

**А.И. Мажейка, проф., канд. техн. наук, О.Б. Чайковський, доц., канд. техн. наук,
Аль-Шара Мотаз Мухаммед, магістр**

Кіровоградський національний технічний університет

А.М. Лутай, ст. викл.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

Лазерне термодетформаційне зміцнення деталей сільськогосподарських машин

В статті викладені основні положення нової концепції лазерного термодетформаційного зміцнення, проведена оцінка механічних властивостей деталей, які зміцнені.

лазерне зміцнення, моделювання, процес, термомеханічна обробка, аустеніт, зносостійкість

Лазерне зміцнення є ефективним способом підвищення зносостійкості різних деталей машин і інструментів, які використовуються у сільському господарстві. Однією з проблем лазерної поверхневої зміцнюючої обробки є можливість її застосування для підвищення опірності зношуванню та втомленої міцності деталей, що працюють при циклічних знакоперемінних навантаженнях. У першу чергу це зв'язано з особливостями напруженого стану поверхневого шару матеріалу деталі, структура якого сформована в процесі лазерного опромінювання. Відомо, що на втомлену міцність і опірність матеріалу втомленому зносові домінуючий вплив мають величина, знак і характер розподілу залишкових макронапруг. При лазерному зміцненні залишкові макронапруги формуються в наслідок дії двох конкуруючих процесів - чисто термічного "нагрівання-охолодження" і структурно-фазових перетворень.

Варіюванням режимами обробки встановлено, що в поверхневому шарі можуть формуватися як стискаючі, так і розтягуючі напруження. Більш того, вони можуть змінювати свій знак навіть у межах однієї зони лазерного нагрівання в залежності від швидкості обробки, густини потужності випромінювання, хімічного складу і вихідної структури сталі. Останнє свідчить про те, що на загальний напружений стан виробу суттєво буде впливати і закономірність розміщення зміцнених зон по оброблюваній поверхні. Таким чином, процес формування залишкових макронапруг при лазерному зміцненні є багатофакторним і неоднозначним.

У зв'язку з цим, при вирішенні конкретної технологічної задачі дуже складно, а іноді і неможливо, знайти такі умови обробки деталі, які б забезпечували одержання зміцненого шару, що має одночасно необхідну глибину, мікроструктуру, твердість, стискаючи залишкові напруги.

Одним зі способів одержання гарантованих стискаючих залишкових макронапруг є метод поверхневого пластичного деформування: обкатуванням роликом, кулькою й ін.[4].

Під дією напруг від зовнішніх сил у металах виникає пластична деформація. Глибина поширення пластичної деформації визначається силою тиску і структурою сталі. При зміні сили тиску від 25 до 100 кгс величина наклепу в сталі 45 зростає від 0,4-0,5 мм до 1,2-1,3 мм [4]. На глибину деформованого шару, величину і характер розподілу залишкових напруг істотно впливає сила тиску в зоні контакту і швидкість деформації.

Аналіз особливостей розглянутих методів показує, що їхнє сполучення в одному процесі може забезпечити формування зміцненого шару зі структурою, що володіє

всіма перевагами структури лазерного гартування і до того ж має сприятливі, з точки зору підвищення втомленої міцності і зносостійкості, стискаючі залишкові макронапруги.

Моделювання процесу лазерного термодеомаційного зміцнення

Оскільки в основі лазерного термодеомаційного зміцнення лежать три процеси – нагрівання, деформування і загартування, то для вибору технологічної схеми обробки, її параметрів, визначення режимів опромінювання, величини і координати крапки прикладання деформуючого зусилля необхідно дослідити закономірності зміни термічного циклу "нагрівання-охолодження".

Розрахункова схема процесу термодеомаційної обробки наведена на рис. 1.

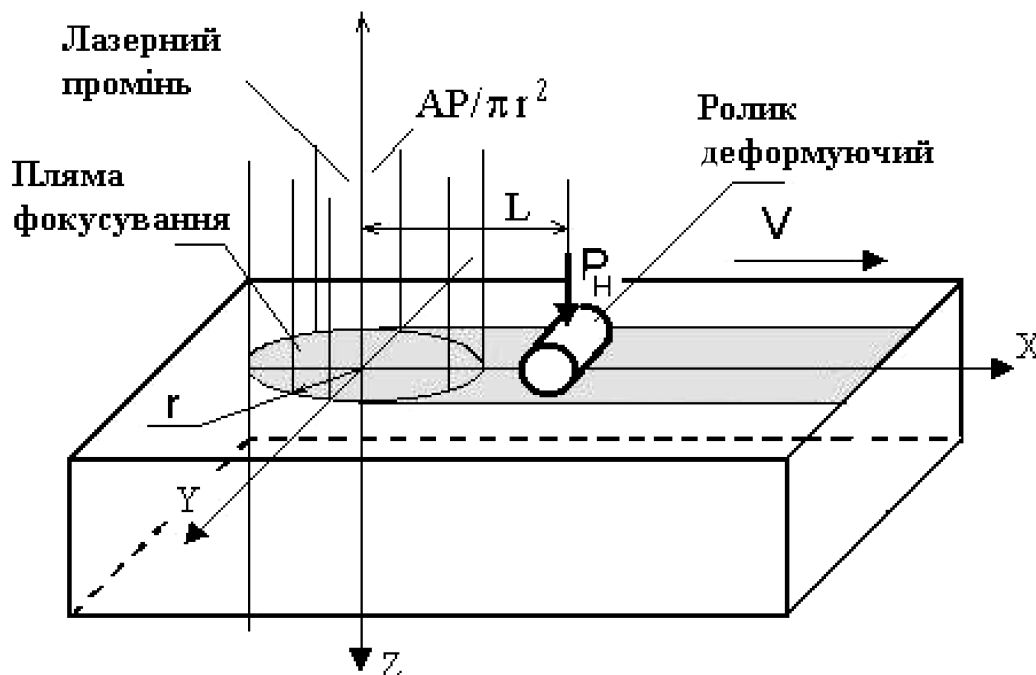


Рисунок 1 – Розрахункова схема процесу лазерної термодеомаційної обробки

Для дослідження використовуємо модель одномірного нагрівання напівнескінченного середовища необмеженим поверхневим тепловим джерелом з постійною інтенсивністю $W_p = A \cdot P / \pi \cdot r_0^2$, Вт/см², що діє протягом часу $t = 2 \cdot r_0 / V$, (A - поглинальна здатність поверхні; P - потужність лазерного випромінювання; r_0 - радіус плями фокусування; V - швидкість переміщення теплового джерела). При цьому виконується умова, $r_0 \gg (at)^{1/2}$. Якщо прийняти, що теплофізичні характеристики речовини (λ - теплопровідність, c - об'ємна теплоємність, a - коефіцієнт температуропроводності) не залежать від температури (для зменшення помилки беремо їхні значення для високотемпературної області нагрівання) і зневажити тепловіддачу з поверхні, то розподіл температури по глибині в різні моменти часу $t > 0$ описується відомою залежністю [5]:

$$T(z, t) = \frac{q}{\lambda} 2\sqrt{at} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right) - \frac{z}{2\sqrt{at}} \times \Phi^*\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) \right\},$$

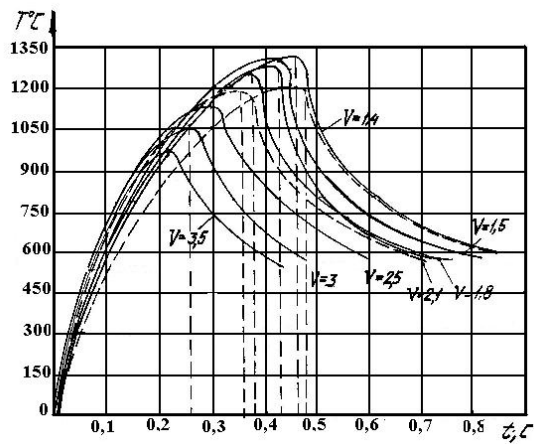
де $\Phi = 1 - \Phi^*$ - функція помилок;

λ - теплопровідність;

z - глибина проникнення заданої ізотерми.

Вважаємо, що процес лазерного термомеханічного зміцнення буде здійснюватися без оплавлення поверхні, тобто в інтервалі температур $T_z < T < T_{пл}$, де T_z - температура загартування даного матеріалу, $T_{пл}$ - температура плавлення. Оброблюваний матеріал - нормалізована сталь 45, теплофізичні характеристики якої відповідають: $K = 0,314$ Вт/см.град; $a = 0,07$ см²/с; $c = 4,465$ Дж/см³.град; $T_{пл} = 1300^\circ\text{C}$; $T_z = 780^\circ\text{C}$. Останнє значення скорегуємо через те, що при лазерному нагріванні через високі швидкості відбувається зміщення кінця аустенітного перетворення в область високих температур, на 70°C и приймаємо $T_z = 850^\circ\text{C}$.

На рис.2 представлені результати розрахунку зміни температури поверхні в часі при лазерному опроміненні на наступних режимах: $P=1000$ Вт, діаметр плями нагрівання $d_0 = 0,65$ см; $V = 3,5$ см/с; поглинальна здатність поверхні $A=0,8$. Як видно з графіків (рис. 2) зі збільшенням швидкості обробки спостерігається зниження температури поверхні матеріалу. При цьому також (рис. 3) зменшується глибина загартованого шару.



$P=1000$ Вт - потужність випромінювання,
 $d_0 = 6,5$ мм - діаметр плями фокусування;
 V - 1,4-3,5 - швидкість обробки см/с.

Рисунок 2 – Зміна температури (T) поверхні сталі 45 у часі (t) у залежності від швидкості обробки (V)

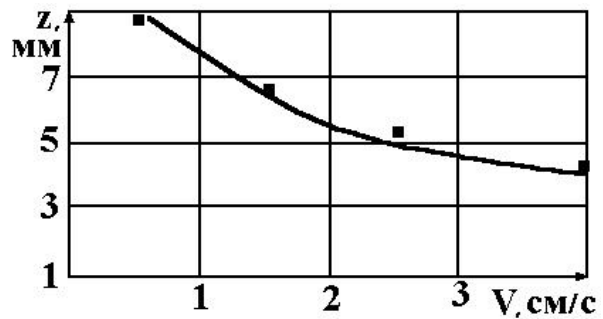


Рисунок 3 – Залежність глибини (z) загартованого шару від швидкості обробки (V):
 $P = 1$ кВт; $d_0 = 6,5$ мм.

Процес лазерного термомеханічного зміцнення, щоб уникнути розвитку процесу рекристалізації і застосовувати як можна менші величини зусиль до деформуючих роликів, доцільно проводити при температурах $(0,5-0,6)T_{пл} < T < T_{пл}$, тобто для сталі 45 - у діапазоні від 650°C до 1300°C .

Таким умовам задовольняють практично всі досліджені режими (рис. 2). Однак технічно реалізувати цей процес навіть при найнижчій швидкості $V=1,4$ см/с не можливо через малість відстані між максимумом температури і можливою крапкою прикладення деформуючого зусилля. Конструктивно виготовити такий пристрій практично неможливо.

Виходом з цієї ситуації може бути як збільшення діаметра плями нагрівання, так і зниження температури, при якій буде здійснюватись деформування. Збільшити діаметр плями нагрівання можна, якщо підвищити ступінь розфокусування лазерного променя, але при цьому збільшиться нерівномірність розподілу інтенсивності випромінювання по плямі нагрівання. З метою усунення цього недоліку, доцільніше застосувати пристрій, який дозволяє сканувати променем.

Однак обидва ці способи зажадають збільшення потужності лазерного випромінювання. Приймавши, як конструктивно-задовільну величину $L = 12$ мм, можна

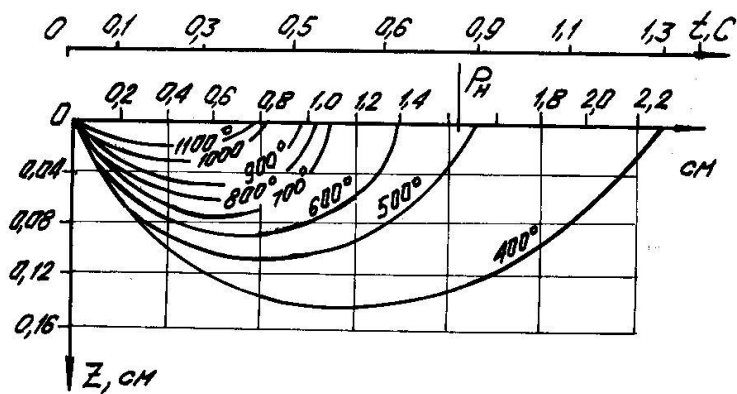


Рисунок 4 – Розподіл температур по глибині поверхневого шару сталі 45: $P=1300$ Вт; $d_0 = 6,5$ мм; $V= 1,7$ см/с

визначити температури, при яких доцільно проводити "теплу" термдеформаційну обробку ($T=325^\circ - 650^\circ$ С) і відповідні швидкості опромінення. Для розглянутого випадку найбільш раціональними режимами лазерної обробки є: $P=1000$ Вт, $d_0 = 8$ мм, $V=1,7$ см/с. З рис.4 видно, що в цьому випадку матеріал прогрівається на досить велику глибину, що забезпечує одержання загартованого й одночасно наклепаного шару достатніх розмірів.

Величину деформуючого зусилля можна визначити, знаючи температуру, при якій буде проводитися деформування, опір деформації в залежності від температури [7] і знаючи бажану величину наклепу [4]. При цьому $F=2\delta^2\sigma$. Так, для сталі 45 при $\delta = 0,7$ мм, величині $\sigma = 425$ МПа при $T = 460^\circ$ С, значення необхідного зусилля лежить у межах $F = 50-60$ кгс.

Таким чином, отримані дані можуть бути основою для розробки конструкції деформуючого пристрою і проведення експериментальних досліджень.

Експериментальне обладнання і методика проведення досліджень

Для проведення експериментальних досліджень був розроблений спеціальний стенд, що включає потужний електророзрядний CO_2 лазер, 3-х координатний стіл з системою ЧПУ, систему фокусування випромінювання сполучену з системою навантаження, пристрій для деформування поверхні деталі роликом. Для фокусування випромінювання використовувалася лінза з КСІ з фокусною відстанню $f = 350$ мм. Для деформування була застосована конструкція пристрою, в основі дії якої використовувалася пружина стиску (рис.5). Змінюючи положення спеціального кільця можна плавно регулювати величину зусилля в діапазоні $F= 8...65$ кгс. Попередньо пристрій тарувався за допомогою динамометра стиску ДОСМ-3-01.

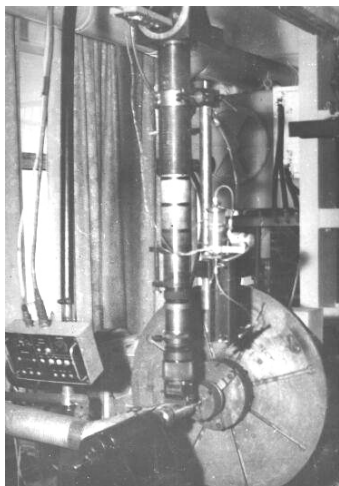


Рисунок 5 – Пристрій для поверхневого лазерного пластичного деформування

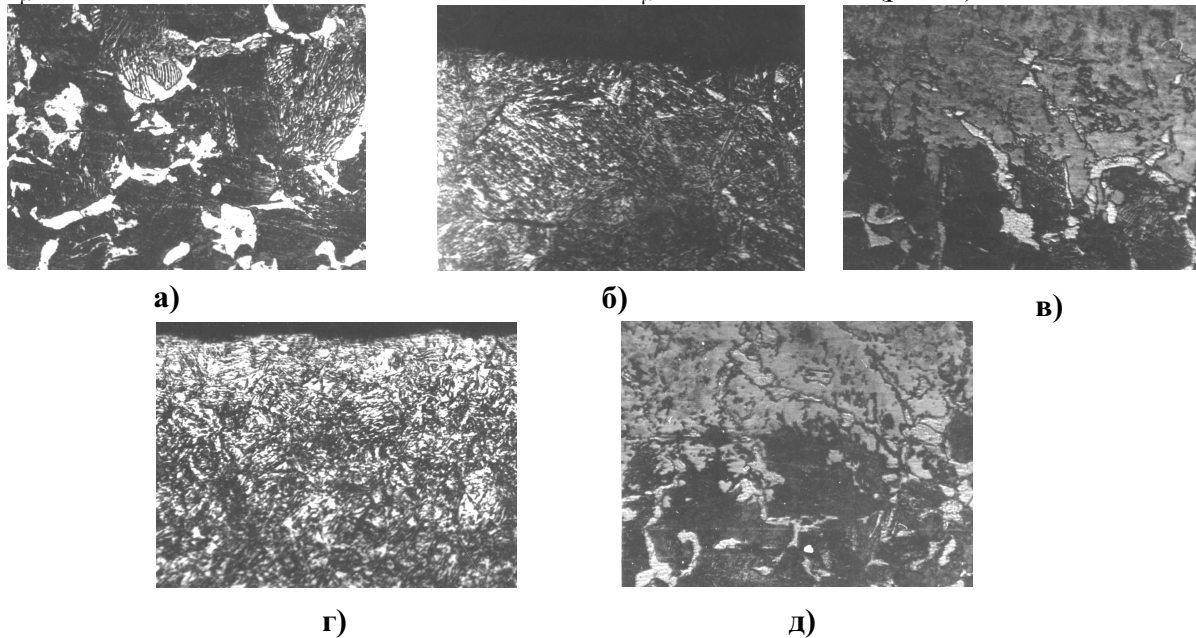
Зразки з нормалізованої сталі 45 з розмірами $40 \times 40 \times 5$ мм фосфатувались і піддавались чисто лазерному та лазерному термдеформаційному зміцненню при наступних умовах: потужність випромінювання $P= 1000-1200$ Вт; діаметр плями фокусування, $d_0 = 4,5; 6,5; 8$ мм, швидкість руху зразка відносно променя, $V=1,5$ см/с; $1,7$ см/с; $1,8$ см/с; величина зусилля, що деформує, $F= 43; 50; 57$ кгс, відстань від центра плями фокусування до крапки прикладання зусилля $L= 8; 10; 12$ мм.

Після проведення термдеформаційного зміцнення зразки розрізалися на електроерозійному верстаті і

піддавалися металографічному та дюрOMETричному аналізу. Частина зразків досліджувалася на предмет оцінки величини і характеру розподілу макронапруг рентгенівським методом.

Результати досліджень

У вихідному стані сталь 45 має неоднорідну крупнозернисту ферито-перлітну структуру: пластинчастий перліт і розташований по границям зерен ферит (рис. 6а). Після лазерного нагрівання унаслідок великого градієнта температур добре простежується послідовність фазових перетворень. На периферії зони перлітні колонії частково, у приповерхніх шарах повністю перетворившись в аустеніт, при охолодженні утворюють мартенсит з високою твердістю. У самої поверхні де, судячи з появи дрібнозернистого фериту, температура набагато перевищувала крапку A_{c3} , при охолодженні утворюється структура, що складається з ділянок з високим змістом вуглецю ($\sim 0,8\%$) з аустеніту, що утворився на місці перлітних колоній, і аустеніту з низьким змістом вуглецю, що виник на місці ферита. За даними експерименту при лазерному зміцненні мікротвердість складала у поверхні до глибини 50 мкм $H_{\mu} = 8000-9000$ МПа, на глибині до 650 мкм - $H_{\mu} = 600-790$ МПа (рис. 7).



а - вихідний стан (х400); б - структура приповерхневого і перехідного (в) шару після лазерної обробки; $P = 1$ кВт; $d_0 = 4,5$ мм; $V = 1,5$ см/с; г - структура приповерхневого і перехідного (д) шару після лазерної термодформувальної обробки: $P = 1$ кВт; $d_0 = 4,5$ мм; $V = 1,5$ см/с; $V = 12$ мм; $F = 57$ кгс.

Рисунок 6 – Мікроструктура сталі 45

При лазерній термодформувальній обробці створюються такі умови температурної пластичної деформації, при яких подавляється розвиток рекристалізаційних процесів і створюється особливий структурний стан, що характеризується підвищеною густиною недосконалостей і особливим їхнім розташуванням з утворенням розгалужених субграниць.

Високотемпературна деформація аустеніту має істотні особливості, що визначають своєрідність процесів, що протікають після її завершення, а також процесів, що відбуваються безпосередньо при її протіканні. Дислокаційна побудова аустеніту, деформованого при високій температурі, характеризується утворенням тривимірних сіток дислокацій стійкої фрагментованої, полігонізованої субструктури. Після високотемпературної деформації залишаються тільки стабільні для цих температур дислокації. Рекристалізація в такій структурі відбувається не так інтенсивно.

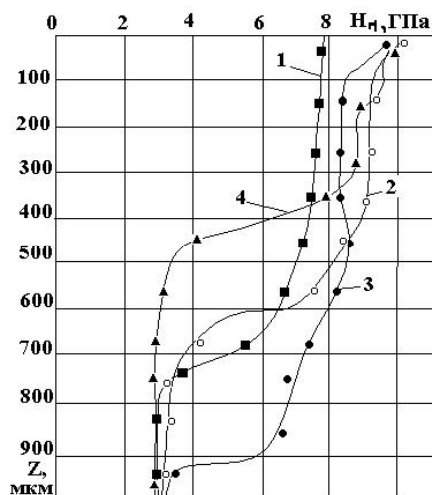


Рисунок 7 – Розподіл мікротвердості ($H\mu$) по глибині (z) у сталі 45, обробленій: 1 - лазерним випромінюванням ($P = 1$ кВт; $d_0 = 4,5$ мм; $V = 1,5$ см/с); лазерним випромінюванням з пластичним деформуванням при $P = 1$ кВт; $d_0 = 4,5$ мм; $V = 1,5$ см/с; 2 - $L = 12$ мм; $F = 57$ кгс; 3 - $L = 12$ мм; $F = 43$ кгс; 4 - $L = 12$ мм, $F = 50$ кгс

Таким чином, процес високотемпературної деформації аустеніту зв'язаний зі створенням своєрідної дислокаційної структури, яка здобуває форму фрагментованої сітки і має підвищену термічну стійкість в результаті протікання полігонізації. Дислокаційна побудова аустеніту успадковується мартенситом, структура якого стає розділеною на фрагменти, які відповідають по своїм розмірам і конфігурації фрагментованій структурі вихідного аустеніту. Мартенсит має більш низький сумарний зміст вуглецю, що визначає його підвищену пластичність (у порівнянні з мартенситом, отриманим при звичайному загартуванні). Зміцнення внаслідок утворення більш міцних фаз доповнюється фазовим наклепом, тобто пластичною і пружною деформацією, обумовлених зміною об'єму матеріалу в результаті поліморфного перетворення.

Результати дослідження і порівняння структури сталі 45 після лазерного зміцнення і лазерної термодіформувальної обробки показали, що в другому випадку відбулося більш сильне здрібнювання зерна (рис. 6, в).

Виявлено залежність зменшення розмірів зерна з підвищенням величини деформуючого зусилля. При порівнянні графіків зміни твердості від деформуючого зусилля видно, що велика мікротвердість відповідає більшому навантаженню (рис. 7, крива 2, 3).

Дослідження напруженого стану сталі 45, підданій лазерному термомеханічному зміцненню знайшли наявність у поверхневому шарі стискаючих залишкових напруг, величина яких для досліджених навантажень коливалася в межах (-400...-500) МПа.)

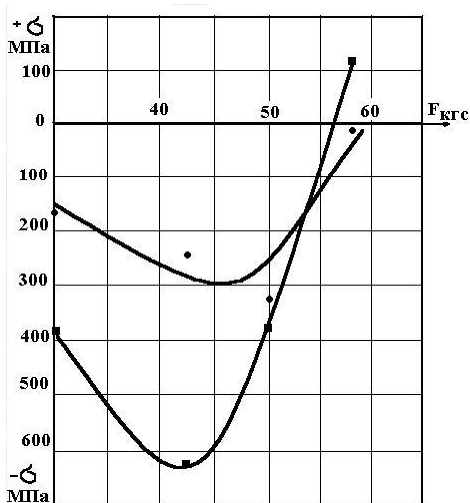


Рисунок 8 – Залежність рівня залишкових макронапруг (σ) у зміцненому шарі сталі 45 від величини деформуючого зусилля, (F): $P = 1000$ Вт, $V = 1,8$ см/з, $L = 10$ мм $d_0 = 6,5$ мм (1), $d_0 = 8$ мм (2)

(рис. 8).

Виконане дослідження свідчить про перспективність лазерного термодіформувального зміцнення, як методу підвищення зносостійкості і втомленої міцності деталей важко навантажених сільськогосподарських машин.

З вищерозглянутого можна зробити наступні висновки:

1. Лазерне термодіформувальне зміцнення є перспективним засобом підвищення зносостійкості і втомленої міцності деталей сільгоспмашин, що працюють при циклічних навантаженнях.

2. Шляхом математичного моделювання теплових процесів для сталі 45 встановлено діапазон температур ($T = 650^\circ - 325^\circ$ C), при яких доцільно проводити термодіформувальну обробку, визначені координати крапки прикладання деформуючого зусилля, (8-12 мм від центра пучка в напрямку переміщення деталі) і діапазон його величин (40 - 60 кгс).

3. У результаті термомеханического деформування в сталі 45 у порівнянні з чисто лазерним впливом утвориться структура, що має збільшену на 1500 МПа мікротвердість і на 100-200 мкм - глибину зміцненого шару. У поверхневому шарі формуються стискаючі залишкові напруги, рівень яких (-400...-500 МПа) визначається величиною деформуючого зусилля та швидкістю обробки.

3. Для одержання оптимального сполучення механічних властивостей після лазерної термомеханической обробки варто проводити наклеп аустеніту до загартування в умовах, коли одночасно з підвищенням густини дислокацій відбувається їхня перебудова, найкраще по типу полігонізації. Тоді мартенситне перетворення йде не тільки в здрібненій структурі з високою щільністю дислокацій, але й у структурі, яка характеризується більш рівномірним розподілом дислокацій. Завдяки останньому, загартований високоміцний метал відрізняється також і підвищеною пластичністю, тобто для одержання високого комплексу механічних властивостей важлива не тільки визначена висока щільність дислокацій, але й оптимальна їх конфігурація (розподіл).

Список літератури

1. Коваленко В.С., Головки Л.Ф., Безикорнов А.И. О напряженном состоянии поверхностных слоев материалов, упроченных излучением лазера. Электронная обработка материалов, 2, 1980.— С. 34-37.
2. Остаточные напряжения в углеродистых сталях после поверхностного упрочнения излучением CO₂ лазера. /В.С. Великих, В.П. Гончаренко, А.Ф. Зверев и др., МиТОМ, 4, 1985.— С. 9-12.
3. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Основы лазерного термоупрочнения сплавов. М.: Высшая школа, 1988, 159 с.
4. Папшев Д.Д. Отделочно - упрочняющая обработка поверхности пластическим деформированием. М.: Машиностроение.— 1975, 152 с.
5. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел, М.: Наука, 1964, 487 с.
6. Рыкалин Н.Н., Углов А.А. Кокора А.Н., Лазерная обработка материалов, М.: Машиностроение, 1975, 250 с.
7. Полухин П.И., Чук Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. М.: Металлургия, 1963, 352 с.

В статье изложены основные положения новой концепции лазерного термомеханического упрочнения, проведена оценка механических свойств упрочнения деталей.

Substantive provisions of the new concept of laser thermomechanical harden, carry out valuation mechanical quality harden details.

Одержано 09.11.06