

5.1 Вибір режимів обробки при неперервному лазерному випромінюванні

На сьогодні ще не створена така математична модель технологічного процесу зміцнення неперервним лазерним випромінюванням, яка б урахувала всі умови обробки. Тому при виборі режимів обробок необхідно керуватися або експериментальними залежностями, або окремими теоретичними розрахунками за якимось параметром.

Однією з головних задач при виборі режимів обробки є аналітичне визначення інтервалу потужностей лазерного випромінювання, необхідних для отримання зміцненого шару без зміни шорсткості поверхні. Іншою задачею є оцінка швидкості v відносного переміщення.

Розглянемо методику розрахунку цих параметрів.

При високій швидкості v відносного переміщення променя та оброблюваної поверхні нормально кругове джерело на поверхні напівнескінченного тіла стає нормально лінійним. Тоді процес розповсюдження тепла описується рівнянням

$$T(y, z, t) = \frac{2P_0}{vcV} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right)}{\sqrt{4\pi at}} \cdot \frac{\exp\left[-\frac{y^2}{4a(t+t_0)}\right]}{\sqrt{4\pi a(t+t_0)}}, \quad (5.1)$$

де $P_0 = AP$ - ефективна потужність лазерного теплового джерела;

P – потужність лазерного випромінювання;

A – поглинальна здатність матеріалу;

$a = \frac{\lambda}{cV}$ – коефіцієнт температуропроводності;

λ – коефіцієнт теплопровідності;

c – теплоємність;

V – густина матеріалу;

$t_0 = \frac{1}{4ak}$; $k = \frac{1}{r^2}$ – коефіцієнт зосередженості джерела;

$t = \frac{2r}{v}$ – час дії випромінювання на матеріал;

r – радіус сфокусованої плями.

У випадку, коли $y = z = 0$ температури на осі абсцис буде дорівнювати

$$T(0,0,t) = \frac{P_0}{4\pi\lambda r \sqrt{1 + \frac{vr}{8a}}}. \quad (5.2)$$

Температура поверхні $T(0,0,t)$ в процесі зміцнення повинна перевищувати температуру гартування $T_{гарт}$, але не бути вищою від температури плавлення $T_{пл}$, тобто

$$T_{гарт} < T(0,0,t) \leq T_{пл}. \quad (5.3)$$

Використовуючи вирази (5.2) та (5.3), можна визначити максимальну та мінімальну потужності випромінювання, тобто допустимий інтервал потужності, при якій є можливим зміцнення матеріалу:

$$\left. \begin{aligned} P_{0\max} &= 4\pi\lambda r T_{пл} \sqrt{1 + \frac{vr}{8a}} \\ P_{0\min} &= 4\pi\lambda r T_{гарт} \sqrt{1 + \frac{vr}{8a}} \end{aligned} \right\}. \quad (5.4)$$

Тобто потужність випромінювання, необхідна для виконання процесу зміцнення може бути записаною, як величина, що знаходиться в інтервалі

$$P_{0\min} < P_0 < P_{0\max},$$

або

$$4\pi\lambda r T_{пл} \sqrt{1 + \frac{vr}{8a}} < P_0 < 4\pi\lambda r T_{гарт} \sqrt{1 + \frac{vr}{8a}}.$$

Крім того, ще можна показати (зі знайдених обмежень), що швидкість відносного переміщення променя і деталі буде знаходитися в інтервалі

$$\left[\left(\frac{P_0}{4\pi\lambda r T_{пл}} \right)^2 - 1 \right] \frac{8a}{r} \leq v < \left[\left(\frac{P_0}{4\pi\lambda r T_{гарт}} \right)^2 - 1 \right] \frac{8a}{r}. \quad (5.5)$$

Таким чином, виходячи з теплофізичних параметрів, поглинальної здатності поверхні та характеристик лазера, для зміцнення матеріалу без порушення шорсткості поверхні обирають r і за наведеними залежностями визначають необхідну потужність P_0 та швидкість обробки v .

Часто для того, щоб обрати режими обробки розробляються експериментальні залежності, які дають можливість в практичних умовах для конкретних матеріалів оцінити параметри процесу.

Наприклад, на рис. 5.1 наведена залежність глибини зони термічного впливу у модифікованому чавуні (з кулеподібним графітом) від густини потужності випромінювання та тривалості його дії. Припустивши, що коефіцієнт поглинання дорівнює 70 % та задавши необхідну глибину зміцнення, користуючись графіком, можна визначити спочатку густину випромінювання, а потім тривалість лазерного випромінювання і діаметр зони опромінення для необхідної продуктивності обробки (тобто, для швидкості процесу).

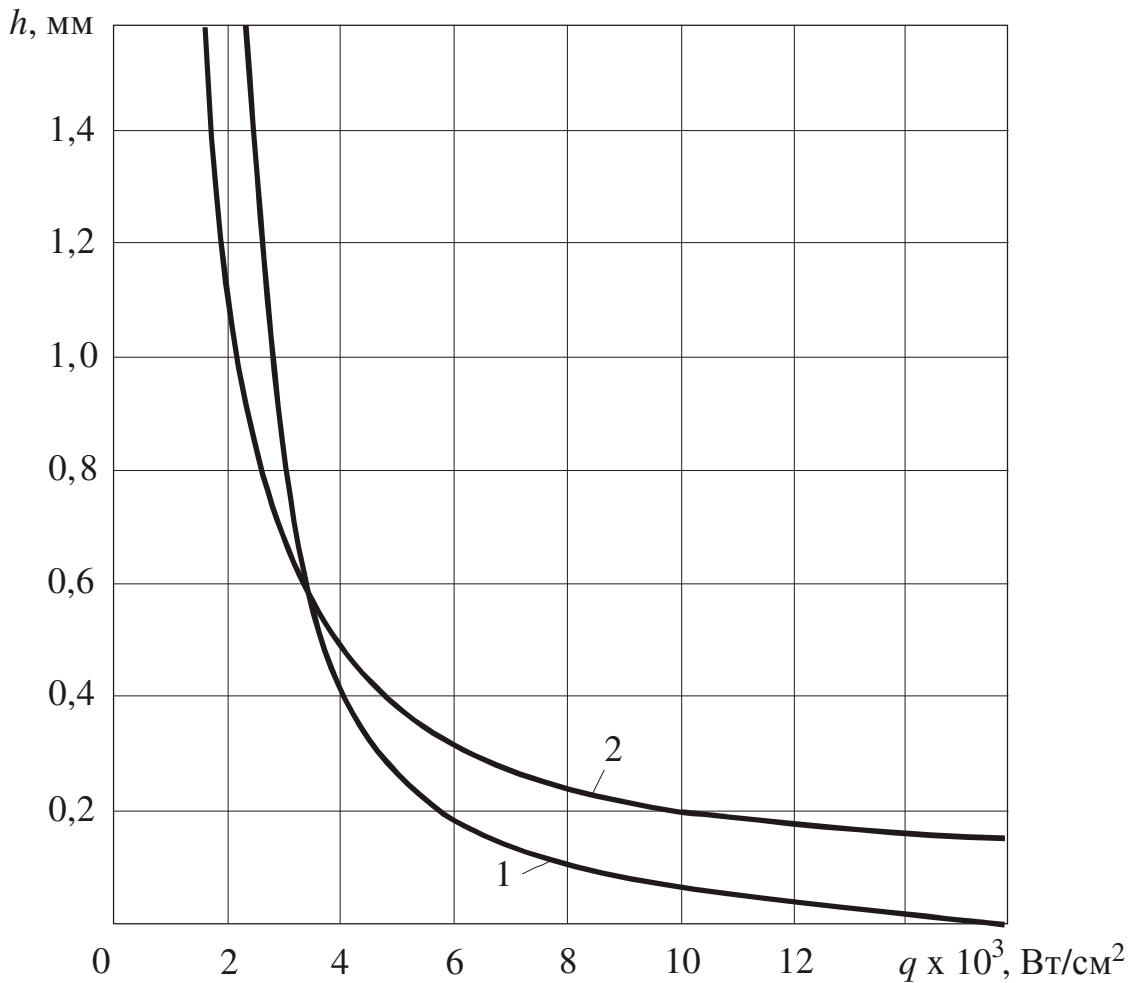


Рис. 5.1 Залежність глибини зони термічної дії у модифікованому чавуні від густини потужності випромінювання та тривалості його дії:

$$1 - t = f(q); 2 - h = f(q)$$

Тривалість t лазерної дії пов'язана з діаметром d зони опромінення і швидкістю v обробки співвідношенням

$$t = \frac{d}{v}. \quad (5.6)$$

В таблиці 5.1 наведені деякі характеристики процесу зміцнення модифікованого чавуну при використанні спеціальної чорної фарби у якості покриття.

Таблиця 5.1

d , мм	v , м/хв	P , кВт	h , мм	A , %	Π , $\times 10^3$ мм ² /хв
6,35	6,350	2,5	0,37	63	39,0
12,7	1,524	2,5	0,48	74	15,3
12,7	6,350	5,0	0,36	81	64,5
18,0	1,905	5,0	0,52	65	27,2

Обираючи оптимальні режими при зміцненні інструментальних сталей також часто використовують номограми, побудовані на експериментальних даних. Вихідними даними для таких номограм є мікротвердість та глибина зміцненого шару, які вимагаються. За енергетичний параметр використовують густину енергії випромінювання $W_E = qt = \frac{qd_0}{v}$. За залежностями $h = f(W_E)$ та $H_\mu = f(W_E)$ визначають густину енергії випромінювання, що відповідає заданим h та H_μ . З урахуванням технологічних можливостей обладнання обирають потужність випромінювання, діаметр плями фокусування та визначають густину потужності випромінювання, яка досягається за цих умов. За встановленими W_E та q визначають тривалість дії випромінювання. І вже потім, за значеннями діаметра плями d_0 та часу t лазерної дії, визначають швидкість обробки згідно виразу (5.6).

Наприклад, для сталі У10 оптимальні режими лазерної обробки при вихідних даних ($h = 580$ мкм, $H_\mu = 950$ МПа, $P = 800$ Вт) визначаються таким чином. Якщо необхідна висока продуктивність, то $d_0 = 5$ мм. Тоді густина енергії $W_E = 2 \cdot 10^3$ Дж/см². При цьому густина потужності складе $q = 4 \cdot 10^3$ Вт/см². Необхідну густину енергії W_E при $q = 4 \cdot 10^3$ Вт/см² можна отримати при дії лазерного випромінювання на поверхню сталі У10 протягом 0,5 с. Знаючи величини t та d_0 , встановлюють, що $v = 0,8$ м/хв.

Зазначені номограми можна використовувати і для розв'язку оберненої задачі: за заданими енергетичними параметрами та швидкістю обробки визначають глибину та мікротвердість зміцненого шару.

5.2 Лазерне легування та наплавлення матеріалів

Підвищення експлуатаційних характеристик поверхневих шарів матеріалів може досягатися не лише внаслідок структурних та фазових перетворень в зоні лазерної дії, а також і внаслідок утворення нового сплаву, який за хімічним складом відрізняється від матричного. Таке зміцнення поверхні за допомогою лазерного випромінювання називають **лазерним легуванням**. Причому, в основі знов утвореного сплаву знаходиться матричний матеріал. У випадку ж **лазерного наплавлення** (на відміну від лазерного легування) матричний матеріал може знаходитися лише у незначному пограничному шарі (так званому зв'язуючому середовищі) між матрицею та наплавленим шаром. Наплавлений же шар суттєво відрізняється від матриці.

Зазначені види зміцнення поверхонь є дуже перспективними у зв'язку зі значним ростом дефіциту традиційних легуючих матеріалів, таких як Мо, Ні, Со, Сr, V, W тощо. Окрім того, лазерне випромінювання дає можливість обробки важкодоступних ділянок деталей та інструментів. Реалізуються такі обробки, як за допомогою імпульсного, так і неперервного лазерного випромінювання. Закономірності режимів проплавлення в зоні лазерної дії визначаються способом подачі легуючих елементів до зони лазерної дії, властивостями матриці та режимами обробки.

Розглянемо існуючі способи подачі легуючого середовища до зони обробки.

1. Нанесення легуючого складу у вигляді порошку на оброблювану поверхню. Це є найбільш простий спосіб. Проте товщину нанесеного шару легуючого елементу дуже важко контролювати, що призводить до отримання різних значень глибини зміцненого шару. Окрім того виникає досить високе значення величини теплового опору між нанесеним шаром порошку та матрицею (внаслідок поганого контакту). Ще одним недоліком зазначеного способу є те, що під час обробки, внаслідок виникнення імпульсу віддачі, порошок здувається з оброблюваної поверхні.

2. Обмазка оброблюваної поверхні легуючим складом. У цьому випадку до порошку додають зв'язуючі речовини, наприклад, рідке скло, клей БФ-6, тощо. Недоліками цього способу можна вважати наступні. На межі шар-матриця виникає (як і в першому способі) досить значний тепловий опір, що призводить до низької ефективності втілення легуючого елементу. Це призводить до неоднорідності його розподілу у матриці. При цьому способі подачі легуючого елементу у випадку дії імпульсного лазерного випромінювання з енергією 10 Дж та тривалістю імпульсу 4 мс глибина легування не перевищує 200 мкм.

3. Накатка фольги з легуючого елементу на матричну поверхню. Даний спосіб забезпечує однакову товщину легованого шару. Глибина проникнення легуючого елементу в залежності від режимів обробки може коливатися від 50 до 600 мкм. Змінюючи товщину фольги, можна керувати

кількістю елементу, який вводиться в зону лазерної дії. За недоліки способу можна вважати: 1) труднощі щільного з'єднання фольги і матриці; 2) цей спосіб неможливо реалізувати на поверхнях, що мають складний профіль.

4. **Легування в рідині.** Воно відбувається при розміщенні оброблюваної поверхні у ванні з рідким легуючим середовищем. Це може бути вода, гліцерин з додатками легуючих елементів. Товщина шару регулюється глибиною занурення у ванну. Недоліки: 1) незначна концентрація легуючого елементу в рідині; 2) значні затрати легуючих елементів; 3) необхідність в очищенні поверхні після процесу.

5. **Легування у газоподібному легуючому середовищі.** Здійснюється або у замкнутому об'ємі з прозорим вікном, або при подачі газу в зону легування через сопло. Проте у другому випадку будуть дуже значними затрати газу; окрім того випускання його в атмосферу може призвести до порушення правил техніки безпеки. Як легуючий газ можна використовувати азот, пропан-бутанові суміші, що вміщують вуглець, тощо.

6. **Утримування легуючих елементів магнітним полем на поверхні.** Цей спосіб являє собою удосконалений варіант першого способу. Магнітне поле утримує на поверхні матриці феромагнетики (феробор, ферохром, сормайт, кермет, феросиліцій). Воно дозволяє також регулювати кут нахилу частинок до поверхні, тобто в деяких межах впливати на поглинальну здатність. Цей метод дає можливість утримування легких елементів у важкодоступних місцях, а також знизити затрати легуючих матеріалів.

7. **Електроіскрове нанесення легуючого складу.** Цей спосіб є дуже ефективним і технологічно простим. Товщини нанесеного шару вимірюються в межах від 10 до 300 мкм. Спосіб характеризується незначним тепловим опором між шаром та матрицею, оскільки утворюється перехідний шар товщиною 5 – 10 мкм. Як недолік можна зазначити те, що легуючі елементи повинні бути електропровідними, окрім того не завжди можна отримати необхідну товщину шару.

8. **Плазмене нанесення покриття** є дуже високоефективним. Воно забезпечує добрий тепловий контакт шару та матриці. Звичайно цим способом наносять сплави ВК 15, Т15К6, карбіди хрому, вольфраму, кобальту, титану, а також нітриди. Товщина шару може змінюватися в широких межах.

9. **Детонаційне нанесення покриття.** Цей спосіб ґрунтується на використанні енергії детонації в газах. Металевий порошок наноситься на матрицю за допомогою вибуху ацетиленокисневої суміші. За час вибуху (~ 0,2 с) утворюється шар товщиною 6 – 8 мкм. Товщина багат шарового покриття може досягати 0,01 – 0,4 мм. Проте цей спосіб відрізняється від інших своєю складністю реалізації та високою собівартістю.

10. **Електролітичне осадження легуючого покриття.** Товщина покриття може складати ~ 150 мкм. Покриття має добрий тепловий контакт з матрицею і дозволяє регулювати кількість легуючого елемента при зміні режимів лазерної обробки.

11. Подача легуючого складу в зону обробки синхронно з ЛВ. У цьому випадку по мірі проплавлення матриці легуючий елемент подається в матрицю. Проте у цьому випадку відбувається досить значне випаровування зразка.

Лазерне легування та наплавлення можуть бути охарактеризовані таким ж параметрами, як і інші види лазерного зміцнення, тобто:

- а) розмірними параметрами (ширина та глибина легування);
- б) ступенем зміцнення (мікротвердість);
- в) продуктивністю;
- д) шорсткістю обробленої поверхні.

Усі зазначені параметри залежать від енергетичних режимів та схем обробки, виду легуючого і матричного матеріалу, способу подання легуючого елемента до зони обробки, тощо.

5.3 Поліпшення службових характеристик металевих сплавів після лазерної обробки

Лазерна обробка може значною мірою впливати на зносостійкість, теплостійкість, механічні характеристики матеріалів, залишкові напруження у поверхневому шарі, корозійні властивості, тощо.

Розглянемо деякі характеристики матеріалів після лазерної обробки.

Зносостійкість поверхні суттєво залежить від її мікротопографії, яка після лазерної обробки має досить специфічний вигляд. Так, після імпульсного зміцнення з перекриттям плям, спостерігається регулярне чергування зміцнених та незміцнених ділянок. Тобто на поверхні утворюються острівки, що регулярно чергуються, з пониженою твердістю, які можуть служити своєрідними демпферами для виникаючих під час експлуатації виробу структурних та термічних напружень. Окрім того, така топографія поверхні сприяє підвищенню зносостійкості пар, що труться одна об одну. Якщо лазерна обробка відбувається в режимі оплавлення, то часткове випаровування матеріалу викликає утворення так званих “мікрокишень” (заглиблень), у яких може утримуватися, наприклад, рідке мастило, що також сприяє підвищенню зносостійкості поверхні. Підвищення зносостійкості може відбуватися і у випадку значного зниження (інколи – у два рази) коефіцієнта тертя між поверхнями після лазерної обробки в режимі оплавлення.

В процесі лазерної обробки значною мірою змінюються також такі механічні властивості матеріалів, як границя міцності σ_B , границя текучості $\sigma_{0,2}$, ударна в'язкість a_n . Ступінь їхньої зміни залежить як від режимів обробки, так і від типу матеріалу, що оброблюється.

Однією із найважливіших переваг лазерного зміцнення є практична відсутність деформацій матеріалу після обробки. Це дозволяє корінним чином змінити та спростити технологічний процес виготовлення деталей, виконувати лазерне зміцнення після кінцевих (фінішних) операцій. (У традиційній

термообробці необхідною є додаткова операція для усунення виникаючих температурних деформацій і тому така термообробка передбачається в середині технологічного циклу виготовлення деталі). Якщо говорити строго, то насправді деформації спостерігаються і після лазерної обробки, але вони є значно меншими, ніж після інших видів термообробки. Ступінь деформації залежить від розмірів деталі. Так, при незначній товщині заготовок з листових матеріалів після лазерного зміцнення можливим є існування деформацій. Проте вони можуть бути усунені компенсаційною лазерною обробкою зі зворотної сторони листової заготовки.

Теплостійкість (термостійкість) сплавів також змінюється в результаті лазерної обробки. Під терміном частіше за все розуміють збереження чи зміну твердості та інших механічних властивостей при високих температурах, а також при повторних циклічних нагріваннях і охолодженнях. Наприклад, у вуглецевих сталях типу У8 – У10, лазерне зміцнення призводить до деякого зростання теплостійкості. Подальше підвищення температури нагрівання викликає зниження мікротвердості, а ступінь цього зниження буде залежати від вмісту вуглецю в сталі. В інструментальній сталі Р6М5 в результаті лазерного зміцнення спостерігається підвищення теплостійкості на 70 – 80 °С, що може впливати на зносостійкість ріжучих інструментів, виготовлених з цієї сталі.

Залишкові напруження в матеріалі після лазерного зміцнення викликаються, як правило, нерівномірністю температурної дії, утворенням під час нагрівання чи охолодження нових структур з іншою густиною, наявністю включень, тощо.

Величина і знак отриманих напружень у найбільшій мірі залежать від густини потужності випромінювання, а також від виду матеріалу. Наприклад, при незначних густинах потужності випромінювання (обробці в режимі передоплавлення), у поверхневому шарі набувають розвитку досить високі розтягуючі напруження, причому область розповсюдження таких є співрозмірною з глибиною зони термічного впливу. Зростання густини потужності призводить до виникнення на поверхні тонкого розплавленого шару, що призводить до зниження розтягуючих напружень і вирівнювання їх значень за глибиною зони. Подальше підвищення густини потужності випромінювання супроводжується інтенсивним плавленням матеріалу. При цьому залишкові напруження на поверхні змінюють знак, тобто виникають стискуючі напруження. У глибині ж зміцненого шару величина розтягуючих напружень значно зростає. Така картина зміни напружень зі зміною густини потужності випромінювання є характерною для різних сталей, зокрема, Ст.45, ХВГ, У8А, тощо, хоча абсолютні значення напружень будуть значно відрізнятися. Але у деяких сталях, наприклад, Х12М, хоча зі зростанням густини потужності розтягуючі напруження значно знижуються, проте зміни їх знаку не відбувається. Тому у зміцненій зоні спостерігаються лише розтягуючі напруження. Така ж приблизно картина спостерігається і при лазерній обробці чавунів – при зміцненні без оплавлення виникають розтягуючі напруження, значення яких є вищими, ніж у випадку обробки поверхні в режимі оплавлення. У тому випадку, коли величина напружень перевищує границю міцності σ_B ,

відмічається формування тріщин (як одного із способів релаксації механічних напружень). Для того, щоб зняти поверхневі напруження використовується відпуск (температуру відпуску вибирають, звичайно, такою, що дорівнює приблизно 500 - 600 °С).

На сьогодні з метою більш ефективного зміцнення поверхонь використовують сполучення лазерної обробки з іншими явищами. Одним з резервів підвищення експлуатаційних характеристик може бути сполучення лазерної обробки з дією криоагента на матеріал, що оброблюється. Наприклад, якщо помістити оброблювану деталь в середовище рідкого азоту (або подавати рідкий азот в зону обробки), то після лазерного опромінення можна спостерігати швидке охолодження тієї ж сталі до температури, нижчої від точки початку мартенситного перетворення M_n . В результаті такої криогенної дії знижується вміст аустеніту в зоні лазерної дії. А це призводить до підвищення мікротвердості поверхні, що зміцнюється.

Як приклад, означеного вище можна розглянути таблицю 5.2.

Таблиця 5.2

Сталь	Вихідне гартування + відпуск, H_{μ} , МПа	Лазерне зміцнення H_{μ} , МПа	Лазерне зміцнення + рідкий азот H_{μ} , МПа
У12	7340	9760	10700
ХВГ	7340	9760	11190
Р6М5	8340	9340	10700

Іншим видом комбінованої обробки поверхні є сполучення в одному процесі лазерного зміцнення і локального пластичного деформування. У цьому випадку по оброблюваній поверхні одночасно переміщуються лазерний промінь та деформуючий поверхню ролик чи кулька. Таке “прикатування” поверхневого шару, що швидко охолоджується, знижує шорсткість поверхні та підвищує мікротвердість.

Ще одним прикладом комбінованої обробки може служити сполучення лазерної дії з наступним або одночасним ультразвуковим зміцненням. У цьому випадку ультразвуковий робочий інструмент, що коливається з частотою 18 – 20 КГц, розміщують на відстані l від осі лазерної дії. Він забезпечує мікропластичне деформування опроміненої поверхні. Сумісна дія високої температури, тиску та над швидкого охолодження призводить до утворення дисперсної структури з високою мікротвердістю. Наприклад, якщо після звичайного ультразвукового зміцнення $H_{\mu} = 4000 - 7500$ МПа, після лазерної обробки – $H_{\mu} = 7000 - 8000$ МПа, після лазерної обробки + наступної ультразвукової обробки $H_{\mu} = 8000 - 9500$ МПа, то сполучення усіх трьох методів у одному процесі дозволяє досягти значень $H_{\mu} = 12000 - 13000$ МПа при вихідному значенні $H_{\mu} \sim 2500$ МПа.

Останній із зазначених методів комбінованої обробки дозволяє знизити шорсткість поверхні. Так, при $l = 1,6$ мм і вихідній шорсткості $R_a = 0,63$ мкм, лазерне імпульсне зміцнення призводить до підвищення цього показника до $R_a = 2,5$ мкм. А послідовна лазерна та ультразвукова обробка дозволяє отримати поверхню з $R_a = 0,25$ мкм при глибині зміцнення $h = 0,25 - 0,30$ мм.

Самостійно:

1. Облaсті використання лазерного зміцнення.
2. Устaткування для лазерного зміцнення.