

ГІРНИЧІ МАШИНИ ТА ОБЛАДНАННЯ

УДК: 621.382.002(088.8)

ПЕРСПЕКТИВНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ГІРНИЧИХ МАШИН ЛАЗЕРНОЮ ОБРОБКОЮ

М. І. Сергієнко, інж., В. П. Котляров, докт. техн. наук (НТУУ “КПІ”)

Предлагаются новые методы поверхностной обработки деталей и узлов горных машин, которые должны иметь высокую усталостную прочность, коррозионную и кислотостойкость, износостойкость при работе в сложных производственных условиях. Используется лазерный луч для локального легирования поверхности изделия с быстрой диффузией (жидкость в жидкость) и формирования на поверхности детали аморфных пленок, крепко связанных с матрицей.

Особливі умови роботи гірничих машин – великі динамічні навантаження, агресивне та абразивне середовище – призводять до підвищеного руйнування їх деталей внаслідок знакозмінних навантажень та тертя. Традиційними засобами підвищення стійкості деталей і вузлів є використання високолегованих конструкційних матеріалів (сталі та чавуну), які піддають термічній обробці. При цьому найчастіше застосовують поверхневе загартування з нагрівом поверхневого шару виробу струмом високої частоти, лазерним опромінюванням та іншими методами. Такі види термообробки характеризуються високими швидкостями охолодження зміненого шару, що часто зумовлює виникнення в ньому залишкових напружень розтягу, які підвищують ризик руйнування поверхні деталі. Для формування у поверхневому шарі матеріалу потрібних властивостей застосовуються також методи хіміко-термічної обробки (цементація, азотування та ціанування). Для цих технологій характерні значні температури нагріву і великі швидкості охолодження, тому поверхні деталі властиві такі ж недоліки, що й при термічних операціях. Оскільки для формування зміненого шару достатньої товщини потрібна тривала витримка виробу при високій температурі, то це призводить до суттєвого збільшення розмірів елементів структури (зерна), тобто до зниження споживчих властивостей виробу.

Альтернативною технологією є використання можливостей лазерного локального нагріву поверхні для зміцнення приповерхневого шару матеріалу і пластичного деформування поверхні виробу з метою формування напруженого стану з необхідними властивостями [1]. Однак не всі (за формою) поверхні можуть бути оброблені за схемою комбінованої технології, оскільки ця схема не виключає необхідності використання високолегованих матеріалів, які характеризуються не тільки високою вартістю, а й складністю механічної обробки. Крім цього, невеликий (за масою) знос поверхонь виробу внаслідок

тертя вимагає його заміни або ремонту. Хоча при ремонті дещо знижуються затрати на матеріал, однак технологія збільшення розмірів зношеного виробу, наприклад наплавленням, потребує суттєвої кількості енергії. Це може викликати деформацію виробу, для усунення якої не вистачить допуску на відповідних поверхнях.

Для розв'язання цієї проблеми можуть бути застосовані технології модифікації або аморфізації робочих поверхонь виробу. Обидві технології дають можливість створення міцно зв'язаної з основною частиною виробу твердої поверхні, в'язкість якої визначається складом деталі.

Легування (модифікація) поверхні виробу є відомою технологією з використанням локального нагріву приповерхневого шару матеріалу лазерним опромінюванням. Відомі такі технологічні схеми лазерного легування [2]:

1) модифікатор у вигляді газу подається в тверду матрицю (опромінення поверхні виробу до температури, нижчої від потрібної для її оплавлення у контрольованій газовій атмосфері);

2) модифікатор у вигляді газу подається в рідку матрицю (опромінення поверхні виробу до температури, вищої від потрібної для її оплавлення у контрольованій газовій атмосфері);

3) твердий модифікатор подається в рідку матрицю (опромінення поверхні виробу, на яку нанесено обмазку з модифікатора, до температури, вищої від потрібної для плавлення матеріалу матриці).

Достатню швидкість дифузії забезпечує друга схема, однак вона складна у реалізації внаслідок необхідності опромінювання виробу у контрольованій атмосфері, яка складається з пари матеріалу, що використовується як модифікатор. У зв'язку з тим, що звичайно поверхню модифікують тугоплавкими елементами (вольфрам, ванадій, хром та ін.) або сполуками (нітриди, карбіди та ін.) з температурою випаровування, набагато вищою від температури конструкційних матеріалів, реалізація такої схеми легування є складною технологічною задачею. Хоча остання схема технологічно проста, ефект легування буде незначним внаслідок неможливості рівномірного насичення поверхневого шару легуючим елементом у твердому стані за умови великої різниці у теплофізичних властивостях модифікатора та матриці.

Автори пропонують метод поверхневої зміцнюючої обробки виробів шляхом модифікації їх поверхневого шару тугоплавкими добавками та нагріву внаслідок лазерного опромінювання. Цей метод може використовуватися в технології виробництва та відновлення деталей гірничих машин, які зносилися під час експлуатації, а також для формування поверхневих шарів із заданими властивостями (корозійна стійкість, твердість, кислотостійкість та шорсткість). Головною перевагою пропонованого методу над традиційними є підвищення однорідності легування поверхневого шару з одночасним збільшенням глибини легування за рахунок використання схеми взаємодифузії "рідина в рідину". У розплавлений поверхневий шар матеріалу виробу вводиться матеріал-модифікатор у рідкому стані, що гарантує високу швидкість їх перемішування та взаємопроникнення. На перший погляд реалізація цієї схеми не менш

складна, ніж описаних вище, до того ж при схемі 2 швидкість дифузії більша. Однак запропонована технологічна схема (рис. 1) дозволяє отримати кількісну і якісну вигоди.

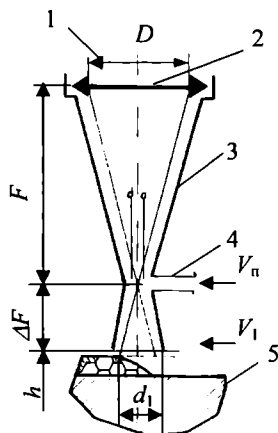


Рис. 1. Схема методу легування поверхні виробу: 1 – лазерний промінь; 2 – лінза, що концентрує лазерну енергію в певну ділянку поверхні виробу; 3 – насадка у вигляді конуса, який охоплює каустику сфокусованого лінзою пучка випромінювання; 4 – патрубок для подачі у зону обробки суміші технологічного (транспортуючого) газу та модифікатора у вигляді порошку; 5 – оброблюваний виріб; V_1 – швидкість руху деталі; V_n – швидкість подачі газу з модифікатором у зону обробки; h – глибина опромінювання; D – діаметр пучка випромінювання; F – фокусна відстань лінзи

Для реалізації цієї технологічної схеми необхідно визначити умови опромінювання виробу з урахуванням теплофізичних властивостей його матеріалу, поглинальної здатності поверхні та потрібних глибини шару із зміненими властивостями і концентрації легуючої добавки.

При досягненні на поверхні виробу критичного, за умови її оплавлення, рівня щільності потужності теплового потоку $W_{\text{рпл}}^{\text{MT}} = A_{\text{MT}} \cdot I_{\text{р}\Delta F}$, а у горловині каустики пучка випромінювання критичного, за умови оплавлення порошин модифікатора, рівня щільності потужності теплового потоку $W_{\text{рпл}}^{\text{MT}} = A_{\text{м}} \cdot I_{\text{р}0}$, визначають положення поверхні виробу у каустиці пучка випромінювання ΔF для вибраних із розв'язку теплової задачі оплавлення поверхні виробу на глибину h параметрів опромінювання за формулою

$$\Delta F = \frac{F \cdot d_0}{D} \left[\left(\frac{W_{\text{рпл}}^{\text{м}}}{W_{\text{рпл}}^{\text{MT}}} \right)^{1/2} - 1 \right], \quad (1)$$

де A_{MT} і $A_{\text{м}}$ – коефіцієнти поглинання поверхні виробу і порошин модифікатора; $I_{\text{р}0}$ і $I_{\text{р}\Delta F}$ – інтенсивність пучка випромінювання в горловині каустики і на

поверхні виробу, Вт/см²; d_0 – розмір пучка випромінювання у горловині каустики.

Потім визначають об'ємну концентрацію порошин у струмені технологічного газу k , %:

$$k < \left(1 - \frac{L_{\text{плмт}} \cdot \rho \cdot h}{L_{\text{плм}} \cdot m} \right)^{-1} \cdot 100, \quad (2)$$

де $L_{\text{плмт}}$ і $L_{\text{плм}}$ – питома теплота плавлення матеріалу матриці і модифікатора, Дж/см³; ρ – густина модифікатора; m – поверхнева концентрація модифікатора, г/см².

Далі розраховують швидкість транспортування порошин модифікатора V_n , см/с:

$$V_n = 400 \frac{d_1 \cdot V_1 \cdot m}{\pi \cdot d_0^2 \cdot \rho \cdot K}, \quad (3)$$

де d_1 – розмір пучка випромінювання на поверхні виробу; V_1 – швидкість руху виробу відносно пучка випромінювання.

Розмір порошин (см) визначається згідно з нерівністю

$$d_n < 3,3 \frac{F}{D} \left(\frac{a \cdot \lambda}{V_n} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

де a – коефіцієнт температуропроводності, см²/с; λ – довжина хвилі випромінювання, см.

Вирази (1)–(4) виведені з таких міркувань. Для забезпечення дифузії “рідина в рідину” необхідний контакт матеріалу модифікатора та виробу у розплавленому стані. Однак внаслідок суттєвої різниці в їх теплофізичних властивостях не можна використовувати обмазки, які заздалегідь наносять на поверхню обробки, оскільки $W_{\text{рм}}^{\text{пн}} \gg W_{\text{рмм}}^{\text{пн}}$ і під час оплавлення модифікатора матеріал виробу може випаровуватися із суттєвим переносом мас матеріалів. Щоб запобігти цьому, необхідно розплавити матеріали до їх контакту. Для цього можна використати мінливість перетину каустики сфокусованого пучка випромінювання, внаслідок чого змінною є також інтенсивність випромінювання вздовж осі пучка. Вибираючи різні місця розташування поверхні виробу та модифікатора (вираз 1), можна виконати цю умову. Розмір порошин модифікатора (4) повинен бути таким, щоб вони встигали розплавлятися на шляху до поверхні виробу, тобто на відстані ΔF . Концентрація порошин у технологічному струмені газу k і швидкість його подачі у зону обробки V_n визначаються режимами опромінення та заданими властивостями легового шару за формулами (2) і (3).

Наведемо приклад визначення режимів легування виробу з сталі 45 кобальтом ($a = 0,13$ см²/с). Площа поверхні виробу 15×90 мм, глибина зони легування – 1,0 мм з поверхневою концентрацією модифікатора $m = 50$ мг/см². Розрахунок режимів опромінювання за методикою [1] показав такі результати: $d_1 = 0,3$ см, $V_1 = 200$ см/хв для потужності випромінювання 2,5 кВт ($D = 40$ мм, $\lambda = 10,6$ мкм). За формулою (1) визначимо положення заготовки у каустиці

сфокусованого пучка випромінювання: $\Delta F = 13$ мм при розмірі $d_0 = 0,4$ мм. Об'ємна концентрація модифікатора $k = 6,8$ % згідно з (2), швидкість його подачі $V_n = 5$ см/с згідно з (3), розмір порошин $d_n = 1,5$ мкм згідно з (4); тоді витрата модифікатора $Q = 51$ мг/с.

Експериментальна перевірка операції на вибраних режимах показала такі результати: ширина модифікованого шару 3,8 мм, глибина – 0,9 мм. Структура – дрібнодисперсний мартенсит з високим ступенем однорідності розподілу кобальту та інтерметалідів.

Аморфізація поверхні виробу, тобто формування шару матеріалу з аморфною структурою, є відомим і ефективним засобом надання виробу високих експлуатаційних якостей (корозіє- та кислотостійкості, поверхневої твердості і низької шорсткості). Щоб перевести матеріал з кристалічної структурию в аморфний стан, його необхідно розплавити і охолодити з швидкістю, що суттєво перевищує швидкість кристалізації (для конструкційних матеріалів вона досягає 10^6 К/с). Практична реалізація процедури аморфізації поверхневого шару виробу ускладнюється дією спадковості кристалічної структури. Тому вироби із аморфною структурою найчастіше мають вигляд плівок, що пов'язано з технологією їх виробництва. Найпростішим є використання матеріалів, схильних до аморфізації (з швидкістю кристалізації $\leq 10^3$ К/с), які наносять у вигляді плівок на робочі поверхні виробу. Така технологія має ряд недоліків, головним з яких є слабкий механічний зв'язок аморфної плівки з матрицею. Можливе також використання лазерної технології для створення аморфного шару [2], однак наведені схеми її реалізації не знайшли широкого застосування на виробництві.

Автори пропонують іншу методику використання лазерного опромінення для формування аморфного шару на поверхні виробу [4]. Згідно з цим методом аморфний шар створюється напиленням матеріалу, схильного до аморфізації, із заготовки у вигляді фольги, яку розташовують над виробом паралельно оброблюваній поверхні (рис. 2).

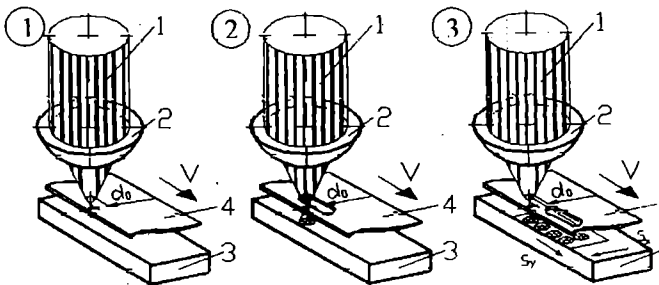


Рис. 2. Схема опромінення поверхні виробу з нанесенням аморфної плівки: 1 – лазерний промінь; 2 – фокусуюча лінза; 3 – виріб; 4 – фольга з матеріалу, схильного до аморфізації

Поверхню виробу 3 опромінують лазерним променем l у режимі вільної генерації через фольгу 4, яку під час обробки переміщують поперек пучка паралельно поверхні виробу. Режим опромінювання (розмір пучка на поверхні фольги d_0 , інтенсивність на ній I_0 і швидкість переміщення V) вибирають таким, щоб фольга товщиною δ у зоні опромінювання руйнувалася з механізмом "плавлення–випаровування". Низька критична швидкість охолодження матеріалу фольги (до 10^5 К/с), за якої в ньому створюється некристалічна структура, забезпечує стійке формування аморфного шару за умови лазерного плавлення та охолодження розплаву холодним матеріалом виробу. Цьому сприяє і швидке транспортування розплаву до поверхні виробу вибуховою хвилею, утвореною випаровуванням частини матеріалу фольги у зоні опромінювання. Висока якість аморфного шару, яка виражається у відсутності дендритного прошарку у зоні контакту з поверхнею виробу, забезпечується відсутністю кристалічного контакту між шаром та матрицею у процесі нагріву. Змінюючи товщину фольги і відстань між нею та поверхнею виробу, можна забезпечити оптимальну температуру розплаву у момент його контакту з поверхнею виробу і досягти найвищої швидкості охолодження. Крім того, ступінь аморфізації суттєво підвищується внаслідок того, що поверхня виробу майже не нагрівається лазерним променем. Це збільшує градієнт температури у зоні контакту розплаву з матрицею, що прискорює його охолодження. Використання імпульсів вільної генерації дозволяє залучати до операції значну енергію випромінювання, тобто формувати аморфні шари достатньої товщини. Переміщення фольги має виконуватися з швидкістю V , яка не дозволяє руйнувати фольгу випромінюванням з інтенсивністю, що не перевищує I_0 (див. рис. 2, поз. 1–3 та рис. 3, зони 1–3).

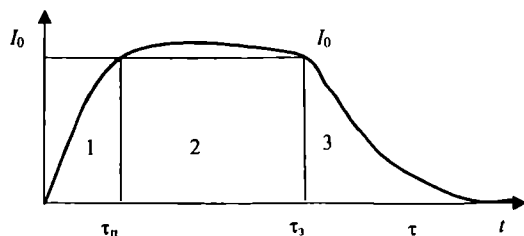


Рис 3. Часова характеристика імпульсу випромінювання у режимі вільної генерації

На практиці ця технологія використовувалася для покриття аморфним шаром прецизійних деталей гідроприводу. Як матеріал, що легко аморфізується, використовувався евтектичний сплав $Fe_{83}V_{17}$ ($V_{кр} < 5 \cdot 10^5$ К/с). Твердість сплаву після термічної обробки, тобто з кристалічною структурою, дорівнює 14500 МПа, в аморфному стані — 17000 МПа. Для обробки використано лазер з такими параметрами випромінювання: тривалість імпульсу $\tau = 1-2$ мс; імпульсна енергія $E = 37$ Дж; розмір пучка на поверхні фольги $d_0 = 2$ мм. За залежністю

$$d_0 \sqrt{\left(\frac{T_{пл} - T_0}{V_{кр}}\right) \ln\left(\frac{T_{пл} - T_0}{T_m - T_0}\right)} < V < \frac{E}{L_{пл} \cdot d_0 \delta \cdot (\tau - \tau_3)} \quad (5)$$

визначають товщину фольги δ , швидкість її переміщення V та тривалість задньої ділянки імпульсу τ . У нерівності прийняті такі позначення: $T_{пл}$, T_0 , T_m – відповідно температура плавлення, початкова та сталої структури матеріалу фольги; $L_{пл}$ – питома енергія плавлення матеріалу фольги; $V_{кр}$ – критична за кристалізацією швидкість охолодження матеріалу фольги. Відстань між фольгою і виробом визначалася експериментально і дорівнювала $h = 300\text{--}400$ мкм.

В експериментах для формування аморфного шару товщиною 30 мкм використовували фольгу товщиною 50 мкм, яка руйнувалася на відстані 8 мм, коли рухалася із швидкістю 10 м/с. Ця швидкість давала можливість перекривати пучок випромінювання за 20 мкс. Час обробки дорівнював 6 с за робочою площею головки 2×6 мм. Між імпульсами виріб зміщувався на відстань 1,2 мм для покриття усієї її площі. Використовуючи пропозиції праці [5], можна одним імпульсом випромінювання з достатньою енергією покрити аморфною плівкою поверхні виробу без його переміщення.

Для цього на нижню поверхню оптичного клина (рис. 4) заздалегідь наносять шар матеріалу 3, схильного до аморфізації, і розміщують його паралельно поверхні виробу 4.



Рис. 4. Прилад для нанесення аморфної плівки на поверхню виробу із збільшеною довжиною поверхні: 1 – лазерний промінь; 2 – оптичний клин; 3 – плівка з матеріалу, схильного до аморфізації; 4 – виріб; 5 – шар нанесеного аморфного матеріалу

Оптичний клин виготовлено з матеріалу, прозорого для випромінювання, який має показник заломлення n' . Лазерний промінь l направляється нормально на бокову сторону клина з нахилом ϵ , величина якого вибирається за залежністю

$$\epsilon = \arctg \frac{n'}{n}, \quad (6)$$

де n – показник заломлення повітря, $n \approx 1$.

За цієї умови кут між віссю променя та нормаллю до нижньої поверхні клина 2 також дорівнюватиме ϵ . Під дією енергії пучка випромінювання l за умови достатньої інтенсивності та енергії імпульсу матеріал шару 3 випаровується і переноситься у вигляді пари та розплаву в напрямку виробу 4. При стиканні з холодною поверхнею виробу матеріал охолоджується з

швидкістю, що перевищує V_k , завдяки чому формується міцно зчеплений з поверхнею виробу шар з аморфною структурою. Залишки енергії променя відбиваються від нижньої поверхні клина, оскільки за відсутності покриття Z відновлюється контакт матеріалу клина з повітрям і при куті між віссю пучка I та нормаллю до поверхні, рівному чи більшому за ϵ , спрацьовує ефект повного внутрішнього відбиття. Верхньою поверхнею клина промінь повертається до нижньої його сторони, де руйнує і переносить у сторону виробу чергову ділянку покриття Z і т.д.

Величину кута φ вибирають з рівняння

$$k \cos[\epsilon + 2(k-1)\varphi] - (k-1)\cos[\epsilon + 2k\varphi] = \frac{1}{2} \sin 4\varphi, \quad (7)$$

де k – порядковий номер відбиття променя від верхньої поверхні клина 2.

У наведеному вище прикладі експериментального випробування аморфізації поверхні виробу було використано той же матеріал, який у вигляді плівки товщиною 50 мкм було нанесено на нижню поверхню скляного клина. Його розміри: найменша товщина 2 мм, кут $\varphi = 1^\circ$, кут $\epsilon = 30^\circ$, довжина 8 мм. Використовувалася технологічна лазерна установка “Квант-18” з таким режимом роботи: розмір пучка випромінювання на боковій грані клина 2 мм, фокусна відстань лінзи 400 мм, тривалість імпульсу 2 мс, імпульсна енергія 60 Дж. За один імпульс, тобто за 2 мс, виконано покриття поверхні деталі товщиною 0,02 мм.

Враховуючи можливості наведених вище методів обробки і розроблені технологічні прийоми та оснащення для їх реалізації, можна зробити висновок про їх перспективність та прийнятність для підвищення експлуатаційних властивостей деталей та вузлів гірничих машин.

1. *Котляров В. П.* Поверхностная отделочно-упрочняющая обработка с лазерным облучением. – Электронная обработка материалов. – 1989. – № 6. – С. 16–20.

2. *Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н.* Методы поверхностной лазерной обработки. – М: Высшая школа, 1987. – 191 с.

3. *А.с. № 1314714 СССР*, МПК С23С 14/00. Способ легирования поверхности металлической детали / В. П. Котляров, Н. И. Сергиенко, В. С. Коваленко и др. – Оубл. 1.02.1987.

4. *А.с. № 1520889 СССР*, МПК С23С 14/28. Способ нанесения аморфных покрытий на поверхность металлических изделий / В. П. Котляров, В. С. Коваленко, Л. Ф. Головкин и др. – Оубл. 8.07.1989.

5. *А.с. № 1452195 СССР*, МПК С23С 14/28. Устройство для нанесения аморфных слоев на поверхность металлических подложек / В. П. Котляров, В. С. Коваленко. – Оубл. 15.09.1988.