УДК 621.9.047

ЛАЗЕРНЕ ЗМІЦНЕННЯ ПОРОДОРУЙНУЮЧОГО ІНСТРУМЕНТА ГІРНИЧИХ МАШИН

М. І. Сергієнко, інж. (НТУУ "КПІ")

Предложен способ поверхностной обработки породоразрушающего инструмента горных машин с применением лазерной упрочняющей технологии. Рассмотрена эффективность упрочнения инструмента с помощью лазеров непрерывного и импульсного действия. Установлены режимы и технологические схемы обработки для получения максимальной микротвердости и глубины упрочненного слоя.

Ключевые слова: горные машины, породоразрушающий инструмент, износостойкость, лазеры, технологические схемы обработки, эффективность.

Запропоновано спосіб поверхневої обробки породоруйнуючого інструмента гірничих машин із застосуванням лазерної зміцнюючої технології. Розглянуто ефективність зміцнення інструмента за допомогою лазерів безперервної та імпульсної дії. Встановлено режими і технологічні схеми обробки для отримання максимальної мікротвердості та глибини зміцненого шару.

Ключові слова: гірничі машини, породоруйнуючий інструмент, зносостійкість, лазери, технологічні схеми обробки, ефективність.

Surface treatment method of the rock cutting tool of mining machines using laser hardening technology is suggested. Efficiency of tool hardening by means of continuous wave and impulse laser is considered. Treatment modes and process flow schemes to achieve maximal microhardness and depth of the hardened layer are set.

Keywords: mining machines, rock cutting tools, wear, lasers, treatment modes, efficiency.

Вступ. Зносостійкість породоруйнуючих інструментів, які використовуються в гірничій промисловості, є одним із факторів, що обмежують продуктивність добувного устаткування, яке виконує руйнування високоабразивних і міцних гірських порід у складних гірничо-геологічних умовах. Основною причиною виходу з ладу гостродефіцитного породоруйнуючого інструмента гірничих машин при розробці корисних копалин та руйнуванні гірських порід є абразивний знос державок, виготовлених із сталей, що призводить до випадання твердосплавної ріжучої вставки. Тому підвищення якості породоруйнуючого інструмента для гірничодобувної промисловості є надзвичайно актуальною проблемою.

Мета роботи – зміцнення породоруйнуючого інструмента гірничих машин за допомогою лазерного випромінювання.

Аналіз стану проблеми. Одним із сучасних і дуже перспективних напрямків зміцнення деталей і робочих інструментів гірничих машин є їх поверхнева обробка лазерним випромінюванням. Лазерний промінь відрізняється надзвичайно високою монохроматичністю і спрямованістю і за допомогою звичайних оптичних систем його можна сфокусувати на поверхні обробки у пляму розміром в частки міліметра, забезпечуючи при цьому високі густини потоку випромінювання. Сучасні безперервні лазери забезпечують

інтенсивність сфокусованого випромінювання на рівні 10^{10} Вт/см^2, а в імпульсних системах, які застосовуються, наприклад для досліджень в області лазерного термоядерного синтезу, ця величина досягає 10^{16}–10^{17} Вт/см^2. Для порівняння можна вказати, що середня інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні Землі становить близько 0,1 Вт/см^2 і при фокусуванні її можна збільшити до 10 Вт/см^2.

Виклад основного матеріалу досліджень. В НТУУ КПІ виконано дослідження з підвищення зносостійкості породоруйнуючого інструмента шляхом лазерного зміцнення швидкозношуваної стальної державки.

Дослідження змін, що відбуваються в поверхневому шарі сталі 35ХГСА під дією лазерного випромінювання, виконувалося на спеціальних зразках, виготовлених із державок різців. Зразки піддавалися як імпульсному так і безперервному опроміненню. Визначалися умови, при яких у сталі утворюється зміцнений шар із максимальною міцністю і глибиною при збереженні чи незначному порушенні вихідної шорсткості поверхні.

Встановлено, що при дії лазерного випромінювання в поверхневому шарі сталі 35ХГСА утворюється зона термічного впливу, розміри і структура якої визначаються енергетичними характеристиками випромінювання та вихідним станом оброблюваного матеріалу. Зона термічного впливу має однорідну структуру гартування, оскільки складається з дрібнодисперсного маловуглецевого мартенситу і рівномірно розподілених карбідів. Така структура є характерною для подібних ферито-перлитних сталей, однак в зоні термічного впливу вона має деякі особливості – надзвичайно високу мікротвердість $H_ц$ = 720 кгс/мм^2 (рис. 1), високу дисперсність структурних складових, невеликі розміри і рівномірний розподіл карбідів.

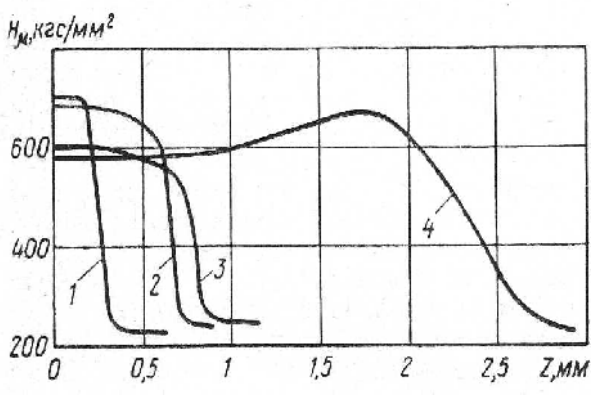


Рис. 1. Розподіл мікротвердості $H_ц$ по глибині зони термічного впливу Z у сталі 35ХГСА при різних режимах обробки: *1* – імпульсне випромінювання, енергія WE = 5 Дж/мм^2, τ = 7 мс; *2* – безперервне випромінювання, потужність W = 0,9 кВт, діаметр пучка $D_п$ = 5 мм, швидкість переміщення деталі V = 0,8 м/хв; *3* – безперервне випромінювання, W = 0,9 кВт, $D_п$ = 3 мм, V = 0,6 м/хв; *4* – безперервне випромінювання, W = 0,9 кВт, $D_п$ = 3 мм, V = 0,2 м/хв

Збільшення густини енергії лазерного випромінювання, що діє на матеріал, до значення, що перевищує визначене вище критичне значення, викликає підвищення температури в зоні до рівнів, більших за температуру плавлення. У цих умовах у сталі утворюється зона термічного впливу. Мікроструктурні дослідження сталі 35ХГСА, обробленої безперервним лазерним випромінюван-

ням, показали, що характер фазових і структурних перетворень у зоні нагріву приблизно такий, як при дії імпульсного випромінювання. Глибина зони термічного впливу визначається густиною енергії і часом впливу випромінювання. Оскільки час випромінювання при імпульсній обробці відповідає тривалості лазерного імпульсу, яка залежить від технічних можливостей лазерного обладнання, то глибина зони нагріву в цьому випадку переважно регламентується густиною енергії. В умовах експерименту глибина ущільненого шару Z при використанні режимів, що не викликають порушень вихідної шорсткості поверхні, становила 140 мкм, при наявності оплавлення – 500 мкм.

Ефективність процесу обробки інструмента підвищується, якщо у розплавлений лазерним випромінюванням поверхневий шар матеріалу ввести матеріал-модифікатор, який гарантує високу швидкість їх перемішування та взаємопроникнення завдяки взаємодифузії. Технологічну схему процесу обробки з введенням у зону обробки модифікатора наведено на рис. 2.

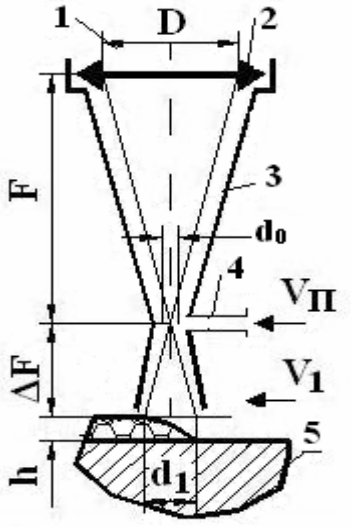


Рис. 2. Схема методу легування поверхні виробу: *1* – лазерний промінь; *2* – фокусуюча лінза; *3* – насадка у вигляді конуса, який охоплює каустику сфокусованого лінзою пучка випромінювання; *4* – патрубок для подачі у зону обробки суміші технологічного газу та модифікатора у вигляді порошку; *5* – оброблюваний матеріал; V_1 – швидкість руху деталі; $V_п$ – швидкість подачі газу з модифікатором у зону обробки

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

Після досягнення на поверхні виробу критичного, за умови її оплавлення, рівня потужності теплового потоку $W_{\text{рпл}}^{\text{мт}} = A_{\text{мт}} \cdot I_{p\Delta F}$, а в горловині каустики пучка випромінювання критичного, за умови оплавлення порошин модифікатора, рівня потужності теплового потоку $W_{\text{рпл}}^{\text{м}} = A_{\text{м}} \cdot I_{p_0}$ (де $A_{\text{мт}}$ *і* $A_{\text{м}}$ – коефіцієнти поглинання відповідно поверхні виробу і порошин модифікатора; I_{p_0} *і* $I_{p\Delta F}$ – інтенсивність у пучку випромінювання в горловині каустики і на поверхні виробу, Вт/см^2) визначають положення поверхні виробу у каустиці пучка випромінювання ΔF за формулою

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

де d_0 – розмір пучка випромінювання у горловині каустики; D – діаметр пучка випромінювання *1* на поверхні фокусуючої лінзи *2*; F – фокусна відстань лінзи). Потім визначають об'ємну концентрацію k порошку у струмені технологічного газу (%) за формулою

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

де $L_{\text{плмт}}$ і $L_{\text{плм}}$ – питома теплота плавлення матеріалу матриці і модифікатора (Дж/см^3); ρ – густина матеріалу; m – поверхнева концентрація модифікатора (г/см^2).

Швидкість транспортування порошку модифікатора $V_{\text{п}}$ (см/с) розраховують за виразом

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

де d_1 – діаметр пучка випромінювання на поверхні виробу, мм; V_1 – швидкість виробу відносно пучка випромінювання, м/хв,
а також визначають розмір порошин $d_{\text{п}}$:

$$d_{\text{п}} < 3{,}3 \frac{F}{D}\left(\frac{a \cdot \lambda}{V_n}\right)^{1\backslash 2}, \qquad (4)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності (см^2/с); λ – довжина хвилі випромінювання (см).

Розмір порошин модифікатора $d_{\text{п}}$ повинен забезпечувати можливість їх розплавлення на шляху до поверхні виробу, тобто не повинен перевищувати відстань ΔF. Концентрація k порошин у технологічному струмені газу та швидкість його подачі у зону обробки $V_{\text{п}}$ визначаються режимами опромінення та заданими властивостями шару матеріалу обробки.

Застосування безперервного випромінювання з легуванням модифікаторами дозволило отримати значно більші міцність і глибину ущільнення – до 2…3 мм, що свідчить про залежність цього параметру від швидкості обробки при різноманітних густинах потужності випромінювання і модифікатора (рис. 3).

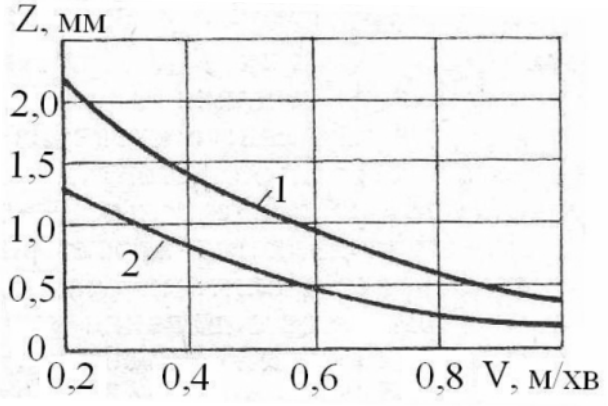
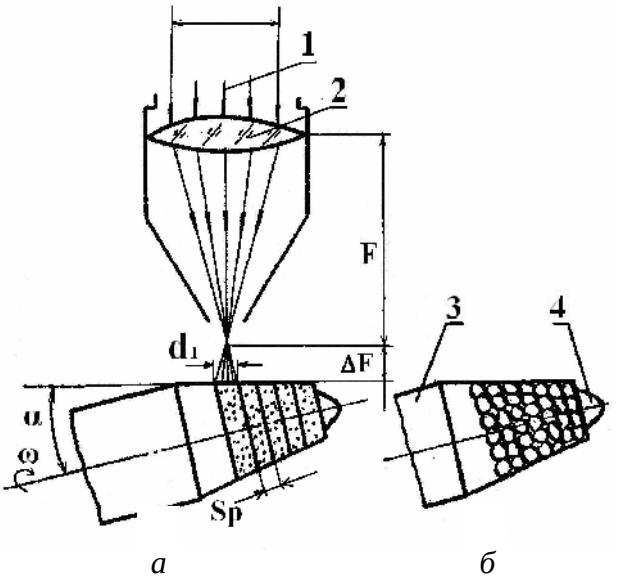


Рис. 3. Залежність глибини зміцненого шару Z в сталі 35ХГСА від швидкості обробки V при різній щільності потужності випромінювання CO^2-лазера: *1* – W = 0,9 кВт, D_n = 3 мм; *2* – W = 0,9 кВт, D_n = 5 мм

Крива *1* на графіку відповідає режиму, при якому спостерігалося інтенсивне оплавлення поверхні, крива *2* – умовам, при яких матеріал зразку нагрівався до температур структурно-фазових перетворень.

Результати досліджень були використані при лазерному зміцненні робочих поверхонь державок породоруйнуючих різців РКС-1 та інших інструментів. Обробка здійснювалася імпульсним і безперервним випромінюванням (рис. 4).



а *б*

Рис. 4. Схеми лазерного зміцнення робочої поверхні державки різця РКС-1 безперервним (*а*) та імпульсним (*б*) випромінюванням: *1* – лазерний випромінювач; *2* – фокусуюча лінза; *3* – державка різця; *4* – твердосплавна вставка

При вибраних режимах лазерного випромінювача *1* обробка породоруйнуючого інструмента під лазерним променем, сфокусованим лінзою *2* в пляму діаметром d_1, на відстані ΔF здійснювалась з кутовою швидкістю ω, кутом обробки α та кроком переміщення $S_р$ ($S = K_п d_1$, де $K_п$ – коефіцієнт перекриття, $K_п$ = 0,7–0,95).

Встановлено, що обробка імпульсним випромінюванням навіть при максимально допустимій частоті імпульсів (f = 1 Гц) – процес малопродуктивний (час обробки одного різця t >5 хв) і характеризується малою глибиною зміцненого шару. Доцільнішим є використання безперервного лазерного випромінювання.

Зміцнення породоруйнуючого інструмента забезпечує збільшення ресурсу роботи гірничої машини і підвищення її продуктивності $Q_р$:

$$Q_р = Q_т B,$$

де $Q_т$ – продуктивність машини, т/хв; B – коефіцієнт підвищення продуктивності машини за рахунок зміцнення її деталей, відносні одиниці.

Коефіцієнт підвищення продуктивності B за одиничний інтервал часу розраховується за формулою

$$B = T(T_0 + П)/ T_0 (T + П),$$

де T – час напрацювання на відмову машини зі зміцненою деталлю; T_0 – час на відмову машини с зміцненою деталлю; П – час простоїв машини.

Різці, зміцнені лазерним випромінюванням, загартовані струмами високої частоти (СВЧ) і незміцнені випробовувалися на очисних та прохідницьких комбайнах у виробничих умовах гірничих підприємств. Інтенсивність зносу різців оцінювалася за зменшенням їх маси. У 80 % незміцнених різців повний знос наступив уже після однієї зміни роботи; у 70–90 % різців, загартованих СВЧ – після двох змін; різці, зміцнені лазерним випромінюванням, пропрацювали 4–5 змін. При цьому середній змінний видобуток вугілля становив 230 т. Таким чином, зносостійкість різців, зміцнених лазерним випромінюванням, підвищилась у 2–3 рази. Збільшилася продуктивність комбайна за рахунок більш надійної і тривалої роботи ріжучого інструмента, економії часу на його заміну.

Висновки

Пропонується метод поверхневої зміцнюючої обробки гірничого інструмента шляхом лазерного опромінювання та модифікації поверхневого шару тугоплавкими добавками. Цей метод може використовуватися у виробництві та відновленні швидкозношуваних деталей гірничих машин, а також для формування поверхневих шарів із заданими властивостями (корозійна стійкість, твердість).

Головною особливістю запропонованого методу є підвищення однорідності легування поверхневого шару з одночасним збільшенням глибини легування. Технологія лазерного зміцнення породоруйнуючих різців легко реалізується, не включає складних технологічних операцій, процес може бути повністю автоматизованим. Особливістю розробленого технологічного процесу є те, що при опроміненні використовуються режими, що забезпечують отримання зміцненого шару максимальної глибини.

Дозуючи теплові навантаження шляхом регулювання потужності і тривалості лазерного опромінення, можна забезпечити практично будь-який температурний режим обробки і зміцнення поверхневого шару деталі. Лазерні методи забезпечують можливість дистанційної обробки, обробки важкодоступних ділянок складних деталей, лазерний промінь не забруднює оброблюваної поверхні. Крім того, метод лазерного опромінення має ту перевагу, що при його використанні непотрібний потужний біологічний захист для обслуговуючого персоналу.

Ця технологія може бути рекомендована для широкого впровадження в гірничу промисловість.

1. *Сергієнко М. І.* Перспективні методи підвищення роботоздатності деталей гірничих машин лазерною обробкою / М. І. Сергієнко, В.П. Котляров // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія “Гірництво”. – Зб. наук. праць. – 2003. – Вип. 8. – С. 108–115

2. *Котляров В. П.* Влияние поверхностного покрытия на эффективность упрочнения деталей гидропривода горных машин / В. П. Котляров, Л. Ф. Головко, Н. И. Сергиенко / Разработка рудных месторождений. – 2001. – № 2. – С. 21–22.

3. *А. С. СССР* 1314714, МПК С 23 С 14/00. Способ легирования поверхности металлической детали / В. П. Котляров, Н. И. Сергиенко, В. С. Коваленко и др. – Опубл. 1.02.1987.

4. *Котляров В. П.* Нестабільність розмірів шару лазерного зміцнення деталей гірничих машин / В. П. Котляров, М. І. Сергієнко, О. В. Богданова // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія “Гірництво”. – Зб. наук. праць. – 2000. – Вип. 2. – С. 81–86.

Надійшла до редакції 11.09.2012 р.
Рекомендовано до друку докт. техн. наук Л. Ф. Головком