

УДК 621.791.92

**О.Й. Мажейка, проф., канд. техн. наук***Кіровоградський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**E-mail: para5511@mail.ru*

## Оцінка механічних характеристик матеріалів при лазерному термозміцненні деталей сільськогосподарської техніки

Проведені випробування сталей і чавунів на характеристики опору втомі після лазерної обробки деталей сільськогосподарської техніки. Встановлено зв'язок потужності лазерного випромінювання та швидкості обробки для досягнення якісних показників процесу лазерного термозміцнення деталей. Доказано, що лазерне термозміцнення дозволяє збільшувати значення меж витривалості. Разом з тим показано, що обробка лазером може призводити до зниження характеристик опору втомі..

**лазерне термозміцнення, властивості матеріалів, сталь, високоміцний чавун, межа витривалості**

**А.И. Мажейка, проф., канд. техн. наук***Кировоградский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина***Оценка механических характеристик материалов при лазерном термоупрочнении деталей сельскохозяйственной техники**

Проведены исследования сталей и чугунов на характеристики сопротивления усталости после лазерной обработки деталей сельскохозяйственной техники. Установлена связь мощности лазерного излучения и скорости обработки для достижения качественных показателей процесса лазерного термоупрочнения деталей. Доказано, что лазерное термоупрочнение позволяет увеличивать значения пределов выносливости. Вместе с тем показано, что обработка лазером может приводить к снижению характеристик сопротивления усталости.

**лазерное термоупрочнение, свойства материалов, сталь, высокопрочный чугун, предел выносливости**

**Постановка проблеми.** Успішне вирішення задач, які пов'язані зі зниженням металоємкості конструкцій, при одночасному покращенні їх технічних характеристик призводить до необхідності використання сучасних технологій обробки і зміцнення поверхні деталей з метою створення на цих поверхнях міцних, довговічних і корозійностійких шарів. Обробка поверхневих шарів концентрованими потоками енергії лазерних променів, плазмовим струменем дозволяє змінювати фізико-механічні властивості матеріалів внаслідок модифікації структури їхніх поверхневих шарів. Крім того, вона дає можливість одержувати якісно нові властивості цих шарів, що не можна досягти іншими методами зміцнення.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** В останні роки дослідження лазерної обробки деталей автомобільної техніки, двигунів, нафтопереробного обладнання мають пріоритетні значення [1] для науковців Англії, Німеччини, США, Болгарії. Значного прогресу досягнуто при зміцненні відповідальних деталей [2] типу валів, шестерень, гільз циліндрів тощо. Основними напрямками досліджень при лазерному зміцненні деталей залишаються характеристики зношування поверхонь. Однак важливе значення при цьому має можливість регулювання та покращення таких характеристик відповідальних деталей як міцність.

© О.Й. Мажейка, 2016

**Постановка завдання.** Метою даної роботи було дослідження характеристики міцності деталей сільськогосподарської техніки після лазерного зміцнення при відновленні, що забезпечує підвищення їх ресурсу. У роботах, присвячених вивченню характеристик міцності сталей після лазерного термозміцнення, показана можливість як їх підвищення, так і зниження [1,2]. Отримані результати пов'язані, перш за все, з режимами обробки стосовно конкретних матеріалів і деталей.

**Виклад основного матеріалу .** Для проведення експериментальних досліджень був розроблений спеціальний стенд, що включає потужний електророзрядний CO<sub>2</sub>-лазер, 3-х координатний стіл з системою ЧПУ. Випробування на опір втомі проводили на зразках  $d=7$  мм і  $d=18$  мм, виготовлених згідно рекомендацій по ГОСТ 25.502-79. Зразки зі сталей 09Г2, 35, 40Х, 75Г, заліза 008ЖР та ін. високоміцного та сірого чавунів піддавалися лазерному зміцненню при наступних умовах: потужність випромінювання  $P = 1$  кВт; діаметр плями фокусування  $d_0 = 4; 5; 6,5; 8$  мм; швидкість руху зразка щодо променя  $V = 0,6 - 2,1$  м/хв. Зразки випробовували на електромагнітних машинах при згині в одній площині з частотою 100 Гц – для зразків  $d=7$  мм і 50 Гц – для зразків  $d=18$  мм. Загальний вид машини для випробувань зразків представлений на рис. 1. База випробувань у всіх випадках приймалася рівною  $10^7$  циклів.

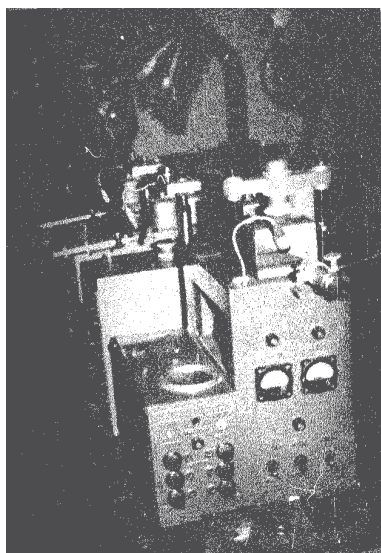
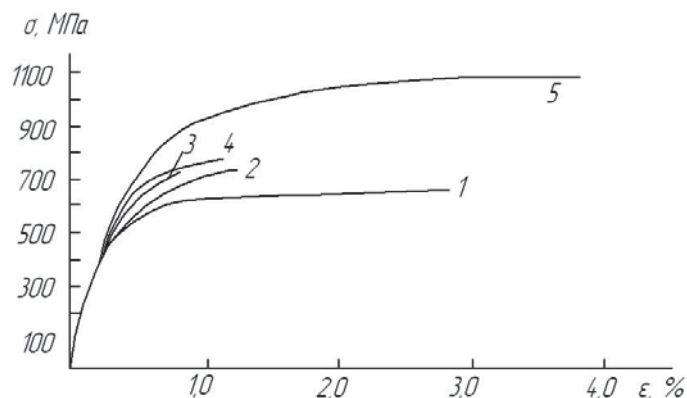


Рисунок 1 –Установка для випробування зразків на опір втомі

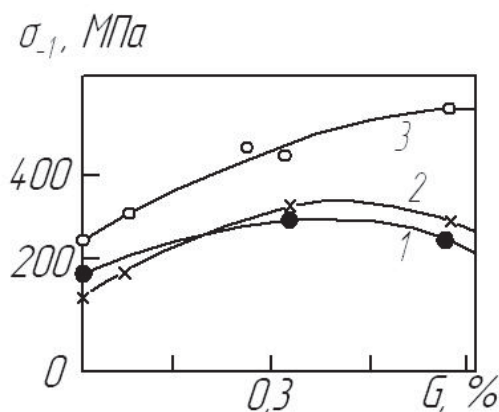
**Результати досліджень.** На рис. 2 показаний вплив режимів зміцнення на прикладі сталі 45. Зразки обробляли по гвинтовій лінії і уздовж твірної без оплавлення. Найбільший ефект досягається при зміцненні уздовж твірної зразка, при цьому зберігаються значні пластичні властивості матеріалу. Для випадків 2-4 (рис. 2) спостерігається окрихчування обробленого шару, що пов'язане з великим часом дії випромінювання на метал і, відповідно, великими нагрівом зразка і глибиною зміцнення. Найбільший ефект підвищення характеристик міцності при обробці по "гвинту" досягається при 100% зміцненій поверхні (при мінімальних пластичних властивостях), найменший ефект при 50% зміцненій поверхні (при максимальних пластичних властивостях).



1 – вихідний матеріал сталь 45; 2, 3, 4 – обробка по гвинтовій лінії, площа обробленої поверхні 50, 100 та 70% відповідно; 5 – обробка вздовж твірної

Рисунок 2 – Діаграма статичного деформування зразків після лазерного термозміцнення

Підвищення характеристик  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$  узгоджується з підвищенням межі витривалості при лазерному термозміцненні. Досліджений вплив лазерного термозміцнення на опір втомі різних матеріалів – сталей 09Г2, 35, 40Х, 75Г, заліза 008ЖР та ін. Зразки обробляли уздовж осі з одночасним обертанням із швидкістю 2850 об/хв. Досліджували режим без оплавлення поверхні (рис. 3, крива 3) і з оплавленням тонкого поверхневого шару (крива 2). Відмічається, що межа витривалості при обробці без оплавлення поверхні підвищується на 70-80% в порівнянні із стандартною обробкою. Обробка з оплавленням тонкого поверхневого шару дає перевагу перед стандартною обробкою тільки на сталях із вмістом вуглецю менше 0,35%; на сталях з великим вмістом вуглецю оплавлення поверхні викликає падіння значення межі витривалості, яке на сталі 75Г досягає 10%. Очевидно, це пов'язано, зокрема, з тим, що із збільшенням вмісту вуглецю в сталі збільшується і вміст аустеніту в ній після гартування, що призводить до зменшення внеску структурного стискуючого залишкового напруження у формування напруженого стану поверхневого шару після лазерної обробки.



1 – нормалізація; 2 – лазерне загартування з оплавленням поверхні; 3 – лазерне загартування без оплавлення  
Рисунок 3 – Залежність межі витривалості від вмісту вуглецю

Аналогічний результат зниження межі витривалості при обробці з оплавленням поверхні отриманий в дослідженні [3], де також робиться висновок про те, що працездатність деталей, що працюють на стирання за наявності знакозмінних

навантажень, можна підвищити лише при загартуванні без оплавлення поверхні, тоді як для деталей, що працюють на стирання без значних знакозмінних навантажень, можуть бути використані режими лазерної обробки з оплавленням поверхні. Втомним випробуванням були піддані також зразки, які оброблені з перекриттям лазерних доріжок. Коефіцієнт перекриття, тобто відношення ширини лазерної доріжки до кроку обробки, змінювався від 1 до 3, при цьому виявлено суттєве (до 5-10 разів) зменшення довговічності зразків, що, можливо, пов'язано з концентрацією напруження в зонах перекриття, відпуском матеріалу в цих місцях і іншими причинами. Слід також відзначити, що доріжка зміцнення при лазерній обробці може виявитися технологічним концентратором, що знижує міцність деталі.

При дослідженні впливу лазерного термозміцнення на характеристики опору втомі сірих і ковких чавунів виявлено зниження меж витривалості при всіх режимах обробки. При цьому, в обробленому шарі формуються стискаюча залишкова напруга, підвищена твердість. Приведені дані показують різноманіття чинників, що впливають на результати зміцнення.

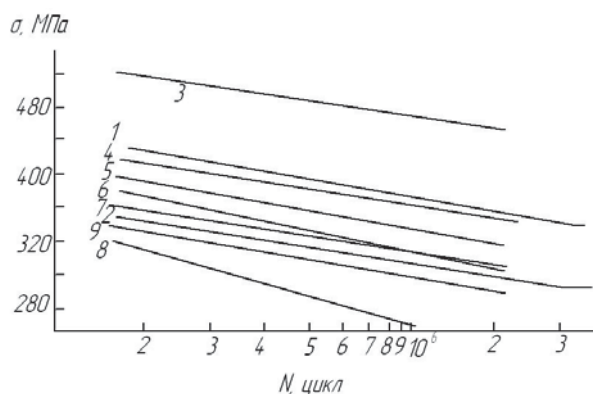
В цілому, результати втомних випробувань сталей і чавунів після лазерної обробки пов'язують з технологічними параметрами та структурами, що формуються, залишковим напруженням, твердістю і мікрорельєфом поверхні.

В ряді робіт [1,3] приведені результати дослідження залишкових напружень після лазерного термозміцнення. Так, для визначення впливу залишкових стискаючих напружень після лазерної обробки, як можливої причини підвищення опору втомі декілька зразків після неї піддавали відпуску в печі при температурі 500°C протягом 2 год з подальшим повільним охолодженням разом з піччю. Випробування цих зразків на вібростенді показали, що ефект збільшення опору втомі зберігся, проте вимірюванням залишкових напружень на рентгенівській установці ДРОН-3 виявлено зменшення залишкових напружень лише на 15%. В цілому, слід зазначити складну картину залишкових напружень, доріжок зміцнення, що формуються на поверхні і по перетину зміцненої зони.

Іншим чинником підвищення характеристик опору втомі після лазерної обробки в режимі мікрооплавлення, можливо, є зміна мікрорельєфу поверхні. Може спостерігатися ефект заплавлення мікротріщин на поверхні, які є наслідком попередньої механічної обробки, збільшення радіуса западин профілю, зменшення шорсткості і утворення хвилястої поверхні. Мікропрофілографування поверхні, обробленої лазерним випромінюванням в режимі мікрооплавлення, показало, що процес протікає з оплавленням вершин мікровиступів і заплавленням мікрозападин, так що коефіцієнт заповнення профілю збільшувався з 0,4 до 0,7. Шорсткість поверхні після лазерної обробки зменшувалася в середньому в 3-4 рази. При цьому радіус заокруглення западин і виступів збільшувався в 2 рази, а відношення кроку мікронерівностей до їх висоти складало  $t = 80 - 100$ , що відповідно до прийнятих визначень переводить клас поверхні від шорсткої до хвилястої ( $t > 40$ ).

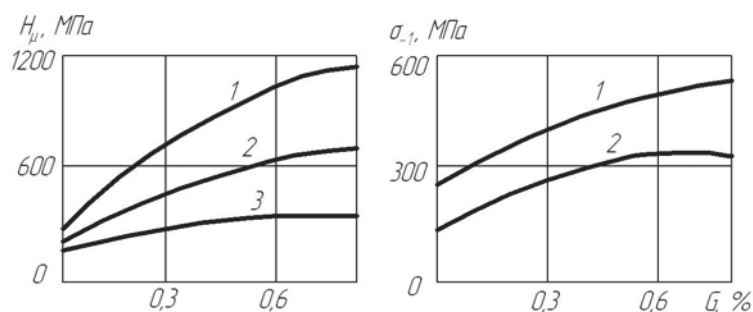
Очевидно, що суттєвий вплив на експлуатаційні характеристики матеріалів, залишкове напруження, твердість, структуру і мікрорельєф поверхні надають режими обробки. Результати випробувань сталей 20 і 45 після обробки лазером приведені на рис. 4. Вони свідчать про можливість як підвищення меж витривалості, так і її зниження. Це пов'язано з технологічними параметрами обробки, видом матеріалу. Зниження характеристик опору втомі спостерігається при обробці CO<sub>2</sub>-лазером з оплавленням поверхні і при обробці імпульсним лазером як з оплавленням, так і без оплавлення поверхні. При цьому простежується залежність меж витривалості від вмісту вуглецю в сталі (рис. 5). Збільшення енергії випромінювання у разі обробки

імпульсним лазером або зменшення швидкості руху зразка відносно променя (у разі обробки CO<sub>2</sub>-лазером) призводить до зниження характеристик опору втомі. Це спостерігається при обробці сталей 20, 35, 45. При цьому, як наголошувалося, чутливість сталей з вищим вмістом вуглецю до обробки вище.



1,2 – вихідний матеріал сталь 45 та 20 відповідно; 3, 4, 5 – обробка CO<sub>2</sub>-лазером постійної дії, сталь 45 (3 – обробка без оплавлення поверхні, 4 – з невеликим оплавленням; 5 – зі значним оплавленням); 6 – обробка імпульсним лазером з оплавом сталі 45; 7, 8 – обробка CO<sub>2</sub>-лазером, сталь 20 (7 – без оплаву, 8 – зі значним оплавом); 9 – обробка імпульсним лазером без оплаву поверхні сталі 20

Рисунок 4 – Криві втоми зразків з лазерним зміцненням



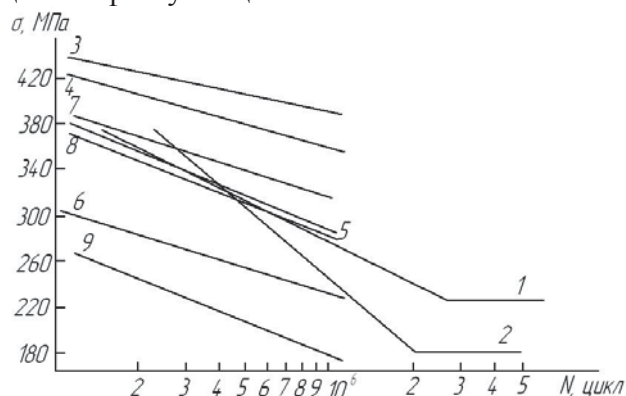
1 – лазерне термозміцнення; 2 – звичайне загартування;  
3 – незміцнений стан

Рисунок 5 – Залежність твердості та межі витривалості від вмісту вуглецю в сталі при лазерному термозміцненні

У разі зменшення енергії випромінювання, що підводиться до поверхні зразка, спостерігається підвищення характеристик опору втомі. Візуальна оцінка оброблених зразків показує, що при обробці як імпульсним, так і CO<sub>2</sub>-лазером характеристики опору втомі стають вищими, як це вже наголошувалося, при використанні режиму без оплавлення поверхні. При цьому слід зазначити збільшення кута нахилу гілки кривої втомі при випробуваннях зразків після лазерного термозміцнення, що, мабуть, пов'язано із зниженням пластичності сталей.

Локальність лазерної дії дозволяє проводити обробку труднодоступних ділянок поверхні, тому можна говорити про значні переваги цього виду зміцнення при обробці концентраторів напруги. Як видно з рис. 6, лазерне термозміцнення підвищує характеристики опору втомі зразків з концентраторами. Для коефіцієнта концентрації

напруги  $\alpha_{\sigma} = 1,75$  при одних і тих же режимах обробки величини опору втомі вище. Це можна пояснити, з одного боку, характером розподілу потужності випромінювання (при зменшенні радіусу закруглення зменшується кількість енергії, що вводиться в поверхню), з іншої – тим, що за наявності різкої концентрації напруги осередок руйнування переходить на поверхню і збільшення товщини зміцненого шару не призводить до підвищення ефекту зміцнення.



1, 2 – вихідний матеріал,  $\alpha_{\sigma} = 1,75$  та  $2,83$  відповідно;  
3-6 – оброблені зразки,  $\alpha_{\sigma} = 1,75$ ,  $v$ , см/хв: 30 (3), 60 (4), 104 (5)  
та 150 (6); 7 – 9 – оброблені зразки  $\alpha_{\sigma} = 2,83$ ,  $v$ , см/хв: 60 (7),  
104 (8) та 150 (9)

Рисунок 6 – Вплив режимів лазерної обробки на характеристики опору втомі при наявності концентрації напружень (сталь 25),  $b = 3$  мм, потужність випромінювання  $N = 800$  Вт

**Висновки.** Таким чином, лазерне термозміцнення дозволяє збільшувати значення меж витривалості. Разом з тим показано, що обробка лазером може призводити до зниження характеристик опору втомі. Зміна опору втомі при лазерній обробці пов'язана із структурними змінами обробленої зони, її твердістю, залишковою напругою, що формується, мікрорельєфом поверхні. Перераховані властивості пов'язані з технологічними параметрами обробки – типом лазера, потужністю випромінювання, швидкістю обробки, геометрією нанесення доріжок зміцнення, площею обробленої поверхні, а також з орієнтацією робочого напруження по відношенню до напрямку нанесення доріжок зміцнення (внаслідок анізотропії властивостей зміцнених зон вздовж і впоперек лазерної доріжки). У зв'язку з цим, для отримання меж витривалості матеріалів і деталей вище за початкові значення необхідний аналіз режимів обробки стосовно конкретних умов експлуатації деталей машин. Для вирішення цього завдання необхідне встановлення зв'язку властивостей поверхні (залишкових напружень, твердості, шорсткості і так далі) з технологічними режимами і експлуатаційними параметрами.

## Список літератури

1. Мажейка А.И. Лазерне термодформационне зміцнення деталей сільськогосподарських машин [Текст] / А.И. Мажейка, О.Б. Чайковський, Аль-шара Мотаз Мухаммед, А.М. Лутай // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – 2006. – Вип. 36. – С. 140-146.
2. Mazheika, A.I. Application of combined laser treatment for hardening of critical parts: abstracts of papers and program of the fourth international conference [ Laser technologies in welding and materials

processing] (26-29 may, 2009), Kiev, E.O.Paton Electric Welding Institute of NAS Ukraine, 2009. – P. 24-25.

3. Мажейка О.Й. Зміцнення деталей сільськогосподарських машин сучасними методами деформуванням [Текст] / О.Й. Мажейка, О.Б. Чайковський, А.Н. Лутай // Збірник наук. праць Кіровоградського націон. техн. університету. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – 2010. – Вип. 40, ч. 1. – С. 253-256.

**Olexandr Mazheyka, prof., PhD tech. sci.**

*Kirovograd National Technical University, Kropyvnickiy, Ukraine*

**Evaluation of mechanical properties of materials with laser thermal hardening of parts agricultural machinery**

The aim of this work was to study the strength characteristics of agricultural machinery parts after laser strengthening of the recovery, which enhances their life.

Past studies testing steels and cast irons on the characteristics of fatigue resistance after laser treatment in respect of parts of agricultural machinery. The connection laser power and processing speed to achieve yakystnyh laser process parameters thermal hardening details. Proved that laser thermal hardening allows to increase the value limits of endurance. However, it is shown that laser treatment can lead to a decrease in fatigue resistance characteristics. Significant influence on the performance characteristics of materials, residual stresses, hardness, micro-structure and surface modes provide treatment. Locality laser treatment allows processing of hard-surface areas, so we can talk about the significant benefits this type of consolidation of the processing stress concentrators.

The study found that laser thermal hardening allows to increase the value limits of endurance. However, it is shown that laser treatment can lead to a decrease in fatigue resistance characteristics. Fatigue resistance change with laser treatment is associated with structural changes in the treated area, its hardness, residual stress generated, micro surface. These properties associated with processing technological parameters - type of laser radiation power, speed processing, strengthening geometry drawing paths

**laser-strengthening, material properties, fatigue resistance, steel, ductile iron, endurance limit**

Одержано 24.11.16

**УДК 621.98.04**

**В. Я. Мірзак, ст. викл., В. М. Боков, проф., канд. техн. наук**

*Кіровоградський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна*

*E-mail: bokov\_vm@mail.ru*

## Принцип динамічного підстроювання як спосіб підвищення якості тонколистового розділового штампування

Запропоновано та досліджено принцип динамічного підстроювання як спосіб підвищення якості тонколистового розділового штампування за рахунок розвантаження напрямних вузлів від радіальних зусиль та суттєвого зменшення деформації деталей штампа. Розроблено та випробувано гаму оригінальних механічних компенсаторів похибок системи «прес-штамп», які використовуються як пристрої для реалізації принципу динамічного підстроювання.

**динамічне підстроювання, механічний компенсатор, якість розділового штампування, тонколистове штампування**

© В. Я. Мірзак, В. М. Боков, 2016