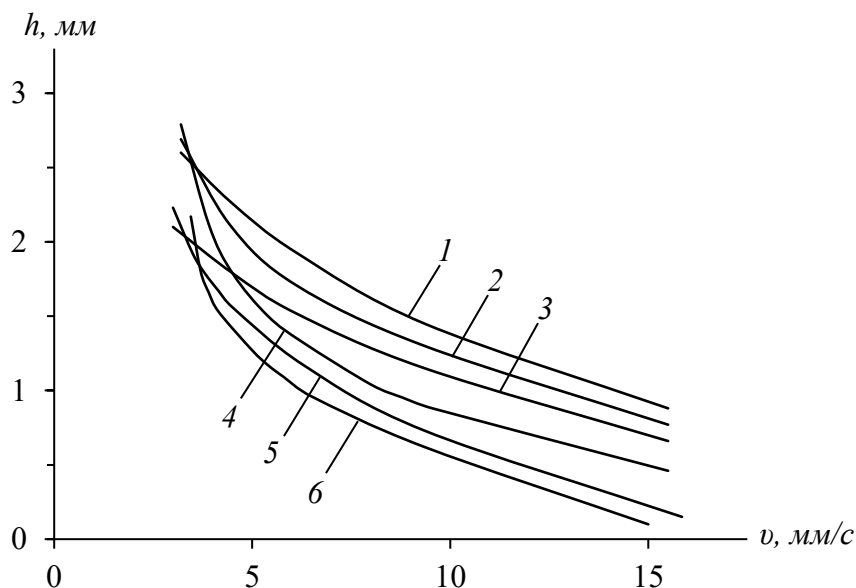


Рисунок 9. Зміна глибини ЗЛВ на полірованій сталі 45 при дослідженні різних поглинаючих покриттів ($E \cong 20 \text{ MBm/m}^2$): 1 – аерозольна сажа; 2 – Al_2O_3 з органічним сполучником; 3 – водяний розчин ZnO ; 4 – ZnO з органічним сполучником; 5 – водяний розчин сажі; 6 – розчин графіту в ацетоні

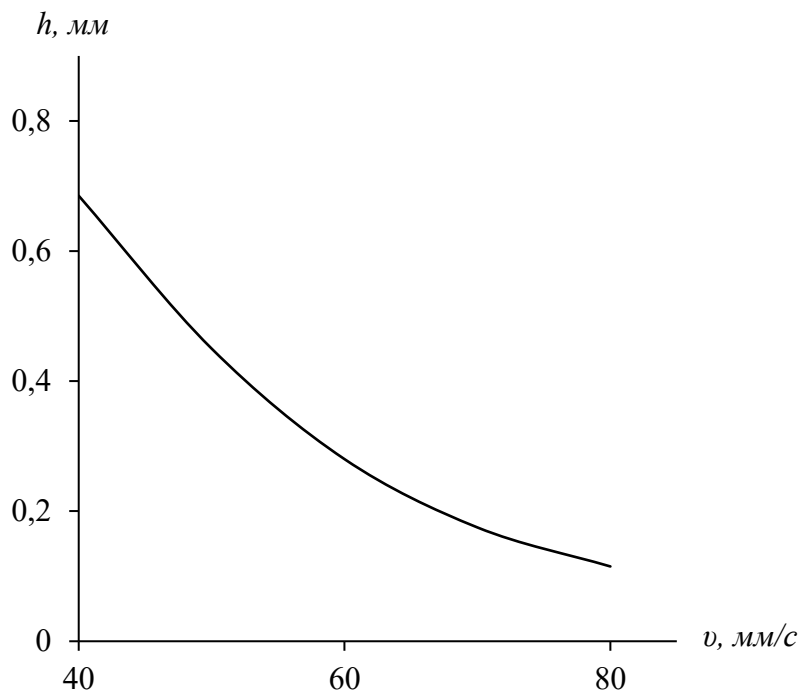


Рисунок 10. Залежність глибини ЗЛВ сталі 45 від швидкості обробки ($P=3,1 \text{ кВт}$, поглинаюче покриття – аерозольна сажа)

Для вибору режиму обробки методом поверхневого лазерного впливу використовується вуглецевий еквівалент, який впливає на мікротвердість оброблюваного зразка та визначається в залежності від масової частки в ньому таких елементів, як C, Mn, Si, Ni, Cr, Mo [339].

Використання лазерного гартування дозволяє також підвищити зносостійкість пар тертя сільськогосподарської техніки, що працюють як в умовах сухого тертя, так і в абразивно-масляному середовищі [339]. Зменшення зношування деталей після лазерного гартування обумовлене рядом факторів: великою твердістю поверхні, високою дисперсністю структури, збільшеними несучими властивостями поверхні, зменшеним коефіцієнтом тертя тощо.

Поряд із цим на зносостійкість впливає нерівномірність властивостей локальних ділянок обробленої поверхні. Зміцнення з перекриттям, а також нанесення окремих плям або доріжок лазерного зміцнення призводить до утворення знеміцнених та незміцнених ділянок у місцях, де метал опромінювався два та більше разів або зовсім не опромінювався. Ці ділянки можуть бути місцями релаксації залишкових структурних та термічних напружень. Крім того, часткове випаровування матеріалу в ЗЛВ викликає утворення мікрозаглиблень, в яких утримується мастило. Це також сприяє збільшенню зносостійкості при роботі пар тертя.

В умовах тертя ковзання сталі 45, загартованої лазерним безперервним випромінюванням без оплавлення, по загартованій і низьковідпущеній сталі ШХ15 зношування й коефіцієнт тертя суттєво знижуються в порівнянні зі звичайним гартуванням сталі 45. Також після застосування методу поверхневої лазерної обробки різко зменшується час припрацювання пар тертя (рис. 11).

Зносостійкість в умовах тертя зі змащенням також підвищується в порівнянні з іншими видами термозміцнення. Після лазерного гартування сталі 45 інтенсивність зносу в 2-3 рази менша, чим після нормалізації та на 7...37 % менша, чим після гартування струмами високої частоти (рис. 12).

При переході від обробки з оплавленням поверхні до обробки без оплавлення інтенсивність зношування різко зменшується.

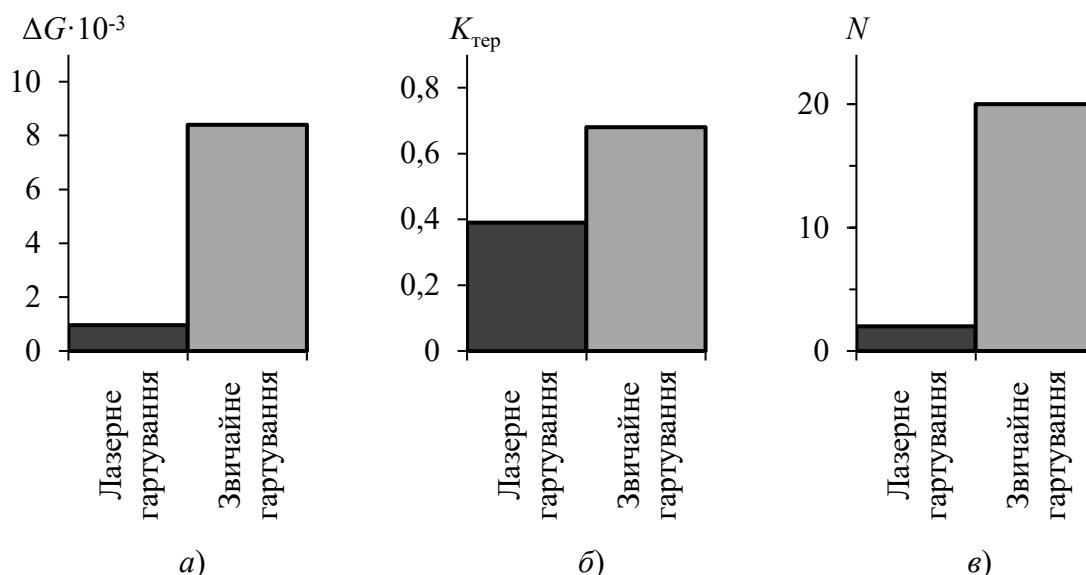


Рисунок 11. Порівняння відносного зносу (а), коефіцієнту тертя (б) та числа циклів до припрацювання пар тертя (в) для звичайного та лазерного гартування сталі 45 ($P=1 \text{ кВт}$, $v=25 \text{ мм/с}$)

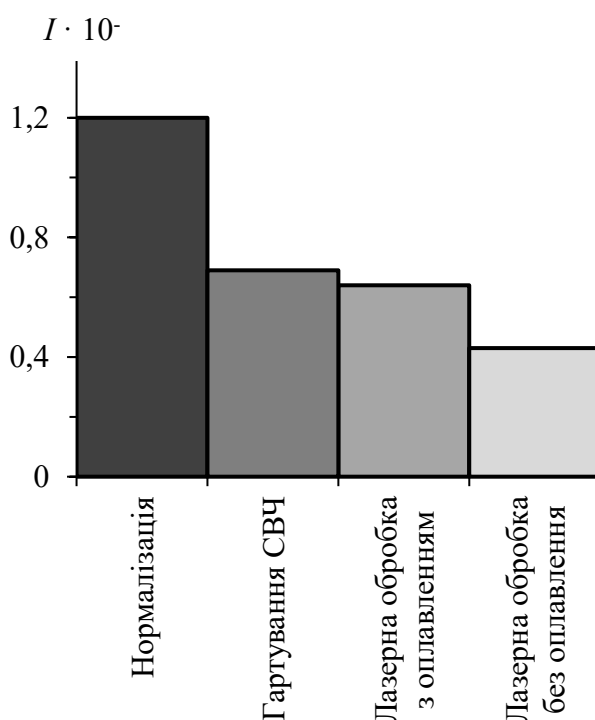


Рисунок 12. Інтенсивність зносу сталі 45 в умовах тертя зі змащенням (контактний тиск – 10 МПа , число циклів випробування – $2,1 \cdot 10^5$)

Отже, сталь 45, що використовується вітчизняними виробниками деталей сільськогосподарських машин, може вже зараз успішно піддаватись лазерному зміцненню на виробництві, що забезпечить значне підвищення їх зносостійкості та міцності. Також існує потреба у подальших широкомасштабних дослідженнях

з метою розробки широкої номенклатури конкретних технологій лазерного зміцнення різних деталей сільськогосподарської техніки.

7.1.3 Аналіз залишкових напружень в результаті лазерної обробки деталей сільськогосподарської техніки із залізовуглецевих сплавів

Лазерна обробка може забезпечити значне підвищення міцності, а при правильному виборі марки сплаву, режимів застосування лазерного випромінювання та подальшій обробці зміцнених зразків – ще й підвищення пластичності, ударної в'язкості та зносостійкості матеріалу відповідних деталей сільськогосподарської техніки із залізовуглецевих сплавів [340-347].

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

Якщо розглянути поперечний переріз зміцненої лазерним випромінюванням смуги залізовуглецевих сплавів за допомогою CO₂-лазеру безперервної дії, то в ньому можна виділити декілька основних зон (рис. 13) [346]: зону оплавлення (зону загартування з рідкого стану), зону загартування, зону відпуску та вихідну структуру матеріалу. У ряді окремих випадків деякі з 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. 14.

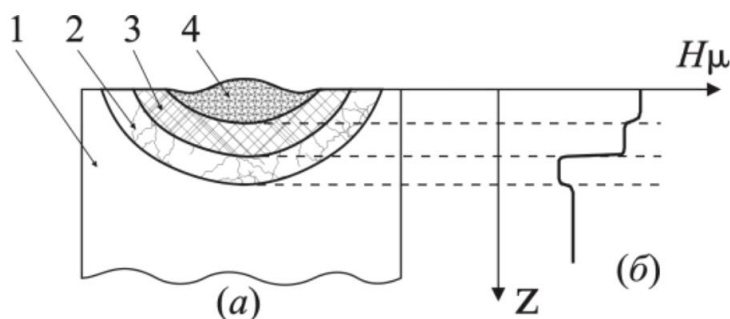


Рисунок 13. Схема поперечного перерізу зони лазерної обробки (а) і розподілу мікротвердості за глибиною зони обробки (б):

1 - вихідний метал, 2 - зона відпуску, 3 - зона загартування,
4 - зона загартування з рідкого стану.

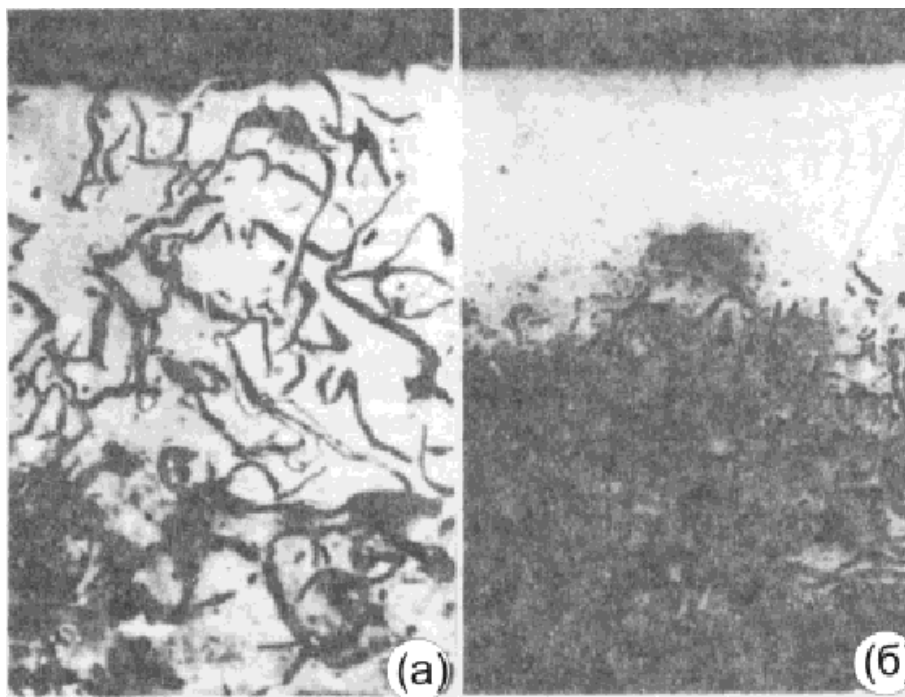


Рисунок 14. Структура загартованих зон після лазерної обробки зразків з сірого перлітного чавуну випромінюванням CO_2 -лазера:
(а) - загартування без оплавлення (x50); (б) - загартування з оплавленням (x25).

Кожна зона в свою чергу може складатися із декількох шарів та мати за своїм перерізом відмінності в мікроструктурі, елементному складі, співвідношенні складових своїх фаз тощо. У сталях типовим є дендритна будова зони оплавлення, причому дендрити ростуть перпендикулярно межі поділу в напрямку відводу тепла в тіло зразка. Карбіди при цьому зазвичай розчиняються, і основною структурною складовою є мартенсит.

При оплавленні чавунів графіт розчиняється в розплаві, і після кристалізації формується дрібнодисперсна структура білого чавуну. Ступінь розчинення графіту залежить від його виду (пластинчастий, кульовий) і від тривалості термічного циклу. Виділення газів, адсорбованих графітом, часто призводить до утворення пор (як це видно на рис. 14,б). Поширеними дефектами є також тріщини.

Зони загартування сталі в твердому стані неоднорідні за перерізом. Як і впливає із загальних положень, в глибині поряд з мартенситом є елементи вихідної структури: ферит (для доєвтектоїдної сталі) і цементит (для заєвтектоїдної сталі), а ближче до поверхні після охолодження гомогенізованого

аустеніту формується мартенсит і залишковий аустеніт. Перекристалізація супроводжується подрібненням зерна і гомогенізацією аустеніту, особливо якщо проводити її протягом достатнього часу без сильного перегріву, тобто з витримкою при температурі вище T_a . Розчинення надлишкового цементиту при перегріві заевтектоїдних сталей призводить до підвищення частки залишкового аустеніту і до зниження мікротвердості в порівнянні із зоною оптимального нагріву, що містить поряд з мартенситом нерозчинені карбіди.

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

Ступінь загартування в першу чергу 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. 13,б.

При лазерній обробці сплавів спостерігається велика нерівномірність розподілу температури, що призводить до значної структурної неоднорідності за товщиною та шириною ЗЛВ. Це може викликати значну неоднорідність розподілу залишкових напружень та призвести до деформації виробів.

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

На рис. 15 представлені криві розподілу залишкових напружень σ_y в технічному залізі на різній відстані від центру зміцненої смуги в залежності від потужності лазерного випромінювання [346]. Як впливає з отриманих результатів, на поверхні зразків, оброблених випромінюванням CO₂-лазера безперервної дії, спостерігається неоднорідний розподіл залишкових

макронапружень, причому є певна симетричність щодо центру смуги. При 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 неопроміненою поверхнею ЗЛВ по обидві її сторони розтягувальні напруження зростають до $170...270$ Н/мм², а при віддаленні від центру смуги в неопромінену шліфовану поверхню напруження плавно знижуються до $\sigma_y = -50...-70$ 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 до $\sigma_y = -90$ Н/мм² при $P_0 = 2$ кВт, а на межі вони збільшуються до $240...290$ Н/мм². Крім того, при підвищенні потужності разом зі збільшенням ширини зміцненої смуги область розтягувальних напружень віддаляється від центру смуги на більшу відстань.

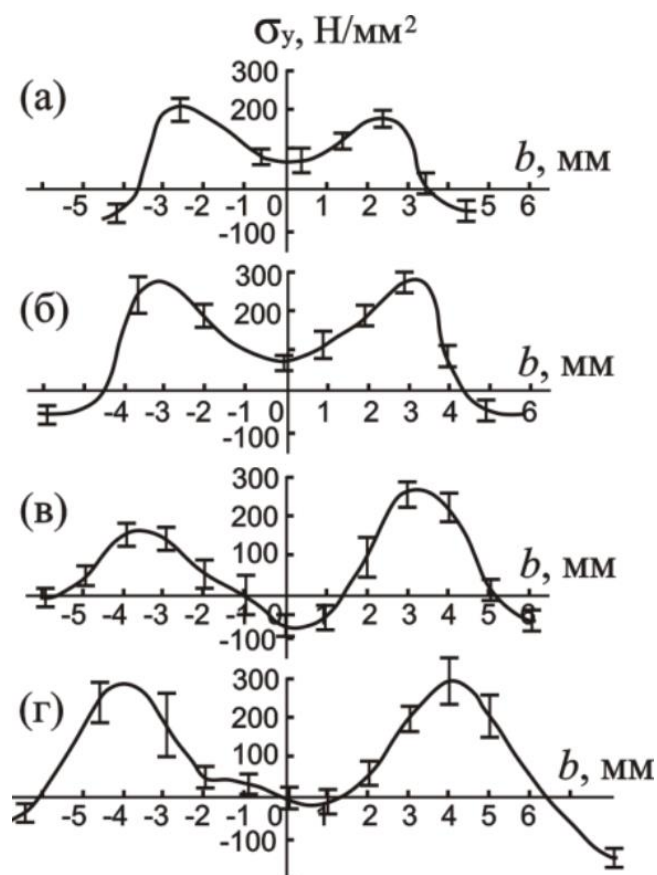


Рисунок 15. Розподіл залишкових напружень σ_y на поверхні технічного заліза в залежності від відстані від центру смуги при обробці зі швидкістю $v = 2$ м/хв і різною потужністю:

(а) - 0,9 кВт; (б) - 1,3 кВт; (в) - 2 кВт; (г) - 3 кВт.

При лазерній обробці залізовуглецевих 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 при підвищенні потужності випромінювання змінюється не тільки величина напружень в 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, обумовлених 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 та частки стискувальних напружень на поверхні.

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

На поверхні деталей, зміцнених безперервним або імпульсним лазерним випромінюванням, виникають неоднорідно розподілені залишкові напруження. Розміри області зі зміненими напруженнями значно більші, ніж зона лазерного впливу, причому має місце певна симетрія відносно центру зміцненої смуги чи плями. Величина та знак залишкових напружень залежать від режимів лазерної обробки, хімічного складу сталі та деяких інших факторів. Вони визначають такі

властивості деталей, як зносостійкість, втомні характеристики, залишкові деформації тощо.

При формуванні напружень в термозміщеному шарі відбуваються два конкуруючі процеси. З одного боку, розвиваються розтягувальні напруження, викликані пластичною деформацією в процесі утрудненої усадки нагрітих областей $\sigma_{\text{терм}}$. З іншого боку, утворення мартенситу супроводжується збільшенням об'єму зазнавшої перетворень області, що, в свою чергу, сприяє виникненню стискувальних напружень $\sigma_{\text{фаз}}$. Величина і знак залишкових напружень $\sigma_{\text{зал}}$ залежать від співвідношення термічних $\sigma_{\text{терм}}$ та фазових $\sigma_{\text{фаз}}$ напружень. При $\sigma_{\text{терм}} > \sigma_{\text{фаз}}$ на поверхні формуються розтягувальні напруження, а при $\sigma_{\text{терм}} < \sigma_{\text{фаз}}$ – стискувальні.

Якщо після зміцнення відбулось мартенситне перетворення (це може бути обробка без оплавлення або з невеликим оплавленням), то в центрі смуги формуються стискувальні напруження. Збільшення об'ємного ефекту при мартенситному перетворенні за рахунок підвищення концентрації вуглецю або швидкості охолодження в сталях призводить до зростання частки стискувальних напружень.

При обробці поверхні сталі 45 безперервним CO₂-лазером потужністю 0,5 кВт зі швидкістю 33 мм/с збільшення твердості в опроміненій смузі не спостерігається, так як в процесі обробки нагрів відбувається при температурі нижче температури фазових перетворень. При цьому на поверхні в опроміненій смузі мають місце залишкові розтягувальні напруження $\sigma_{\text{зал}} = 250 \dots 430$ МПа, обумовлені пластичними деформаціями внаслідок нерівномірного нагрівання та охолодження під час обробки. При збільшенні потужності лазерного випромінювання метал в зоні обробки нагрівається до температур вище температури фазових перетворень (до оплавлення), на стадії охолодження відбувається мартенситне перетворення, що викликає збільшення об'єму та виникнення залишкових стискувальних напружень.

У центрі оплавленої лазером смуги сталі 45 абсолютні значення стискувальних напружень знаходяться в діапазоні 110...280 МПа (рис. 16) [347].

Найбільші стискувальні напруження зафіксовані при $P = 1$ кВт, коли обсяг рідкої складової мінімальний та швидкість її охолодження максимальна. При $P = 2...3$ кВт на поверхні сталі 45 стискувальні напруження $\sigma_{\text{зал}}$ мають абсолютні значення на 50...100 МПа більше, ніж на поверхні заліза, що пояснюється впливом вуглецю.

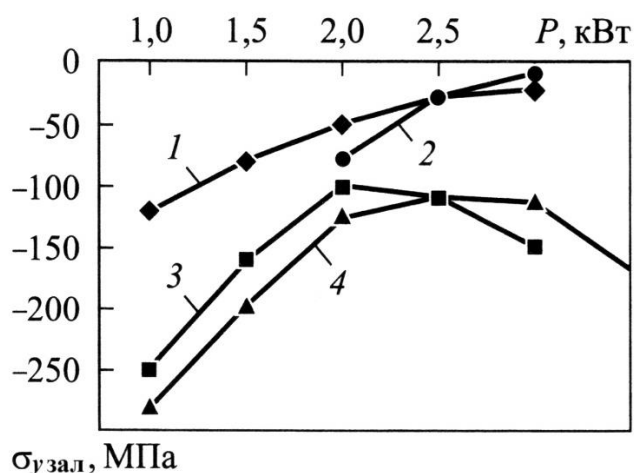


Рисунок 16. Зміна залишкових напружень в центрі зміцненої смуги в залежності від потужності випромінювання для різних залізовуглецевих сплавів:

1 – сталь У8; 2 – залізо; 3 – сталь 40Х; 4 – сталь 45

Значний вплив на розподіл залишкових напружень при термозміцненні чинить швидкість обробки. При малій швидкості обробки (8 мм/с) в центрі оплавленої смуги сталі 45 формуються розтягувальні напруження $\sigma_{\text{зал}} = 130$ МПа, а при збільшенні швидкості обробки напруження в центрі смуги переходять із розтягувальних в стискувальні (рис. 17) [347].

При обробці з перекриттям плям або смуг величина, знак та характер розподілу залишкових напружень значно змінюються. Розподіл залишкових напружень поперек термозміцнених смуг на нормалізованій сталі 45 при різних значеннях коефіцієнта перекриття смуг $K_{\text{п}} = (b - S) / b$ представлено на рис. 18 [347]. Початок координат вибрано на краю останньої смуги. При обробці без перекриття смуг ($K_{\text{п}} = -0,8; -0,3$) на їх поверхні є стискувальні напруження, а між смугами – розтягувальні.

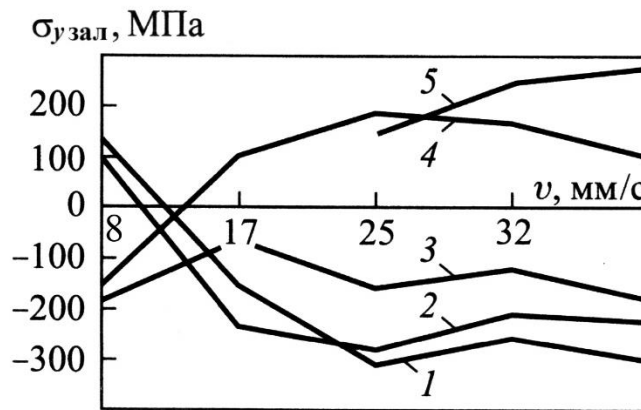


Рисунок 17. Зміна залишкових напружень в центрі зміцненої смуги в залежності від швидкості обробки при $P = 1$ кВт:
1 – сталь 45; 2 – 40X; 3 – У8; 4 – ХВГ; 5 – P18

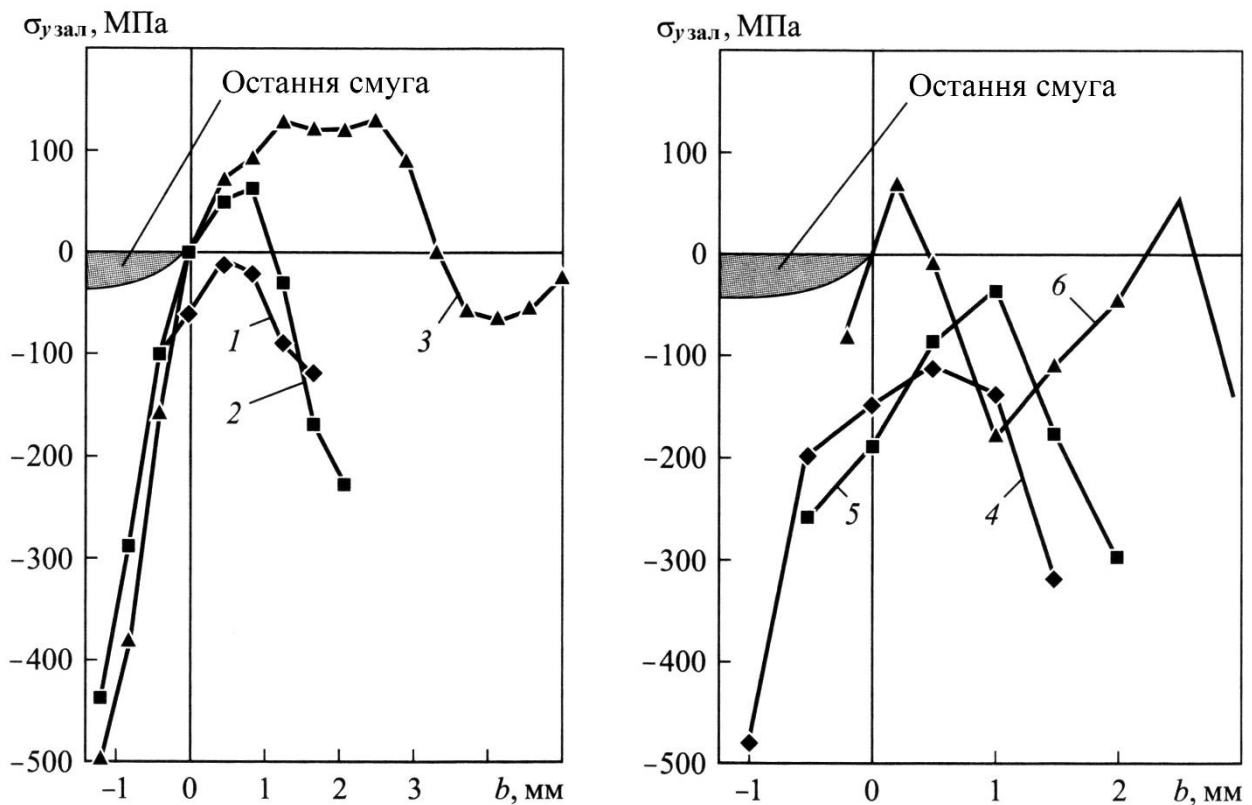


Рисунок 18. Розподіл залишкових напружень поперек термозміцнених смуг після обробки сталі 45 при різних коефіцієнтах перекриття $K_{\text{п}}$:
1 – -0,1; 2 – -0,3; 3 – -0,8; 4 – 0,1; 5 – 0,2; 6 – 0,6

При $K_{\text{п}} = -0,1 \dots 0,1$, коли остання смуга надає термічний вплив на попередню смугу, між ними формуються стискувальні напруження. В цьому випадку остання смуга надає термічний вплив на зону неповного гарту попередньої смуги, де є структура мартенситу з троостито-феритною сіткою. У процесі такого впливу в результаті дифузії відбувається насичення деяких

ділянок твердого розчину вуглецем, крім того, можливий розпад залишкового аустеніту. Перетворення такого типу, мабуть, і призводять до формування стискувальних напружень.

Зі зростанням коефіцієнта перекриття до $K_n = 0,2$, коли остання смуга впливає на зону з мартенситною структурою попередньої смуги, напруження в області перекриття збільшуються.

Таким чином, величина і діапазон зміни напружень при обробці з перекриттям залежать від режимів обробки та перш за все від ступеня перекриття і потужності випромінювання. З підвищенням ступеня перекриття діапазон зміни напружень на поверхні зменшується.

Порівняно зі звичайним гартуванням та з гартуванням із відпуском лазерне гартування забезпечує в декілька разів меншу інтенсивність зносу внаслідок особливостей залишкових напружень у поверхневому шарі сталі [347] (рис. 19).

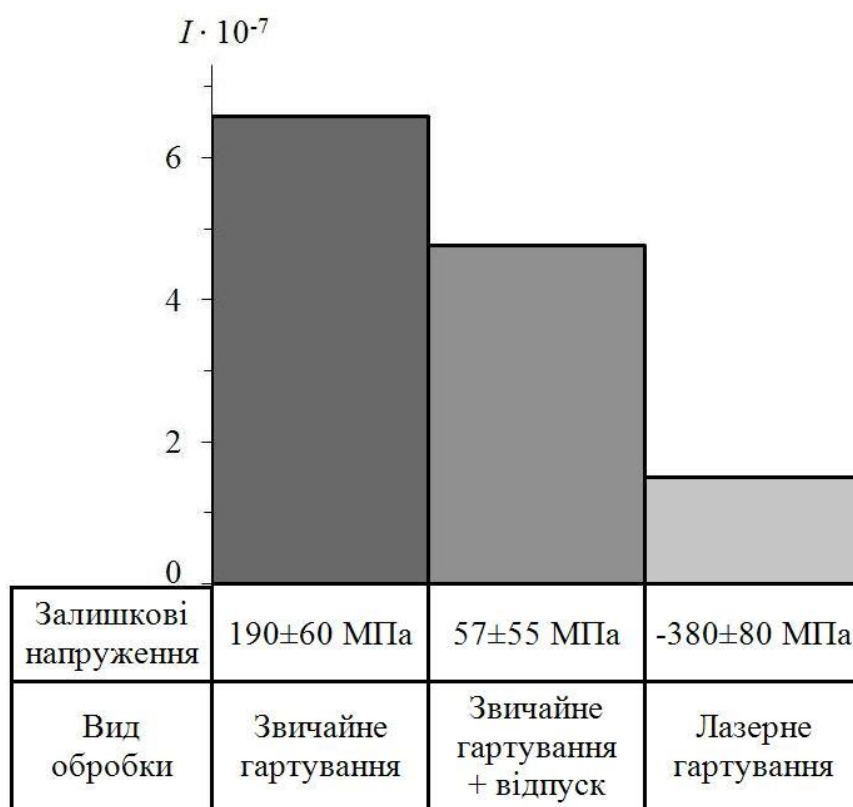


Рисунок 19. Інтенсивність зносу сталі 45 при сухому терті в залежності від максимальних залишкових напружень у поверхневому шарі термозміцненого зразка

Отже, врахування поверхневих залишкових напружень у зміцнюваних лазерним випромінюванням деталях сільськогосподарської техніки може збільшити ефективність обробки та забезпечити значне підвищення експлуатаційних характеристик відповідних виробів.

7.1.4 Лазерна обробка деталей сільськогосподарської техніки з чавуну

З чавуну виготовляється значна частина деталей тракторів, комбайнів та сільськогосподарських машин. Зокрема, з даного сплаву можуть виготовлятися такі елементи двигунів, як блоки циліндрів та їх головки і гільзи, втулки та днища кришок циліндрів, поршні та поршневі кільця, шатуни, випускні колектори та інші. Також з чавуну можуть виготовлятися колінчасті й розподільні вали, різноманітні махові та зубчасті колеса, шківни, корпуси редукторів, насосів та підшипників, опорні ролики, тормозні диски, корпуси електродвигунів, кронштейни, шестерні та інші деталі.

Для ефективного зміцнення різноманітних деталей також може застосовуватися метод поверхневої лазерної обробки [348-360].

Тому аналіз впливу лазерного випромінювання на поверхню чавуну, що в свою чергу впливатиме на ресурс виробітку відповідних деталей сільськогосподарської техніки, на даний момент є актуальним та важливим.

Чавун характеризується всіма традиційними для нього якостями та має високі показники міцності на стиск, втомної міцності та зносостійкості завдяки вмісту у своєму складі великої кількості вуглецю, не менше 2,14%. Також чавун має гарні ливарні властивості та піддається механічній обробці.

Метод поверхневої лазерної обробки дозволяє забезпечити завдяки великому вмісту вуглецю в чавуні високі значення його міцності та при правильно підібраній технології лазерної обробки ще й достатньо високі значення зносостійкості. Актуальним є дослідження впливу лазерного випромінювання на поверхню чавуну, аналіз стану ЗТВ з метою збільшення ресурсу виробітку відповідних деталей сільськогосподарської техніки.

Більшість виконаних різними авторами досліджень здійснювались із використанням широко вивчених твердотільних та CO_2 -лазерів. До числа явних недоліків цих лазерів можна віднести низький ККД променя в зоні обробки, застосування для доставки променя в зону обробки складних оптичних систем, низьку щільність потужності обробки, а також велику площу контакту в зоні обробки. Сучасні оптоволоконні лазери цих недоліків позбавлені.

Можливість забезпечення зміцнення локальної зони оброблюваного зразка є незаперечною перевагою лазерної обробки. Однак локальність впливу лазерного випромінювання є як перевагою лазерної обробки, так і її недоліком. Якщо потрібно забезпечити зміцнення досить великої області, обробку лазером здійснюють з перекриттям. При цьому дуже важливо забезпечити необхідні характеристики зон перекриття.

Обробка зразків здійснювалась за допомогою оптоволоконного ітербієвого лазера в режимі безперервної дії з частковим розплавленням поверхні при заданій щільності потужності випромінювання E і фіксованому коефіцієнті перекриття. Досліджувався вплив лазерного випромінювання на мікроструктуру і властивості зон перекриття області обробки [349]. Схема лазерної обробки з необхідним перекриттям зображена на рис. 20.

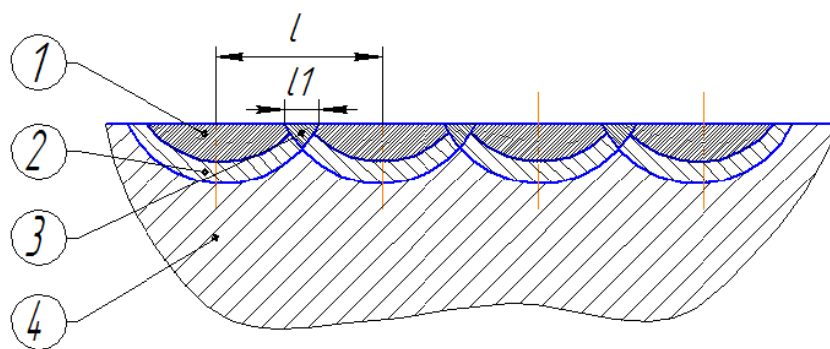


Рисунок 20. Схема лазерного зміцнення з перекриттям: 1 - зона розплавлення;
2 - ЗТВ; 3 - зона перекриття; 4 - основний матеріал

На рис. 21 показано поперечні перерізи зони лазерної обробки чавуну СЧ21. Поперечний переріз перехідних зон даного сплаву зображений на рис. 22.

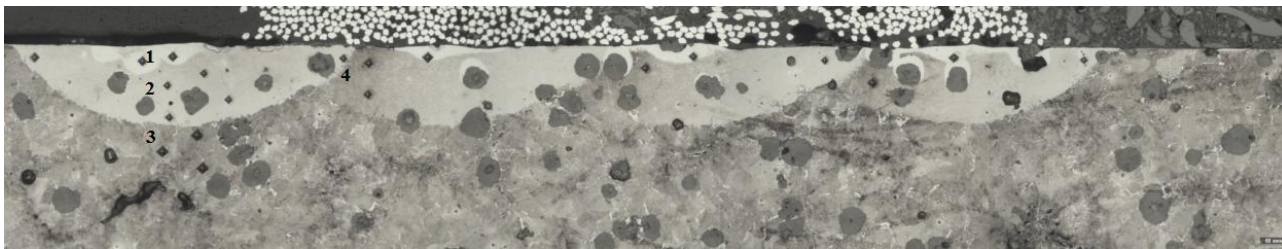


Рисунок 21. Поперечний переріз зони лазерної обробки чавуну СЧ21
($E=4,5 \cdot 10^3$ Вт/см², покриття 10%): 1 - зона розплавлення; 2 - ЗТВ;
3 - основна структура; 4 - перехідна зона

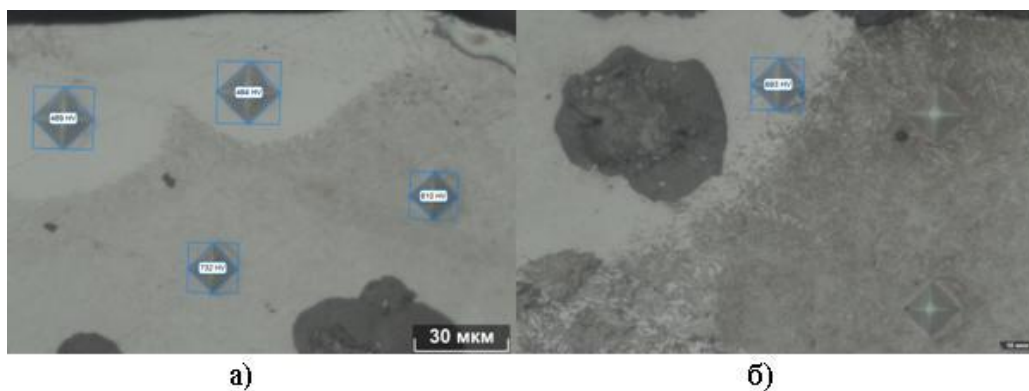


Рисунок 22. Поперечний переріз перехідних зон зразка чавуну СЧ21:
а) в безпосередній близькості до зони оплавлення; б) місце стику двох
оброблюваних ділянок

Із наведених вище рисунків видно, що частка оплавленої зони чавуну СЧ21 є невеликою та складається з ледебуриту. Зона термічного впливу являє собою рейковий мартенсит з невеликою кількістю залишкового аустеніту і має мікротвердість до 930 Нв. Зони покриття мають таку ж структуру, як у зон термічного впливу та однакову з ними мікротвердість.

Порівняємо результати лазерної обробки чавуну СЧ21 та сталі Х12МФ за однакових умов. На рис. 23 зображено отримані в ході вимірювань значення мікротвердості даних сплавів на різних глибинах зразків, а на рис. 24 показано мікротвердість чавуну та сталі уздовж поверхні [349].

Чавун у порівнянні зі сталлю в результаті лазерної обробки має значно вищі показники міцності та за умови подальшої спеціальної обробки також матиме гарні показники зносостійкості.

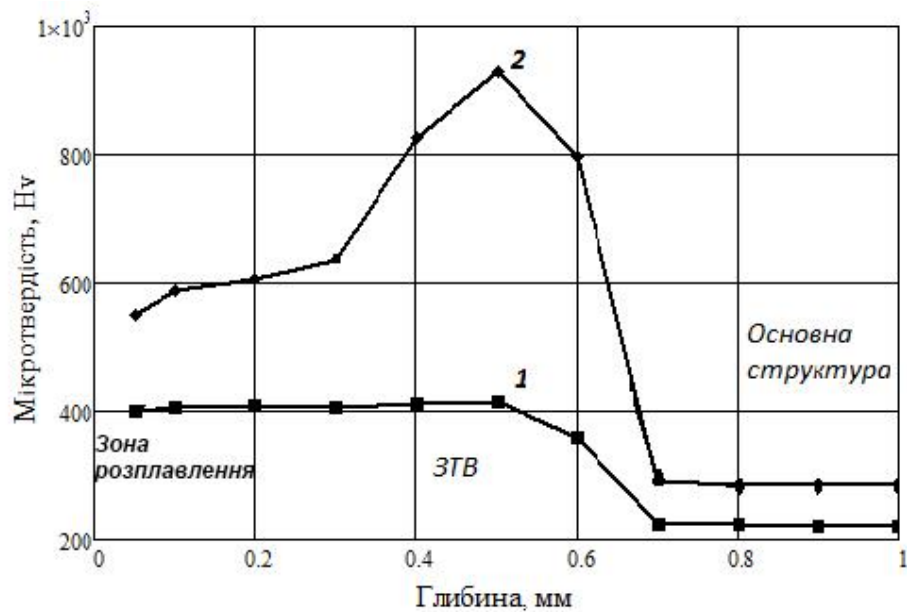


Рисунок 23. Мікротвердість зразка за глибиною: 1 – X12МФ; 2 – СЧ21

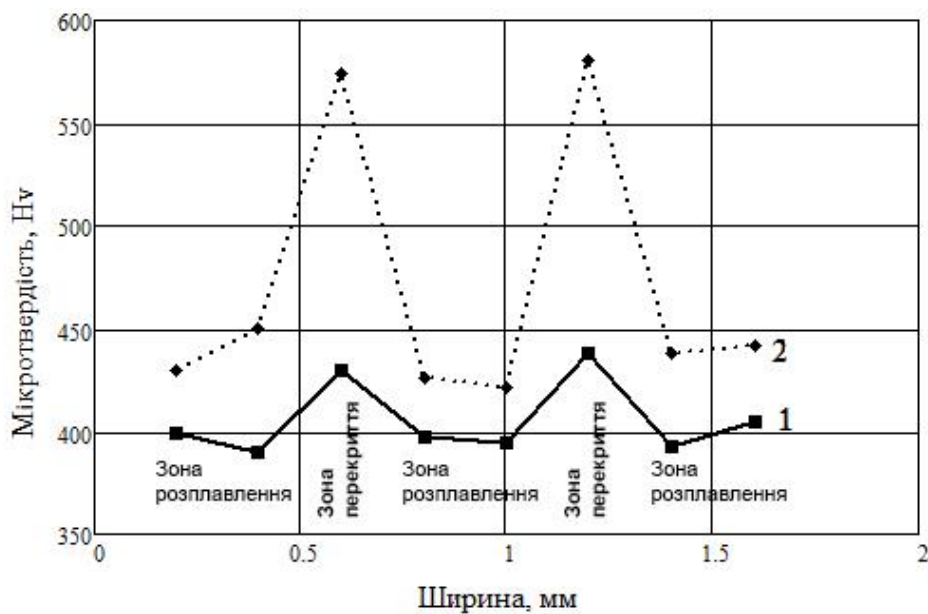


Рисунок 24. Мікротвердість за шириною обробленої ділянки:

1 – X12МФ; 2 – СЧ21

В багатьох попередніх дослідженнях перехідних зон вказувалось на наявність в них трооститу, характерного для зони відпуску, із зниженою мікротвердістю в порівнянні із зонами лазерного гартування. Це пов'язано з малою щільністю енергії в зоні лазерного впливу твердотільних та CO₂ лазерів. При повторному лазерному впливі в перехідній зоні через велику протяжність за

шириною температура не встигає повторно досягти величин, характерних для утворення гартувальних структур, і тому виникає зона відпуску.

Досліджувані перехідні зони мають спільну структуру із зоною термічного впливу. Мікротвердість перехідних зон рівна мікротвердості ЗТВ. Це обумовлюється більш високою щільністю потужності лазерного випромінювання, введеною в зону обробки оптоволоконним ітербієвим лазером. Для сталі характерна невелика різниця мікротвердості зони розплавлення, зони термічного впливу і перехідної зони між двома обробленими ділянками. Для чавуну характерна наявність яскраво вираженої межі між мікротвердістю даних зон обробки.

У процесі експериментального дослідження здійснювалась лазерна обробка крім сірого чавуну СЧ 21 ще й високоміцного чавуну ВЧ 50 за допомогою оптоволоконного ітербієвого лазера в режимі безперервної дії з частковим розплавленням поверхні при щільності потужності випромінювання $4,5 \times 10^3$ Вт/см² та швидкості обробки 10 мм/с. Поперечні перерізи зони обробки відповідних зразків зображені на рис. 25 [348].

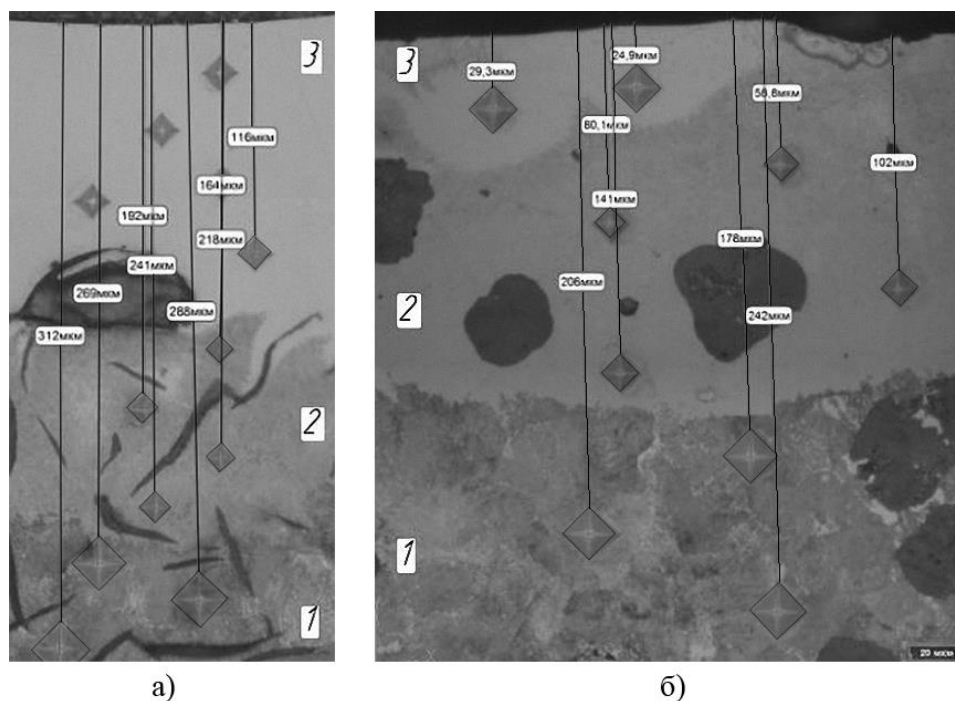


Рисунок 25. Поперечні перерізи зони обробки: а) чавун СЧ 21; б) чавун ВЧ 50;

1 - основний матеріал; 2 - зона термічного впливу; 3 - зона оплавлення

Як видно з рисунка, при однаковій інтенсивності лазерного випромінювання для сірого чавуну характерне поширення зони термічного впливу на глибину до 250 мкм. При цьому поширення ЗТВ у високоміцному чавуні відбувається на глибину не більш 150-160 мкм.

При вимірі мікротвердості оброблених ділянок була вивчена одержувана структура. Так, для сірого чавуну основу становлять перліт, ферит, а також пластинчастий графіт з мікротвердістю до 280 Нv. У зоні оплавлення спостерігається ледебурит. Отримана мікротвердість зони оплавлення доходить до 500 Нv. ЗТВ складається переважно з мартенситу, залишкового аустеніту з невеликими включеннями трооститу. Мікротвердість ЗТВ доходить до 840 Нv.

В основі високоміцного чавуну спостерігається наявність перліту, фериту, а також кулястого графіту з мікротвердістю до 340-450 Нv. У зоні оплавлення присутні ділянки ледебуриту, а також залишковий аустеніт. Мікротвердість зони оплавлення доходить 600 Нv. ЗТВ переважно складається з мартенситу, з невеликими включеннями залишкового аустеніту. Мікротвердість ЗТВ доходить до 930 Нv.

У ході експериментальних досліджень вдалося підвищити в зоні обробки мікротвердість сірого чавуну СЧ 21 в 3 рази, а високоміцного чавуну ВЧ 50 в 2 рази. При цьому найбільші показники мікротвердості спостерігаються у високоміцному чавуні. У цілому отримана мікротвердість високоміцного чавуну ВЧ 50 в середньому на 10 % вище, ніж у сірого чавуну марки СЧ 21.

Відомо, що якість лазерної обробки сильно залежить від режимів, в яких відбувається зміцнення відповідних поверхонь. Їх вплив на середні значення мікротвердості в зоні оплавлення може бути різним. Як видно на рис. 26, при збільшенні потужності випромінювання від 0,5 до 1,5 кВт мікротвердість зростає [348]. Це обумовлено прискоренням розчинення графіту, зменшенням кількості мікропор і збільшенням кількості ледебуриту. Незважаючи на те, що при збільшенні швидкості обробки вміст мартенситу зростає, мікротвердість при цьому зменшується.

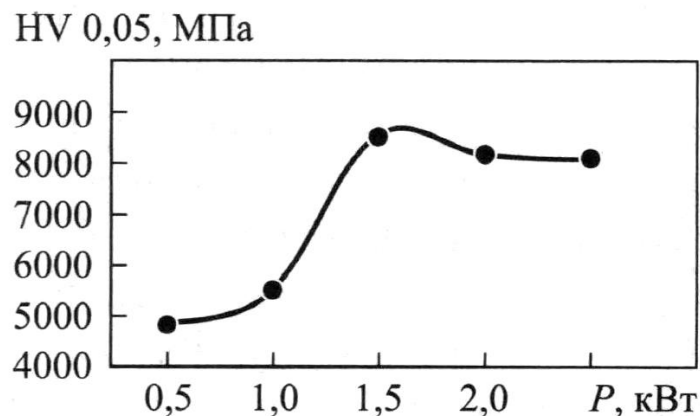


Рисунок 26. Залежність мікротвердості на поверхні зони оплавлення сірого чавуну від потужності лазерного випромінювання

Підвищення потужності в інтервалі 1,5...2,5 кВт призводить до деякого зниження мікротвердості. Очевидно, у цьому випадку графіт майже повністю розчиняється. Зі збільшенням потужності відбувається насичення аустеніту вуглецем, зменшення частки мартенситу та збільшення частки залишкового аустеніту внаслідок зменшення швидкості охолодження. Крім того, через зневуглецювання вміст цементиту зменшується.

Збільшення швидкості обробки призводить до зменшення ступеня насичення вуглецем матриці навколо графітних включень у верхній частині ЗТВ. У нижній частині ЗТВ незавершеність аустенітизації при нагріванні зростає і твердий розчин насичується вуглецем в меншій мірі. В результаті цього при збільшенні швидкості середні значення мікротвердості помітно знижуються (рис. 27) [348].

Більш технологічними є чавуни із дрібними включеннями пластинчастого графіту, оскільки графіт у них при оплавленні розчиняється в більшій мірі, чим в чавунах з компактною формою графіту (високоміцних і ковких). Особливо це помітно при обробці з оплавленням імпульсним випромінюванням, а також безперервним випромінюванням потужністю до 1 кВт.

Здійснювати зміцнення чавунів з оплавленням при високій щільності потужності та швидкості обробки не рекомендується. Крім того, імпульсне гартування з оплавленням може призводити до утворення зони оплавлення краплинного виду.

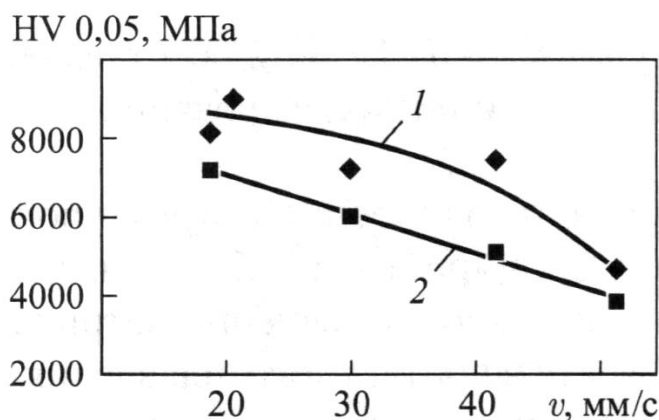


Рисунок 27. Залежність середніх значень мікротвердості в ЗТВ
чавуну ВЧ 50-1,5 від швидкості обробки при:

$$1 - q_n = 50 \text{ МВт/м}^2; 2 - q_n = 100 \text{ МВт/м}^2$$

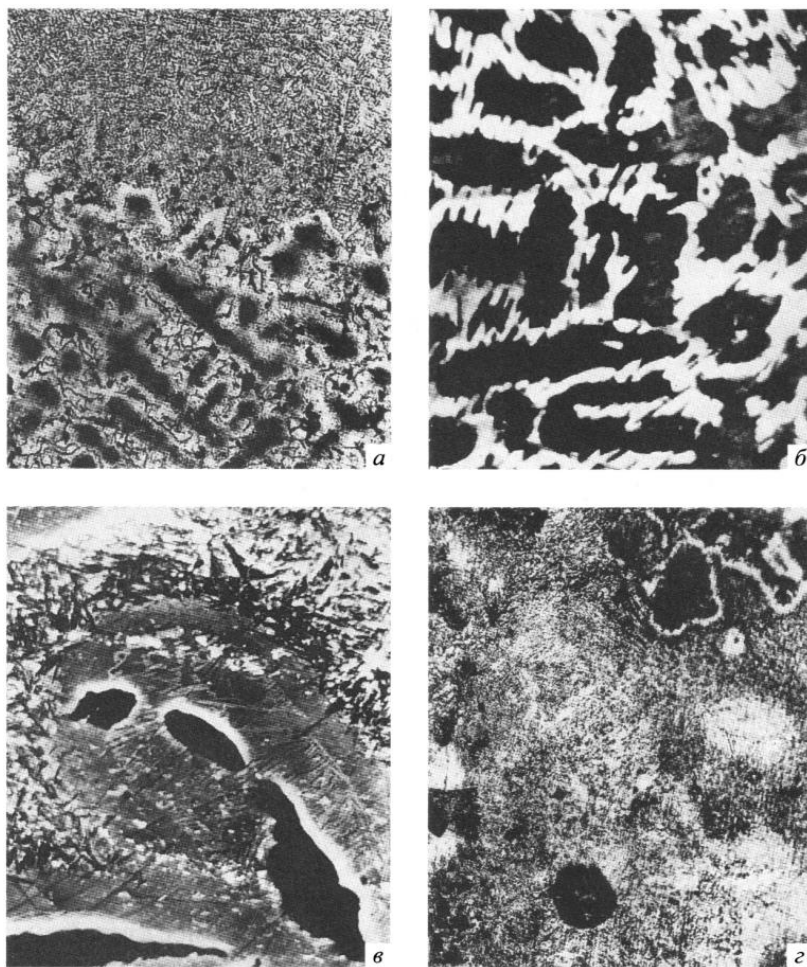
Важливу роль відіграє правильний підбір марки чавуну. Більш технологічними є чавуни із дрібними включеннями пластинчастого графіту, оскільки графіт у них при оплавленні розчиняється в більшій мірі, чим в чавунах з компактною формою графіту (високоміцних і ковких). Особливо це помітно при обробці з оплавленням імпульсним випромінюванням, а також безперервним випромінюванням невеликої потужності.

Чавун у порівнянні зі сталлю в результаті лазерної обробки має значно вищі показники міцності та, за умови подальшої спеціальної обробки, може мати гарні показники зносостійкості.

При обробці з оплавленням графіт розчиняється в розплаві і після охолодження в зоні оплавлення формується структура білого чавуну, тобто затвердіння відбувається за метастабільною діаграмою залізо – вуглець без виділення вільного графіту. При високій швидкості охолодження загальна закономірність кристалізації білих чавунів може змінюватися.

У доєвтектичному чавуні кристалізація починається із виділення первинних зерен аустеніту, потім при температурі 1147°C відбувається утворення евтектики – ледебуриту. Як видно на рис. 28, а [350], в структурі зони оплавлення важко виділити надлишкові кристали аустеніту; в ній міститься

дрібнодисперсна суміш аустеніту і цементиту, що має дендритну будову. Очевидно, через високу швидкість охолодження кристалізація надлишкового аустеніту пригнічується і весь розплав твердне квазіевтектично з утворенням квазіледебуриту. Квазіевтектичній кристалізації доевтектичних чавунів сприяє вирівнювання концентрації кремнію в зоні оплавлення, що призводить до зміщення евтектичної точки на діаграмі вліво.



a – зона оплавлення і ЗТВ сірого чавуну (х300); *б* – зона оплавлення (х3600);

в – верхня частина ЗТВ (х630); *г* – нижня частина ЗТВ чавуну ВЧ50-1,5 (х250)

Рисунок 28. Мікроструктура ЗЛВ сірих чавунів

Після обробки безперервним CO₂-лазером сірого чавуну кількість аустеніту в зоні оплавлення коливається в межах 25...65%, цементиту – 10...45%, а α -Fe – 5...50%. При цьому зі збільшенням швидкості обробки кількість α -Fe збільшується, а γ -Fe – зменшується. Наявність в ЗЛВ α -Fe пов'язано з частковим

перетворенням аустеніту в процесі гартування в мартенсит. Присутність графіту в зоні оплавлення обумовлено його неповним розчиненням, а також надходженням з нижніх шарів розплаву при спливанні графітових включень. Це призводить не тільки до деякого зниження мікротвердості, а й до утворення включень і пор біля самої поверхні. Найбільша кількість пор утворюється при високих швидкості обробки і щільності потужності випромінювання.

Для зменшення пороутворення в ряді випадків перед лазерною обробкою рекомендується попереднє вакуумування деталей, в результаті чого кількість газу, сорбованого графітом, зменшується. Однак це значно ускладнює процес. Більш простим прийомом для зменшення кількості пор в зоні оплавлення є зниження щільності потужності випромінювання і швидкості обробки. У цьому випадку небезпека утворення тріщин, які є поширеним видом дефектів при обробці з оплавленням, також зменшується. Однак при глибині оплавленого шару більше 0,5 мм навіть при малій швидкості обробки утворення тріщин в чавунах знову може посилитися.

Мікротвердість в зоні оплавлення чавуну марки ВЧ60-2 становить 8000...11000 МПа, СЧ24-44 – 7400...10000 МПа, сірого низьколегованого – 6500...8500 МПа, а КЧ35-10 – 6000...8000 МПа.

Зона гарту з твердої фази відрізняється дуже неоднорідною структурою. Нижче лінії оплавлення знаходиться світла смуга шириною 10...20 мкм, що свідчить про те, що тут мало місце значне насичення матриці вуглецем з графітних включень. Через ефект «контактного плавлення» межа між зоною оплавлення і ЗТВ в чавунах дуже нерівна. Ефект полягає в тому, що металева або феритна матриця близько графітних включень насичується вуглецем, в результаті чого температура її плавлення знижується. З цієї ж причини у верхній частині ЗТВ матриця навколо графіту оплавляється і насичується вуглецем. Ступінь насичення на різній відстані від графіту різна, тому в міру віддалення від графітних включень спостерігається гамма структур (рис. 28, в). Близько графіту утворюється світлий шар ледебуристу, далі – шар аустеніту, і, нарешті, –

аустенітно-мартенситна голчата структура. При малих розмірах пластин графіт може повністю розчинитися і ледебуритна структура може бути відсутня.

У середній і нижній частинах ЗТВ насичення вуглецем до аустенітної і аустенітно-мартенситної структури може відбуватися і без оплавлення (рис. 28, з). Мікротвердість цих ділянок також різна: з аустенітною і аустенітно-мартенситною структурою – 6400...6770 МПа, а з цементитною і ледебуритною структурою – 10000...12000 МПа. Утворення цементитних прошарків може бути причиною окрихчування.

У нижній частині ЗТВ, де насичення матриці з графіту дуже незначне, в структуру входять мартенсит і залишковий аустеніт. Біля границі з вихідним металом процес аустенітизації перліту при нагріванні не встигає завершитися, тому там є нерозчинені частинки цементиту. Оскільки твердий розчин ненасичений вуглецем, мікротвердість знижується до 6700 МПа і навіть до 3500...4100 МПа.

Для оптимізації технологічного процесу гартування поверхні чавунів лазером необхідно оцінити вплив тривалості дії випромінювання τ на структуру та твердість даних сплавів.

Так, здійснюючи лазерну обробку безперервним CO₂-лазером, при зміні τ для чавуну СЧ21 в межах 0,16-1,2 с, швидкість охолодження нагрітого об'єму металу перевищує критичну швидкість загартування, про що свідчить твердість отриманих в ЗЛВ структур (рис. 29) [351].

Структурна неоднорідність за глибиною ЗЛВ, що виникає при збільшенні τ , супроводжується нерівномірним розподілом твердості. На кривій мікротвердості, що відповідає $\tau = 1,2$ с (рис. 29), є провали, пов'язані з попаданням індентора мікротвердоміру ПМТ-3 на аустенітні ділянки. Спостережуване збільшення кількості залишкового аустеніту з ростом τ , ймовірно, пов'язане з великим насиченням твердого розчину вуглецем.

Вибір режиму гартування чавуну СЧ21 та відповідного йому структурного стану в ЗЛВ повинен проводитися з урахуванням умов експлуатації конкретної деталі, так як аустеніт може надавати різний вплив на зносостійкість. Стосовно

пари тертя, наприклад, циліндр двигуна – компресійне кільце, залишковий аустеніт може сприяти кращому припрацюванню даної пари.

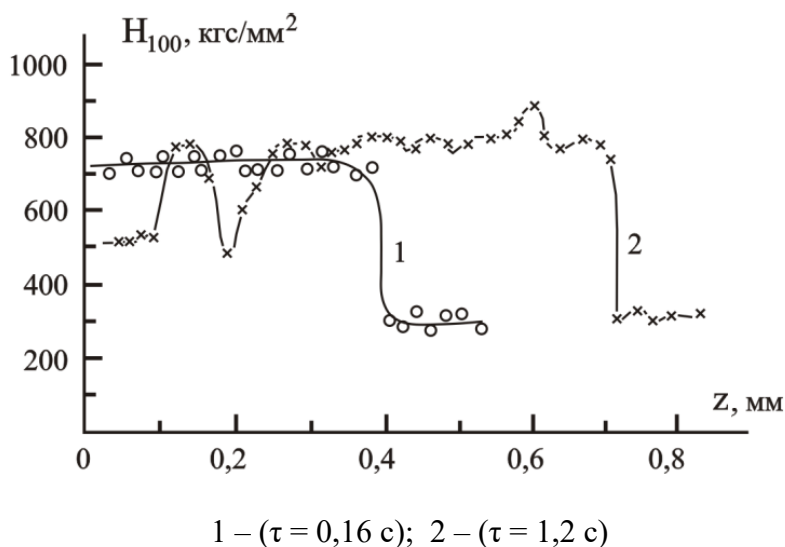


Рисунок 29. Розподіл мікротвердості за глибиною зони лазерного впливу в чавуні СЧ21 ($P_0 = 2,2$ кВт)

Застосування швидкого сканування лазерного пучка поперек напрямку руху забезпечує поліпшення форми перерізу загартованої смуги, наближаючи її до прямокутної, і згладжування поверхневого рельєфу оплавленого шару.

Для лазерного зміцнення високоміцного чавуну ВЧ40 з оплавленням використовувався твердотільний YAG-лазер з двокоординатним сканатором потужністю $P_0 = 400$ Вт при наступних параметрах обробки: швидкість переміщення зразка $V = 1,7$ см/с, радіус лазерного пучка $R = 0,5$ мм, амплітуда сканування $q = 2,6$ мм, частота сканування $f = 160$ Гц [351].

Після лазерної обробки відповідні шліфи зразків досліджувалися традиційними металографічними методами.

Форма перерізу загартованих смуг стала близька до прямокутної. Глибина зони оплавлення склала $0,05 \dots 0,1$ мм, зони гартування з твердого стану – $0,1 \dots 0,15$ мм, а загальна глибина гартування – $0,15 \dots 0,25$ мм. Ширина загартованої смуги – $2,7 \dots 3,1$ мм. Мікротвердість вибіленого шару високоміцного чавуну ВЧ40 склала $7 \cdot 10^3 \dots 8,7 \cdot 10^3$ МПа, а в зоні лазерного

гартування з твердого стану для аустенітно-мартенситної структури – $6 \cdot 10^3 \dots 7,5 \cdot 10^3$ МПа.

Характерний розподіл значень мікротвердості чавуну ВЧ40 за глибиною зони лазерної обробки наведено на рис. 30 [351]. Розкид значень геометричних розмірів та мікротвердості пов'язаний з відмінностями у вихідній структурі сплаву зразків з різних партій лиття, а також не завжди стабільною якістю фосфатування та, відповідно, коефіцієнтом поглинання лазерного випромінювання.

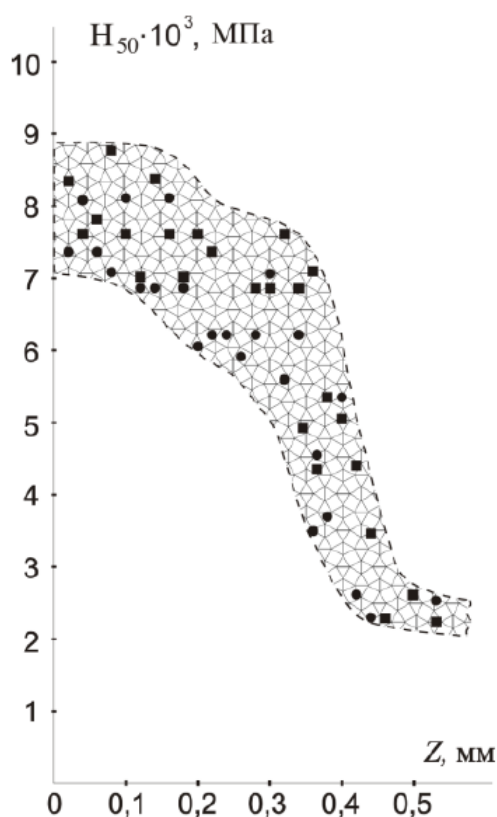


Рисунок 30. Розподіл мікротвердості за глибиною зони лазерної обробки чавуну ВЧ40

Лазерна обробка чавунів з оплавленням призводить до розчинення графіту в розплаві, внаслідок чого в зоні оплавлення при кристалізації формується структура вибіленого чавуну. Після лазерної обробки в цій зоні майже не спостерігаються залишки графітних включень. Це пов'язано з використанням швидкого поперечного сканування, коли на кожну ділянку оброблюваної

поверхні протягом долі секунди фактично діє послідовність багатьох десятків лазерних імпульсів (джерело тепла носить імпульсно-періодичний характер).

Повне розчинення графіту створює умови для збільшення частки цементиту. Кристалізація відбувається при високих швидкостях охолодження і здійснюється за механізмом, близьким до квазіевтектичного без виділення вільного графіту. У структурі вибіленого чавуну спостерігається вирівнювання концентрації кремнію, сама структура значно подрібнена. Між осередками аустеніту в міждендритних проміжках структура має вигляд нерівноважної суміші заевтектичного виду з великою кількістю цементиту, що визначає високу твердість цієї зони.

Зона гартування з твердої фази має дуже неоднорідну структуру. У її верхній частині (поблизу нижньої межі зони оплавлення) навколо графітних включень є світлі смуги в 10...20 мкм, які свідчать про те, що тут мало місце локальне оплавлення та значне насичення матриці вуглецем з графітних включень. При насиченні до формування аустеніто-цементитної структури мікротвердість цих смуг досить висока.

Поруч з графітом утворюється шар з переважанням цементиту, далі – пластинчастий ледебурит, ледебурит і аустеніт, однорідний аустеніт та, нарешті, аустенітно-мартенситна голчата структура. У середній області зони гартування з твердої фази є чергування світлих та темних ділянок, що обумовлюється насиченням матриці вуглецем до різного рівня на різних відстанях від графітних включень. У нижній частині насичення матриці вуглецем незначне.

Таким чином, виконуються загальні вимоги до результатів лазерного гартування виробів із чавуну. Ресурс роботи відповідних зміцнених чавунних деталей сільськогосподарської техніки в результаті застосування методу поверхневої лазерної обробки значно збільшиться.

Отже, чавун, який використовується вітчизняними виробниками деталей сільськогосподарських машин, може успішно піддаватись лазерній обробці, що забезпечить значне підвищення його механічних властивостей та надасть змогу у певних випадках зручно замінити ним значно дорожчі сталі.

Дослідження зон перекриття зразків із чавуну після лазерного гартування дозволили зробити висновок про можливість застосування оптоволоконних лазерів для підвищення експлуатаційних характеристик деталей сільськогосподарських машин.

Проведені дослідження підтвердили, що технологічні установки з твердотільними лазерами потужністю від 400 Вт і вище можуть ефективно використовуватися для поверхневого гартування залізовуглецевих сплавів та успішно конкурувати з більш потужними CO₂-лазерами.

Відсутність зон відпуску в перехідних ділянках говорить про можливість гартування ділянки оброблюваної поверхні за всією шириною обробки.

Зміцнювати чавуни слід при невисокій щільності потужності та невеликій швидкості обробки.

7.1.5. Застосування лазерно-плазмового методу зміцнення деталей двигунів внутрішнього згоряння із чавуну

Одним із можливих методів зміцнення деталей двигунів внутрішнього згоряння є лазерно-плазмова обробка [352]. Для ефективного застосування даного методу модифікації поверхонь металевих виробів необхідно враховувати внутрішні процеси в поверхневому шарі зміцнюваних зразків, що відбуваються внаслідок впливу лазерно-плазмового струменю, а також залежність властивостей зміцнюваного зразка від заданих параметрів лазерно-плазмової обробки.

Правильний підбір параметрів процесу зміцнення під час застосування лазерно-плазмового методу (ЛПМ) забезпечуватиме значно вищі показники міцності та зносостійкості оброблюваних зразків, ніж можуть забезпечити інші методи.

Тому системне дослідження особливостей впливу лазерно-плазмового струменю на зміцнювану поверхню матеріалу на даний момент є актуальним та важливим.

Лазерно-плазмовий метод заснований на застосуванні плазми оптичного пульсуючого розряду (ОПР), який запалюється повторюваними з високою

частотою слідування (десятки кілогерц) лазерними імпульсами в фокусі променю CO₂-лазера в швидкісних потоках газів з домішками реагуючих компонентів на поверхні оброблюваного матеріалу. Експериментальними і теоретичними методами визначено, що плазма ОПР для ініціації хімічних реакцій має унікальне поєднання властивостей, недоступних для існуючих способів (індукційний надвисокочастотний нагрів НВЧ, тліючий, дуговий і безперервний оптичний розряди, піроліз, горіння):

- рекордною (для плазмохімічних методів) питомою потужністю енерговиділення в обсязі газової фази до 5 ГВт/см³;
- можливістю отримання локально рівноважної (час обміну ~ 10 нс) плазми при тиску 1 атм і більше;
- високою температурою і концентрацією ($10^{18} \dots 10^{19}$ см⁻³) частинок;
- високим рівнем ультрафіолетового радіаційного обміну, сприятливого для дисоціації, іонізації, збудження частинок;
- швидким (за мікросекунди) охолодженням плазми ОПР, що забезпечує контрольоване гомогенне утворення частинок без забруднень, зменшення їх розміру, пригнічення їх росту, отримання не тільки наночастинок, а й нанокластерів.

Поряд з фізико-хімічними перевагами ЛПМ необхідно відзначити загальні переваги для розробки промислових нанотехнологій, а саме:

- процес може проводитися при тиску газу в зоні реакції більше атмосферного, що дозволяє в багатьох випадках виключити з технологій дорогі вакуумні системи, відмовитися від робочої камери і проводити обробку великогабаритних виробів складної конфігурації автоматизованими маніпуляторами за заданою програмою;
- ефективний обмін енергією між лазерною плазмою і металом забезпечує 7-10-кратне збільшення продуктивності ЛПМ в порівнянні з традиційним лазерним гартуванням і 3-4-кратне – для технологій наплавлення, легування;

- високі робочі тиски забезпечують осадження нанокompозитних покриттів зі швидкостями синтезу на 2-3 порядки більшими, ніж у відомих методах плазмохімічного осадження з газової фази;
- метод дозволяє використовувати широкий спектр вихідних компонентів (гази, аерозолі, пари) і вибирати з них найбільш прийнятні для промислової реалізації технології;
- широкі діапазони управління характеристиками імпульсно-періодичного випромінювання, швидкістю потоку (0...500 м/с), сортом та складом буферного або робочого газу (Ar, He, Ne, H₂, N₂, O₂, CO, CO₂ та ін.) забезпечують можливості широкого пошуку і оптимізації за ефективністю варіанта технології;
- можливість проведення спрямованого синтезу наноматеріалів з використанням вихідних компонентів у вигляді стехіометричної суміші аерозолів (в тому числі тугоплавких), що значно спрощує і здешевлює завдання підбору вихідних реагентів.

Основою лазерно-плазмової технологічної установки, що визначає її технологічні можливості, є імпульсно-періодична CO₂-лазерна система генератор-підсилювач середньою потужністю до 2 кВт і імпульсною потужністю близько сотні кіловат з можливістю управління частотою слідування (до 120 кГц) і тривалістю лазерних імпульсів. Оригінальна оптична схема системи генератор-підсилювач дозволяє формувати промінь з плоским фронтом, плавним розподілом інтенсивності і якістю, близькою до дифракційної межі, усунути ефекти самозбудження системи «лазер-метал» поблизу фокуса, які призводять до спотворення форми імпульсу (зниження імпульсної потужності), а також розподілу інтенсивності і в результаті до нестабільності лазерно-плазмової обробки.

Лазерний промінь поворотними дзеркалами, розташованими на рухомих порталах і каретці програмно-керованого двокоординатного столу, направляється на лінзу лазерно-плазмової обробної головки і фокусується на осі газового потоку з домішками реагуючих компонентів. Таке технічне рішення дозволяє

проводити лазерно-плазмову обробку безпосередньо в атмосфері і тільки необхідних заданих областей виробу.

Існуючі лазерно-плазмові технологічні установки забезпечують широкі діапазони можливостей лазерно-плазмової обробки за інтенсивністю променя (до $2...3 \text{ ГВт/см}^2$), за швидкістю потоку (до 500 м/с) і за тиском газу в плазмохімічній камері (до $0,5 \text{ МПа}$) для модифікації поверхні металів з приповерхневою плазмою.

При лазерно-плазмовій модифікації поверхні металів повторювані з високою частотою слідування лазерні імпульси, сфокусовані на поверхні металу рухомого зразка, запалюють плазму оптичного пульсуючого розряду в потоці робочого легуючого газу (наприклад, азоту при нітридизації) (рис. 31) [352].

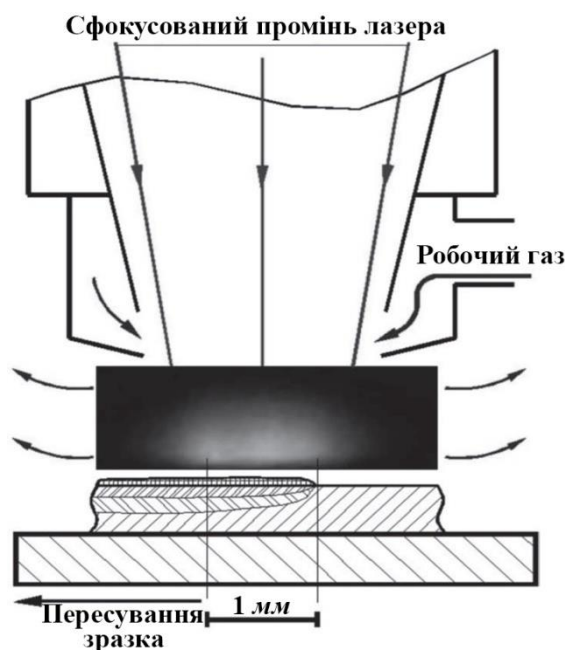


Рисунок 31. Схема лазерно-плазмової обробки металу із зображенням приповерхневої плазми оптичного пульсуючого розряду

Набір осцилограм, одержаний під час проведення ЛПМ-обробки, дозволяє визначити, коли і при якій потужності випромінювання настає перевищення інтенсивності над порогом запалювання і виникає лазерна плазма, а також

динаміку і ефективність поглинання лазерного випромінювання утворюваною плазмою (рис. 32) [352].

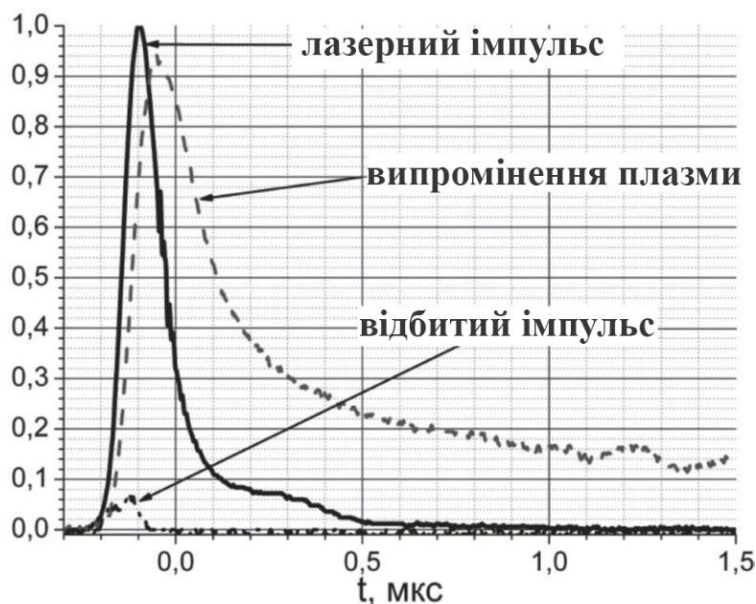


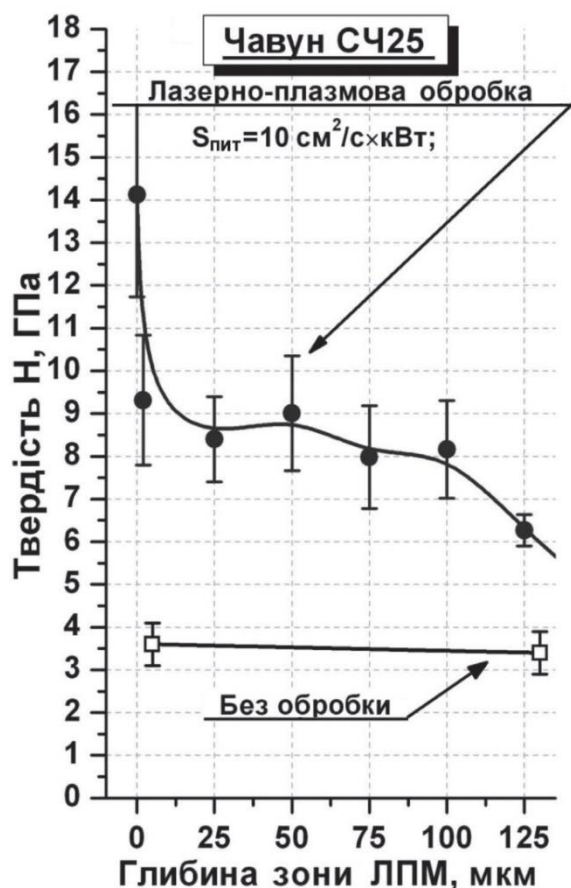
Рисунок 32. Осцилограми лазерного імпульсу, випромінювання плазми та відбитого від металу лазерного імпульсу

Залежно від частоти проходження лазерних імпульсів, розміру плями опромінення і відносної швидкості переміщення променя та деталі цикл обробки може включати десятки-сотні впливів лазерної плазми на кожну ділянку поверхні. Як правило, тривалість циклу обробки в умовах інтенсивного впливу променя і лазерної плазми (десятки МВт/см^2) обмежена розплавленням поверхневого шару, що перевищує допуски на шорсткість оброблюваної поверхні. Разом з тим, для досягнення більшої рівномірності і поліпшення технологічних характеристик виробу, наприклад, твердості і глибини зони лазерно-плазмової модифікації (рис. 33), замість одного циклу обробки можливе проведення декількох повторюваних циклів з більшою швидкістю і з меншою кількістю енергії [352].

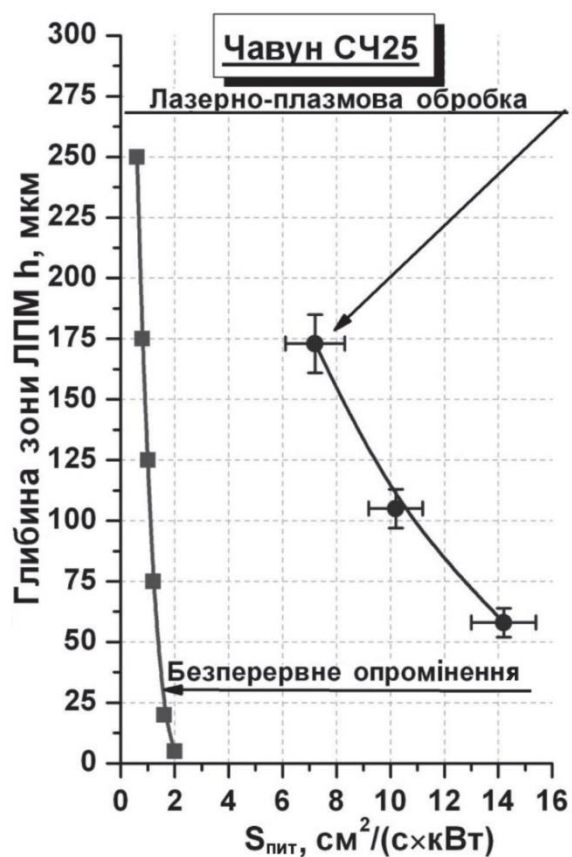
Необхідно відзначити, що періодична (20...100 кГц) дія лазерної плазми на поверхню металу в легуючій атмосфері одночасно формує:

– високотверде наноструктуроване твердофазне покриття (нітриди, карбіди тощо);

- хвилю дифузії, утворення легованого шару або твердого розчину (наприклад, твердий розчин азоту в титані);
- теплову хвилю і структурно-фазові (наприклад, мартенситні) перетворення;
- гіперінтенсивний ультразвук (амплітуда до 10...15 МПа), що сприяє ущільненню мікроструктури в гарячій зоні.



a



б

Рисунок 33. Мікротвердість (*a*) та глибина зони (*б*) лазерно-плазмової модифікації поверхні чавуну СЧ25 в залежності від питомої (на 1 кВт потужності лазера) швидкості обробки

Найбільш детальне дослідження можливостей методу проведено для лазерно-плазмової модифікації поверхні антифрикційного чавуну на перлітній основі (з метою визначення перспектив застосування ЛПМ для зміцнення гільз

циліндрів двигунів внутрішнього згоряння) на зразках, вирізаних з циліндрових втулок двигунів внутрішнього згоряння.

Для всіх досліджених зразків спостерігалася модифікація поверхні з утворенням двох шарів. Верхній наноструктурований шар товщиною сотні нанометрів набуває мікротвердість в діапазоні 12...15 ГПа (див. рис. 33а) за рахунок насичення азотом і завдяки утворенню тонкої мікроструктури. До верхнього наноструктурованого шару прилягає шар, що має ділянки зі структурою ледебуристу (гартування з рідкого стану) і мартенситу (гартування з твердого стану). Причому фазові перетворення з плавленням металу починаються внаслідок концентраційної неоднорідності розподілу вуглецю за фазами сплаву закономірно навколо графітових включень. У цьому шарі (між поверхневим нан шаром і основою металу) відбуваються структурні перетворення, характерні для лазерної гартування, які призводять до збільшення мікротвердості до рівня 8...10 ГПа (в 3-4 рази твердіше основи) на товщині в десятки-сотні мікрометрів (див. рис. 33а).

Порівняння питомої продуктивності лазерно-плазмової обробки чавуну СЧ25 з традиційним лазерним гартуванням безперервним випромінюванням показало, що продуктивність лазерно-плазмової обробки в 7-10 разів вище, ніж у традиційного лазерного гартування (див. рис. 33б). Це пояснюється 4-5-кратним зростанням ефективності енергообміну між лазерною плазмою і металом, порівняно із прямим поглинанням лазерного випромінювання, а також дією гіперінтенсивного ультразвуку.

Оцінка триботехнічних властивостей проводилася при випробуванні зразків після попереднього взаємного притирання поверхонь диска (загартована сталь 40) і колодки (зразок, вирізаний з циліндричної втулки двигуна). Питоме навантаження в умовах рідинного тертя при змащуванні маслом становить 1250 МПа. Результати випробувань представлені на рис. 34 [352]. Оброблені лазером зразки зношувалися в прийнятих умовах випробувань зі швидкістю, в 20 разів меншою в порівнянні зі швидкістю зношування вихідних (без ЛПМ модифікації) зразків. При цьому на третину зменшився коефіцієнт тертя.

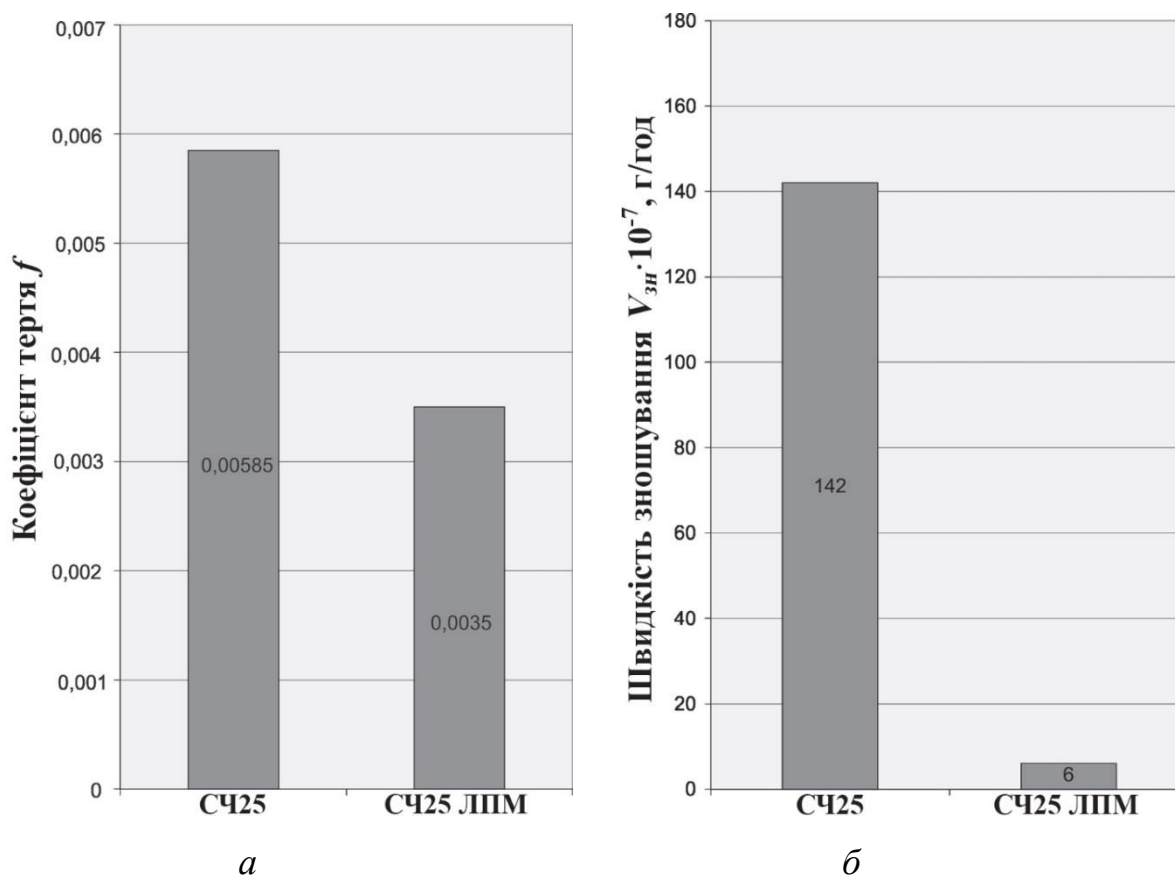


Рисунок 34. Вплив лазерно-плазмової обробки на коефіцієнт тертя (а) та швидкість зношування (б) зразків із сірого чавуну у парі тертя «сталевий диск – чавунна колодка»

У підповерхневих шарах графітові пластини оточені шарами металу зі структурою, отриманою загартуванням з рідкого (ледебурит) і твердого (двійниковий мартенсит) стану. Ці тверді ділянки сприймають зусилля, що виникає в парі тертя, забезпечуючи зносостійкість чавуну. Крім того, вони перешкоджають затиранню графітових частинок, зберігаючи мастилоутримуючий рельєф поверхні і забезпечуючи тим самим низький коефіцієнт тертя.

Для перевірки впливу твердих фаз, отриманих при ЛПМ обробці чавуну, на властивості міцності проведені випробування на статичний згин σ_z і ударну в'язкість a_n . Отримані результати (табл. 1) не показують помітного зниження міцності на згин і ударної в'язкості сірого чавуну після ЛПМ. Отже, в цілому, даний метод показує кращі показники, ніж звичайне лазерне зміцнення [352].

Таблиця 1

Вплив лазерно-плазмової обробки на механічні
властивості сірого антифрикційного чавуну на перлітній основі

Стан матеріалу	Питома швидкість зношування $V_{\text{зн}} \cdot 10^{-7}$, г/год	Коефіцієнт тертя f	Статичний згин σ_z , МПа	Ударна в'язкість a_n , КДж/м ²
СЧ25 без обробки	142	0,0059	400...420	85...90
СЧ25 після ЛПМ	6	0,0035	420...430	80...85

Таким чином, шляхом застосування лазерно-плазмового методу виконана високопродуктивна модифікація поверхні сірого чавуну, на якій сформована унікальна композитна структура, що складається з високотвердого поверхневого шару з мікротвердістю 12...20 ГПа і загартованого підшару з мікротвердістю 8...10 ГПа та товщиною в десятки-сотні мікрон. Випробуваннями на зразках з сірого чавуну на перлітній основі марки СЧ25 показано, що така композитна структура може багаторазово збільшити зносостійкість відповідних деталей, що визначають ресурс техніки.

Висновки: Отже, лазерне зміцнення різноманітних деталей сільсько-господарської техніки може бути вже зараз успішно застосоване на виробництві та забезпечити значне підвищення показників міцності і зносостійкості оброблюваних зразків та значно продовжити термін їх експлуатації у галузі агропромислового виробництва.