

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.9.048.7:621.373.826:631.31

Ковальчук Ю.О.

Уманський національний університет садівництва

Оляднічук Р.В.

Уманський національний університет садівництва

Ковальчук А.О.

Харківський національний університет повітряних сил

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЛАЗЕРНОГО ЗМІЦНЕННЯ НА ПОВЕРХНЕВІ ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ СТАЛІ 45

Проаналізовано процес формування мікроструктури в зоні лазерної обробки для сталі 45. Показано залежність залишкових напружень у центрі зміцненої смуги від потужності випромінювання. Визначено вплив швидкості лазерної обробки на поверхневі залишкові напруження. Наведено розподіл залишкових напружень поперек термозміцнених смуг за умов різних значень коефіцієнта перекриття. Показано значне зменшення інтенсивності зносу оброблених лазером зразків зі сталі 45 порівняно з іншими видами зміцнення.

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

Постановка проблеми. Питання покращення механічних властивостей та збільшення ресурсу виробітку деталей не втрачає своєї актуальності серед виробників сільськогосподарської техніки. Забезпечення високих експлуатаційних характеристик деталей, які найбільше піддаються зносу та виходять із ладу, є однією із першочергових задач, що стоять перед виробниками сільськогосподарських машин.

Різні деталі тракторів, комбайнів, засобів механізації тваринництва та інших сільськогосподарських машин виготовляються зі сталі 45 та повинні задовольняти відповідні вимоги щодо міцності та зносостійкості.

Одним із методів зміцнення деталей сільськогосподарської техніки є поверхнева лазерна обробка. Для ефективного застосування даного методу необхідно мати чіткі уявлення про внутрішні процеси в поверхневому шарі зміцнюваних зразків, що відбуваються внаслідок впливу лазерного випромінювання.

Експлуатаційні характеристики деталей зі сталі 45 у випадку застосування лазерної обробки безпосередньо пов'язані, зокрема, також із залишковими напруженнями на їх поверхні.

Тому системне дослідження впливу лазерного випромінювання на зміцнювану поверхню матері-

алу стосовно, зокрема, поверхневих залишкових напружень на даний момент є актуальним та важливим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вирішення задач, пов'язаних із визначенням властивостей сталей, що зазнають впливу лазерного випромінювання, привертає увагу багатьох науковців та вчених. Зокрема, цими питаннями займалися О.Г. Григор'янц, В.С. Черненко, Е.В. Харанжевський та інші, які вивчали вплив лазерного випромінювання на поверхню сталевих зразків у різних випадках та для різних матеріалів [1–3].

Зміцненням різних деталей сільськогосподарської техніки за допомогою лазерного випромінювання в останні роки займалися В.П. Бірюков, І.Ф. Буханова, В.В. Дивинський та інші [4–6].

Дослідженням структури та властивостей зон перекриття в результаті лазерної обробки та підвищенням експлуатаційних характеристик деталей із залізовуглецевих сплавів шляхом застосування оптоволоконного лазера останнім часом займався, зокрема, П.А. Огін [7].

Залишкові напруження на поверхні залізовуглецевих сплавів, їх значення та знаки під час лазерної обробки розглядали у своїх працях

А.Г. Григорьянц [1], В.С. Майоров [8] та інші вітчизняні та закордонні вчені.

Дослідження залишкових напружень унаслідок лазерного зміцнення на поверхні сталі 45, з якої виготовляють велику кількість деталей сільськогосподарських машин, охоплюють певною мірою обмежене коло випадків, у різних авторів можуть містити суперечливі дані та потребують подальшої систематизації та узагальнення.

Постановка завдання. Метою роботи є визначення впливу лазерної обробки на властивості сталі 45, аналіз особливостей формування мікроструктури у відповідних зразках та дослідження розподілу залишкових напружень на поверхні оброблюваної сталі, що дозволить здійснити підбір необхідних параметрів процесу лазерного зміцнення для забезпечення високих експлуатаційних характеристик відповідних деталей сільськогосподарської техніки.

Виклад основного матеріалу дослідження. На поверхні деталей, зокрема зі сталі 45, 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.

Під час формування напружень у термозміцненому шарі відбуваються два конкуруючі процеси. З одного боку, розвиваються розтягувальні напруження, викликані пластичною деформацією у процесі утрудненої усадки нагрітих областей $\sigma_{\text{терм}}$. З іншого боку, утворення мартенситу супроводжується збільшенням об'єму області, яка зазнала перетворень, що, у 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 під час мартенситного перетворення за рахунок підвищення концентрації вуглецю або швидкості охолодження в сталях призводить до зростання частки стискувальних напружень.

У процесі обробки поверхні сталі 45 безперервним CO_2 -лазером потужністю 0,5 кВт зі швидкістю 33 мм/с збільшення твердості в опроміненій смузі не спостерігається, оскільки під час 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, зумовлені пластичними деформаціями внаслідок нерівномірного нагрівання та охолодження під час обробки. Під час збільшення потужності лазерного випромінювання метал у 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. 1) [1]. Найбільші стискувальні напруження зафіксовані при $P = 1$ кВт, коли обсяг рідкої складової мінімальний та швидкість її охолодження максимальна. При $P = 2 \dots 3$ 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.

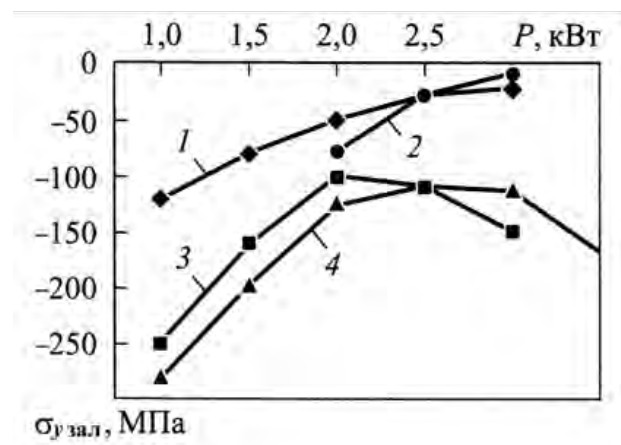


Рис. 1. Зміна залишкових напружень у центрі зміцненої смуги в залежності від потужності випромінювання для різних залізовуглецевих сплавів:

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

Значний вплив на розподіл залишкових напружень під час термозміцнення 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 під час збільшення швидкості обробки напруження в

центрі смуги переходять із розтягувальних в стискувальні (рис. 2) [1].

Під час обробки 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 $K_n = (b - S) / b$ представлено на рис. 3 [1]. Початок координат обрано на краю останньої смуги. У процесі обробки без перекриття смуг ($K_n = -0,8; -0,3$) на їх поверхні є стискувальні напруження, а між смугами – розтягувальні.

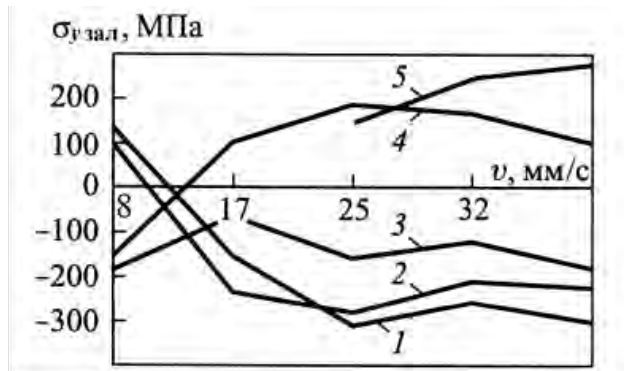


Рис. 2. Зміна залишкових напружень у центрі зміцненої смуги в залежності від швидкості обробки при $P = 1$ кВт: 1 – сталь 45; 2 – 40Х; 3 – У8; 4 – ХВГ; 5 – Р18

При $K_n = -0,1 \dots 0,1$, коли остання смуга надає термічний вплив на попередню смугу, між ними формуються стискувальні напруження. У цьому випадку остання смуга надає термічний вплив на зону неповного гарту попередньої смуги, де наявна структура мартенситу із 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 під час обробки з перекриттям залежать від режимів обробки та, перш за все, від ступеня перекриття і потужності випромінювання. Із 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 зразків зі сталі 45 унаслідок особливостей

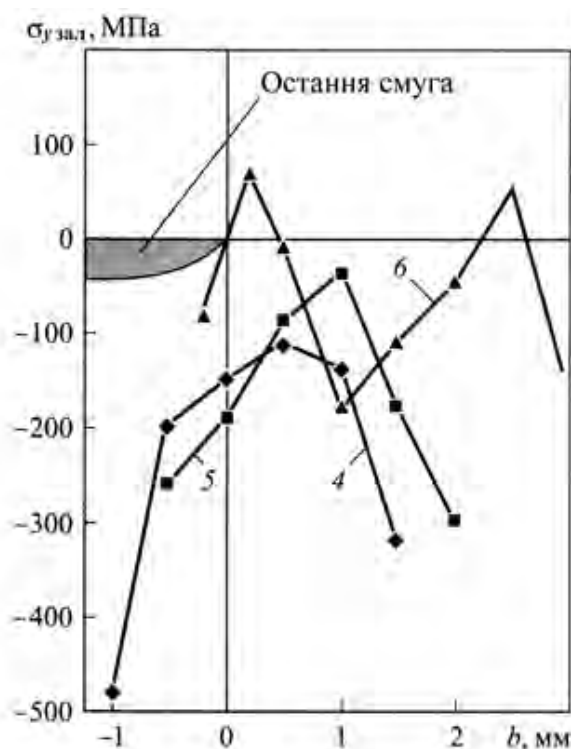
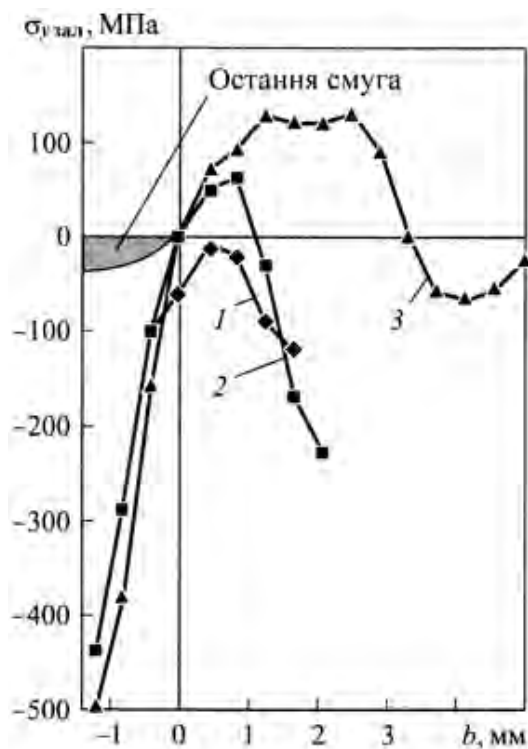


Рис. 3. Розподіл залишкових напружень поперек термозміцнених смуг після обробки сталі 45 при різних коефіцієнтах перекриття K_n : 1 – -0,1; 2 – -0,3; 3 – -0,8; 4 – 0,1; 5 – 0,2; 6 – 0,6

залишкових напружень у їх поверхневому шарі [1] (рис. 4).

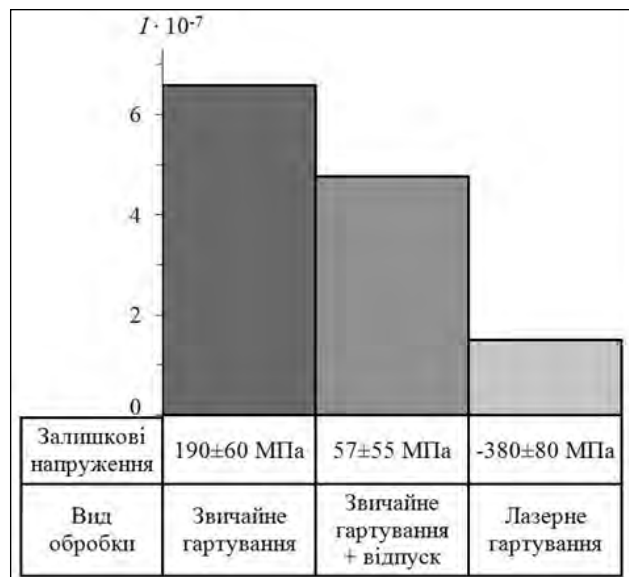


Рис. 4. Інтенсивність зносу термозміцнених зразків зі сталі 45 при сухому терті в залежності від максимальних залишкових напружень у їх поверхневому шарі

Висновки. У даній роботі здійснювався аналіз особливостей формування мікроструктури в зоні лазерного впливу для сталі 45 та виконувалось дослідження залишкових напружень на її поверхні в залежності від потужності випромінювання лазера, швидкості обробки досліджуваних зразків та коефіцієнту перекриття зміцнених смуг.

Під час збільшення потужності лазерного випромінювання метал у зоні обробки нагрівається до температур вище температури фазових перетворень і відбувається збільшення об'єму та виникнення залишкових стискувальних напружень.

За умов малої швидкості обробки в центрі оплавленої смуги сталі 45 формуються розтягуювальні напруження, а під час збільшення швидкості обробки напруження в центрі смуги переходять із розтягуювальних в стискувальні.

У процесі обробки смуг без перекриття на їх поверхні є стискувальні напруження, а між смугами – розтягуювальні. При $K_n = -0,1 \dots 0,1$, коли остання смуга надає термічний вплив на попередню смугу, між ними формуються стискувальні напруження. Зі зростанням коефіцієнта перекриття до $K_n = 0,2$ напруження в області перекриття збільшуються. Із підвищенням ступеня перекриття діапазон зміни напружень на поверхні зменшується.

Порівняно з іншими видами зміцнення лазерне гартування забезпечує в декілька разів меншу інтенсивність зносу зразків зі сталі 45 унаслідок особливостей залишкових напружень у їх поверхневому шарі.

Отже, використовувана вітчизняними виробниками сільськогосподарської техніки сталь 45 може ефективно піддаватись лазерній обробці, що дасть змогу забезпечити значне підвищення експлуатаційних характеристик відповідних деталей.

Список літератури:

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки : учеб. пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца ; 2-е изд., стереотип. Москва, 2008. 664 с.
2. Черненко В.С., Кіндрачук М.В., Дудка О.І. Променеві методи обробки : навч. посібник. Київ, 2008. 166 с.
3. Харанжевский Е.В. Кривилёв М.Д. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество : учеб. пособие / под ред. П.К. Галенко. Ижевск, 2011. 187 с.
4. 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.
5. 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.
6. Ковальчук Ю.О., Пушка О.С., Войтік А.В. Вплив поглинаючих покриттів на глибину лазерної обробки деталей сільськогосподарської техніки зі сталі 45. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація»*. 2017. Вип. 30. С. 16–21.
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. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В.Я. Панченко. Москва, 2009. 664 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ СТАЛИ 45

Проанализирован процесс формирования микроструктуры в зоне лазерной обработки для стали 45. Показана зависимость остаточных напряжений в центре упрочненной полосы от мощности излучения. Определено влияние скорости лазерной обработки на поверхностные остаточные напряжения. Приведено распределение остаточных напряжений поперек термоупрочненных полос при различных значениях коэффициента перекрытия. Показано значительное уменьшение интенсивности износа обработанных лазером образцов из стали 45 по сравнению с другими видами упрочнения.

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

RESEARCH OF LASER STRENGTHENING EFFECT ON SURFACE RESIDUAL STRESSES OF STEEL 45

The process of forming a microstructure in the laser treatment zone for steel 45 is analyzed. The dependence of the residual stresses in the center of the hardened strip on the radiation power is shown. The effect of laser processing speed on surface residual stresses is determined. The distribution of residual stresses across thermally strengthened strips is given for different values of the overlap coefficient. A significant decrease in the wear intensity of laser-treated steel 45 samples compared with other types of strengthening has been shown.

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