

УДК 621.791.92:669.018.25

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-286-293

М.М. Прокопів, О.В. Харченко, кандидати технічних наук, **Ю.П. Ущановський**

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2,
04074 м. Київ, e-mail: yuriush@ism.kiev.ua*

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГІРНИЧОДОБУВНОЇ ТЕХНІКИ

У статті запропоновано твердосплавне армування сталевих поверхонь зубів ковшів екскаваторів шаруватими штирями з підвищеними фізико-механічними характеристиками. Оптимізовано конструкцію армуючих елементів, встановлено оптимальні параметри зварювання та склад твердосплавних штирів.

Для виготовлення твердосплавних елементів застосовувалися серійні і регеновані суміші із вмістом зв'язки від 12 до 20%. Спінання вставок проводилося в прохідній, вакуумній печі. Встановлено, що шляхом збільшення значення сили струму і тривалості імпульсу можна забезпечити кріплення твердосплавних вставок на сталевих поверхнях, але при цьому визначальним параметром буде міцність зварного шва, яка залежить від матеріалу зносостійкої вставки та параметрів приварювання.

Встановлені оптимальні параметри приварювання армуючих вставок: тривалість імпульсу – $T=0,04$ с, струм – $I = 850$ А. Але при вмісті зв'язки понад 15% вартість робіт з наплавлення не є ефективною через значне зменшення зносостійкості та збільшення вартості. В результаті проведених лабораторних досліджень та виробничих випробувань встановлено, що зносостійкість армованих твердосплавними елементами із $WC-TiC-Co-Ni-Al-Fe$ сплаву зубів ковшів екскаваторів підвищена в 1,7–1,9 у порівнянні з серійними інструментами та є економічно вигідним внаслідок здешевлення складових сплавів.

Для подальшого підвищення експлуатаційних властивостей армуючих твердосплавних елементів та розширення їх області застосування необхідно підвищити ударно-абразивну зносостійкість сплавів на багатокарбідній основі із вмістом багатоконпонентних зв'язок 8–10%.

Ключові слова: *зварне армування, твердий сплав, полікарбідна основа, багатоконпонентна зв'язка, наплавлення, зуби ковшів, долота чизелів глибокорозпушувачів, зносостійкість.*

Вступ

Підвищення зносостійкості сталевих робочих органів виконується шляхом застосування легованих сталей з різними ефективними способами механічної та термічної обробки [1–4]. Значно збільшити зносостійкість можливо тільки шляхом закріплення на поверхнях вставок, пластин різних форм з нових надтвердих матеріалів, які повинні збільшувати термін експлуатації поверхні, що контактує з породою Загалом, покриття має забезпечувати збільшення зносостійкості за наявності додаткових технологічних витрат з нанесення покриття та вартості матеріалів, при збереженні конкурентної ринкової ціни.

Відомі тверді сплави при їх приварюванні до сталі з використанням традиційних методів схильні до утворення гарячих тріщин у зоні термічного впливу. При цьому різниця в коефіцієнтах термічного розширення твердих сплавів і сталі призводить до розшарування і відриву шару, що наплавляється в складних умовах експлуатації.

Крім того, в зоні шва відбувається зміна складу структури та фізико-механічних властивостей у зварному шві сталі з твердим сплавом, що наплавляється. В результаті плавлення у зоні зварного шва [5] утворюються складні багатоконпонентні сплави. При цьому

швидкість переміщення меж складових взаємодіючих поверхонь залежить від хімічного складу компонентів, що сплавляються.

Останнім часом розпочалися роботи з підвищення зносостійкості робочих поверхонь шляхом приварювання до них дискретних елементів – штирів. Це значно підвищило продуктивність робіт з нанесення дешевих зносостійких покриттів, проте ефективно приварювати вдається лише штирі із хромистого чавуну, що дає незначний приріст зносостійкості. Подальшого підвищення зносостійкості робочих поверхонь можна досягти лише приварюючи штирі із високоміцних, спечених твердих сплавів. Існуючі режими приварювання відпрацьовані для хромистого чавуну, інших матеріалів, але не придатні для приварювання штирів із твердих сплавів. При ударних навантаженнях приварені твердосплавні штирі з серійних марок сплавів легко відокремлювались від сталеві поверхні, в зварних швах утворювались тріщини та дефекти.

Наведені вище дані вказували на те, що при зміцненні сталевих поверхонь твердосплавними штирями необхідно забезпечити спеціальний режим приварювання, оптимізувати склад та конструкцію штиря. У зв'язку з цим метою цієї роботи є розробка та обґрунтування конструкцій та складу металокерамічних твердосплавних шаруватих армуючих штирів, а також параметрів приварювання (сили струму та тривалості імпульсу).

Результати лабораторних випробувань різних конструкцій армуючих елементів.

Відомо [5], що рідкий метал або розплав металів, що утворюється в процесі зварювання, захищають від впливу кисню і азоту повітря розплавленим шлаком, який зазвичай утворюється при плавленні флюсу, що подається в зону зварювання. У запропонованому способі приварювання армуючих штирів захисних добавок та флюсів не застосовувалося.

Дослідження проводились у два етапи. Перший – розробка конструкції штирів, а другий – вибір марок твердих сплавів та електротехнічних режимів приварювання зносостійких штирів. Для досліджень були використані штирі з чавуну, штирі з чавуну армованого втулками та вставками з твердих сплавів і суцільно твердосплавних штирів (як з однорідною структурою, так і з шаруватою структурою), штирі з алмазовмісного композиту, по 10 штук кожного складу та п'яти різних конструкцій.

Порівняльні випробування склалися з двох основних операцій: 1) приварювання підготовлених зразків до плити з марганцевої сталі; 2) ударне навантаження привареного зразка з підрахунком кількості циклів до його руйнування, або його відриву від місця кріплення. Для приварювання використовувався зварювальний апарат марки «Елотор 1702». Сила струму приварювання варіювалася від 700А до 1000А. Тривалість імпульсу змінювалася від 0,02 с до 0,06 с.

Ударне навантаження здійснювалося на експериментальній установці маятникового типу, що забезпечує фіксоване ударне навантаження, однакове для всіх зразків. У процесі випробувань фіксувалися дефекти: раковини, тріщини, неоднорідність шва та твердосплавної поверхні. Розглянемо п'ять конструкцій штирів, що використані у дослідженнях.

Конструкція № 1 являє собою чавунний штир із зовнішньою твердосплавною втулкою. Зовнішня втулка з'єднується з робочою частиною штиря пайкою. Таке конструктивне рішення дозволяє використовувати переваги ефективного кріплення чавунного штиря до сталі, а зносостійкість підвищується за рахунок матеріалу втулки.

Конструкція № 2 являє собою шарувату конструкцію. Верхня, допоміжна частина і нижня частина виготовлені з хромистого чавуну, а зносостійка частина – із твердого сплаву. Усі деталі конструкції з'єднані між собою методом паяння припоєм Л63.

Конструкція № 3 дозволяє підвищити властивості чавунного штиря за рахунок оснащення його вставкою з алмазовмісного композиційного матеріалу. Ця пластина,

виступаючи над чавунним корпусом штиря, сприймає основну частку абразивних навантажень. Для цього до торця чавунного штиря припаюється зносостійка вставка з КАМ.

Конструкція № 4 не передбачає використання складових з чавуну, натомість передбачаючи поєднання сталевго корпусу – технологічної частини штиря, з робочою частиною – твердосплавним циліндром $\varnothing 15$ мм; $h = 5$ мм. Верхня технологічна частина виготовляється зі Ст3. Для проходження імпульсу струму твердосплавна вставка до сталевго корпусу припаюється латунним припоєм Л63.

Розроблена також конструкція № 5, в якій робоча частина являє аналогічно конструкції № 4 твердосплавний циліндр $\varnothing 15$ мм; $h = 5$ мм. Верхня технологічна частина виконується зі Ст3. Але вставка, виготовлена на полікарбідній основі та багатоконпонентній зв'язці WC–TiC–Co–Ni–Al–Fe, має шарувату структуру, із нижнім легованим шаром, який забезпечує міцне приварювання до сталевго поверхні.

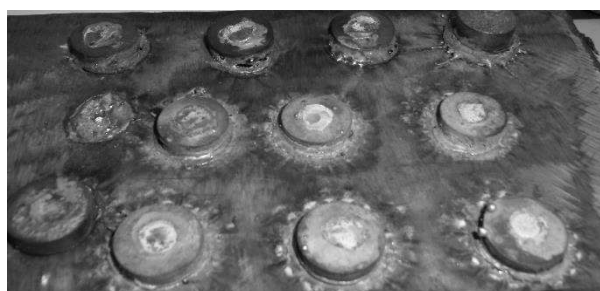


Рис. 1. Приварені армуючі штирі на сталевій поверхні

Всі п'ять наведених конструкцій штирів приварювалися до підготовленої поверхні із сталі Г13 (рис. 1).

Результати стійкості випробуваних штирів кожної з наведених вище конструкцій наведено у табл.1. Приварка проводилася за різних тривалостей імпульсу T від 200 до 600 мс при силі змінного струму I від 600 до 800 А (табл. 1).

Таблиця 1. Порівняльна характеристика зносостійкості конструкцій приварених армуючих штирів при циклічному навантаженні

№ п/п	Найменування конструкції штиря	Кількість циклів навантаження, до відриву, N
1	Чавунний штир, армований твердосплавною втулкою (конструкція № 1)	7
2	Штир з проміжною твердосплавною вставкою (конструкція № 2)	5
3	Чавунний штир, оснащений композиційною алмазовмісною вставкою (конструкція № 3)	3
4	Сталева технологічна частина з робочою частиною, вставкою з WC–Co твердого сплаву (конструкція № 4)	10
5	Сталевий корпус з робочою частиною, вставкою з WC–Ti–Co–Ni–Al–Fe сплаву (конструкція № 5)	14

Серед виготовлених та випробуваних у лабораторних умовах конструкцій найбільша стійкість до відриву була у штирів конструкції № 5 (14 циклів навантажень). У зв'язку із цим подальші експерименти проводилися на штирях конструкції № 4, 5. Зруйновані в результаті випробувань армуючі елементи різних конструкцій представлені на рис. 2.

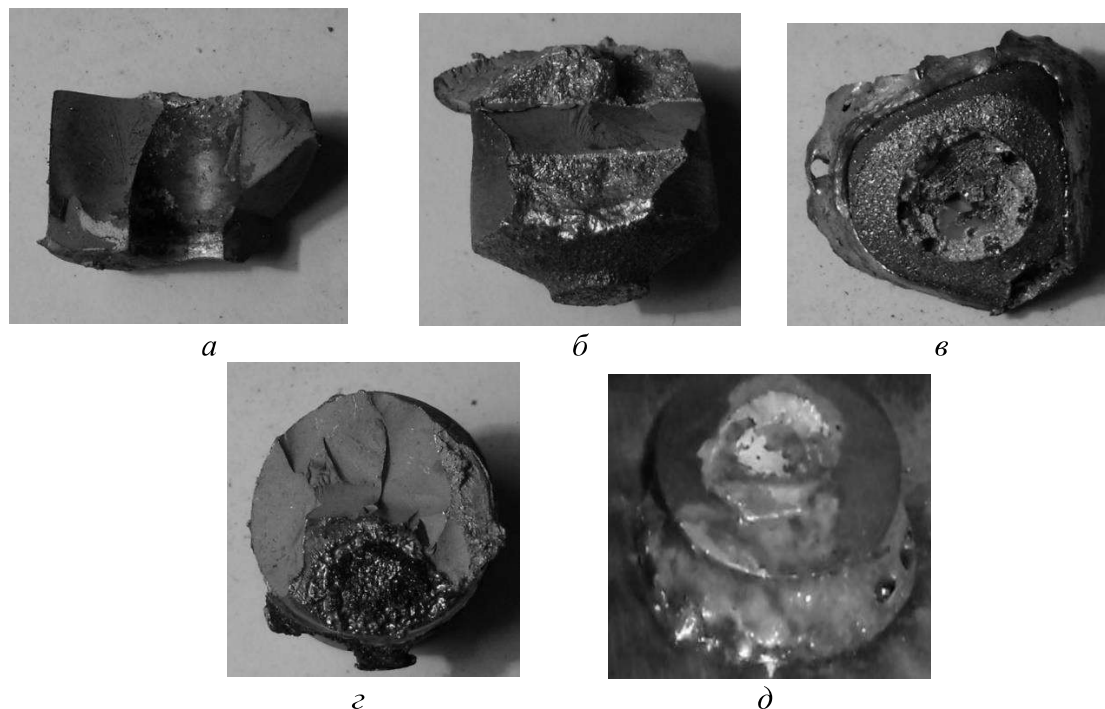


Рис. 2. Характерні види руйнування армуючих елементів: а – розколювання зовнішньої армуючої твердосплавної втулки; б – сколювання шаруватого штиря; в – розплавлення вставки з КАМ; г – сколювання твердосплавної вставки; д – міцне утримання вставки із твердого сплаву на багатокарбідній основі з багатоконпонентною зв'язкою

Відомо, що WC-Co тверді сплави мають мікротвердість 14,0–15,0 ГПа. Карбід вольфраму, що становить від 85 до 90 % маси сплаву, має мікротвердість 17,0 ГПа. Мікротвердість основних породоутворюючих мінералів: кварцу, польового шпату, піроксенів, амфібол, кальцитів – значно нижче твердого сплаву. Тому кварц із мікротвердістю 12,0 ГПа не може абразивно впливати на зерна WC. Знос твердого сплаву [6] відбувається взаємодоповнюючими стадіями: 1) абразивне вимивання зв'язки та мікроруйнування окремих фрагментів твердосплавного скелета; 2) втомне руйнування твердого сплаву; 3) руйнування зерен WC внаслідок високих ударних навантажень та температур (до 1000 °C); 4) перехід від механічних видів зносу до фізико-механічних, пов'язаних із термічним зміцненням та окисленням поверхні тертя.

Для забезпечення максимального захисту поверхні від ударно-абразивного зношування були проведені випробування зі штирями конструкції № 5 з використанням зносостійких елементів твердих сплавів різних марок. Необхідно підкреслити, що твердість твердого сплаву VN20 дорівнює твердості хромистого чавуну, проте його межа міцності при вигині сплаву в 3 рази вище. Але з-за високої вартості і низької зносостійкості сплав VN20 не використовувався в дослідженнях.

Для виготовлення твердосплавних вставок застосовувалися твердосплавні суміші. Спікання вставок проводилося в прецизійному контрольованому метано-водневому газовому середовищі [7] і в вакуумі. Процес спікання є багатоланковим фізико-хімічним процесом [8]. Але саме цей процес дозволяє суворо контролювати вміст вуглецю в твердих сплавах, що спікаються, для отримання WC-Co і WC-Ni сплавів з однорідною двофазною структурою з вмістом вуглецю, відповідним двофазній області WC-Co, тобто виключає появу в сплаві третьої фази, яка веде до крихкого руйнування твердого сплаву.

Таблиця 2. Властивості хромистого чавуну та твердих сплавів для наплавок зносостійких армуючих елементів згідно ТУУ 28.4-30153645.004-2001

№ п/п	Марка сплаву	Твердість, <i>HRA</i>	Межа міцності при згині <i>Rm20</i> , МПа	Густина, г/см ³
1	Чавун ЧХ9Н5.	80	580	7,0 - 7,3
2	Твердий сплав ВН20	57	1570	13,4-13,7
3	Твердий сплав ВК6	88,5	1520	14,6-15,0
4	Твердий сплав ВК8	85,5	2100	14,0-14,3
5	Твердый сплав ВК15	86,0	1860	13,9-14,4
6	Твердий сплав ВКН	87,5	1900	13,5-13,8

Для кожної марки сплаву були оптимізовані параметри імпульсного приварювання. На рис. 3 представлені залежності кількості циклів навантаження до відриву *N* твердосплавних штирів, нанесених на сталеву поверхню, від різних значень тривалості імпульсу від 300 до 550 мс при силі змінного струму *I* = 850 А для різних марок твердих сплавів.

При малих тривалостях імпульсу відбувається локальне прихоплювання частин штирів, а при великих має місце оплавлення контактного шару з утворенням раковин, що супроводжується сіткою тріщин твердосплавної зносостійкої вставки. Таким чином, при аналізі отриманих залежностей (рис. 3) були отримані дані про те, що збільшуючи значення сили струму і тривалості імпульсу, можна домогтися утримання зразків на поверхні. Але при цьому визначальним параметром є міцність зварного шва, що залежить від матеріалу, який

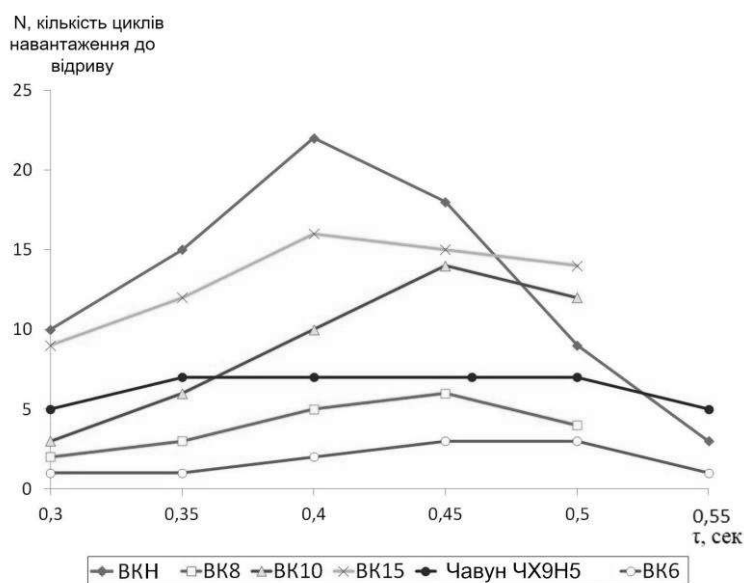


Рис. 3. Залежність кількості циклів навантаження до відриву *N* від тривалості імпульсу *t* (сек) наплавок із різних марок твердих сплавів: ВК6, ВК8, ВК-10, ВК15, ВКН, хромистий чавун ЧХ9Н5

повинен бути зі сформованим шаром із високою твердістю і зносостійкістю робочої поверхні та мати високолегований пластичний шар, який забезпечує утворення міцного однорідного зварного шва без раковин і тріщин. Найбільше циклів навантаження до відриву витримують наплавлення зі сплаву ВКН при тривалості імпульсу зварювання 0,4 с. Саме ці наплавлення при використанні оптимізованого режиму приварювання було обрано для подальшого промислового випробування.

Були проведені виробничі випробування зубів ковшів екскаваторів з твердосплавними армуючими

штирями зі сплаву композиту на основі легованої матриці WC, TiC і багатокомпонентної зв'язки Co, Ni, Fe (а) марки ВКМ. Для визначення експлуатаційних властивостей зносостійкого

покриття у виробничих умовах на зуби ковша екскаватора були нанесені армуючі елементи (рис. 4, 5) згідно з розробленими способами [9, 10].

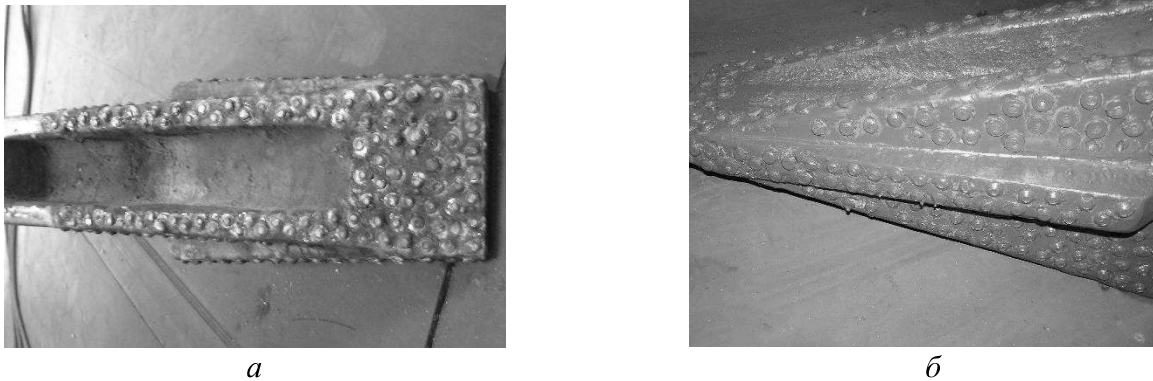


Рис. 4. Зуби для ковша екскаватора з нанесеними твердосплавними армуючими елементами: а – поверхні з наплавленими штирями; б – антикорозійне покриття армованих поверхонь

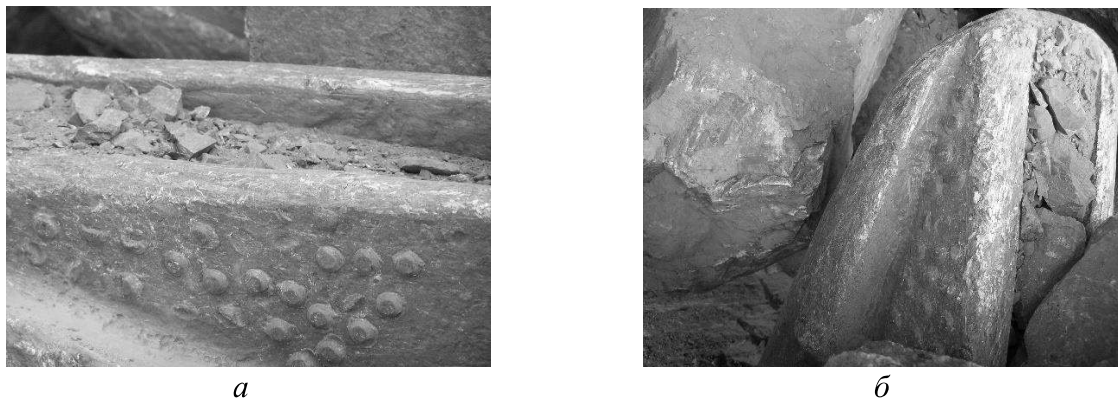


Рис. 5. Зношені поверхні, армовані зносостійкими елементами із твердого сплаву ВКН: а – зношена армована бічна поверхня; б – зношена армована передня поверхня

Армовані зуби монтувалися на ківш екскаваторів ЕКГ-8І, порівнювалися у роботі із зубами неармованими. Обсяг переробленої гірничої маси становив 24,318 тис. м³, відповідно норма витрати армованих зубів на 1 тис. м³ гірничої маси становила 0,21 шт. Планова норма витрати зубів на екскаваторній ділянці №1 – 0,40 шт. на тис. м³, а фактична у неармованих зубів – 0,37 шт. на тис. м³ гірничої маси.

Висновки

Максимальну зносостійкість ковшів екскаваторів ЕКГ-8І забезпечили твердосплавні армуючі елементи з сплаву ВКН при параметрах приварювання: $I = 850\text{A}$, тривалості імпульсу: $t = 400\text{ мс}$. При змісті зв'язки понад 15% вартість робіт з наплавлення не є ефективною через збільшення вартості. В результаті виробничих випробувань комбінованих твердосплавних штирів із сплаву ВКН визначено, що витрата армованих зубів у 1,76–1,9 менше, ніж неармованих.

Для подальшого підвищення експлуатаційних властивостей техніки та розширення галузі застосування технології імпульсного армування твердосплавними елементами необхідно підвищити ударно-абразивну зносостійкість сплавів на полікарбідній основі і сплавів із вмістом багатоконпонентної зв'язки 8–10 %.

M.M. Prokopiv, O.V. Kharchenko, Yu.P. Ushchapovskyy

V. N. Bakul Institute for Superhard Materials of National Academy of Sciences of Ukraine

IMPROVING THE WEAR RESISTANCE OF THE WORKING BODIES OF MINING EQUIPMENT

The article proposes cemented carbide reinforcement of the steel surfaces of the teeth of excavator buckets with layered pins with increased physical and mechanical characteristics. The design of the reinforcing elements was optimized, the optimal welding parameters and the composition of the hard alloy pins were established.

For the manufacture of hard alloy elements, serial and regenerated mixtures with a bond content of 13 to 20% were used. Sintering of the inserts was carried out in pass-through, vacuum furnaces.

It was established that by increasing the value of the current and the duration of the pulse, it is possible to ensure the attachment of hard alloy inserts on steel surfaces, but the determining parameter will be the strength of the weld seam, which depends on the material of the wear-resistant insert and the welding parameters. Optimal welding parameters of reinforcing inserts are set: pulse duration – $T=0.04$ s, current – $I = 850$ A. But with a bond content of more than 15%, the cost of surfacing works is not effective due to a significant decrease in wear resistance and an increase in cost. As a result of laboratory research and production tests, it was established that the wear resistance of bucket teeth of excavators and chisels of deep rippers reinforced with cemented carbide elements made of WC–TiC–Co–Ni–Al–Fe alloy is increased by 1.7÷1.9 compared to serial tools and is economically beneficial due to the reduction in the price of the constituent alloys. In order to further improve the operational properties of reinforcing hard alloy elements and expand their scope of application, it is necessary to increase the impact-abrasive wear resistance of multi-carbide based alloys with a content of multicomponent bonds of 8–10%.

Key words: welded reinforcement, hard alloy, polycarbide base, multi-component bond, surfacing, bucket teeth, chisel bits of deep looseners, wear resistance.

Література

1. Гречнева М.В., Толкачев С.А., Владимирцев И.К. Повышение износостойкости деталей горных машин // Вестник ИрГТУ. – 2011. – № 12 (59). – С. 26–29.
2. Болобов В.И., Баталов А.П., Бочков В.С., Чупин С.А. Износостойкость стали 110Г13Л в различных абразивных средах // Записки Горного института. – 2014. – Т. 209. – С. 17–22.
3. Лотоус В.В., Наумова Е.А., Драгобецкий В.В. Повышение износостойкости зубьев ковшей экскаваторов при избирательном взрывном упрочнении // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – 2014. – 1(13). – С. 157–164.
4. Shivali S., Amardeep S.K., Jasmaninder S.G., Gurmeet S.C. Wear Behavior of Weld Overlays on Excavator Bucket Teeth. // *Tribology International*, 2006. Vol. 39, N 6. – P. 570–574.
5. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. акад Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
6. Арцимович Г.В. Механофизические основы создания породоразрушающего инструмента. – Новосибирск: Наука, 1985. – 268 с.
7. Бондаренко В. П., Павлоцкая Э. Г. Спекание вольфрамовых твердых сплавов в прецизионно-контролируемой газовой среде. – К.: Наукова думка, 1995. – 204 с.
8. Бабич М.М. Неоднородность твердых сплавов по содержанию углерода и ее устранение. – К.: Наукова думка, 1975. – 175 с.
9. Патент на корисну модель № 23230 Україна МПК В23К 9/23 (2006.01), В23К 9/00. Спосіб формування зносостійкого покриття / А.К. Кінах, В. О. Півень, М. В. Новіков,

- В. П. Бондаренко, М. В. Тараненко, А. М. Папіж, Ю. П. Ущатовський. – Опубл. 10.05.07, Бюл. № 6.
10. Патент на корисну модель №23231 Україна МПК В23К 9/23 (2006.01), В23К 9/00. Спосіб формування зносостійкого покриття / А.К. Кінах, В. О. Півень, М. В. Новіков, В. П. Бондаренко, М. В. Тараненко, А. М. Папіж, Ю. П. Ущатовський. – Опубл. 10.05.07, Бюл. № 6.

Надійшла 05.09.22

References

1. Grechneva, M.V., Tolkachev, S.A., & Vladimirtsev, I.K. (2011). Povyshenie iznosostoikosti detalei gornyykh mashin [Improving the wear resistance of mining machine parts]. *Vestnyk Yrkutskogo hornoho tekhnicheskogo unyversyteta – Bulletin of the Irkutsk Mining Technical University*, 12 (59), 26–29 [in Russian].
2. Bolobov, V.I., Batalov, A.P., Bochkov, V.S., & Chupin, S.A. (2014). Iznosostoikost stali 110H13L v razlichnykh abrazivnykh sredakh [Wear resistance of 110G13L steel in various abrasive media]. *Zapyski Hornoho instituta – Notes of the Mining Institute*, 209, 17–22 [in Russian].
3. Lotous, V.V., Naumova, E.A., & Drahobetskii V.V. (2014). Povyshenie iznosostoikosti zubev kovshei ekskavatorov pri izbiratelnom vzyryvnom uprochnenii [Improving the wear resistance of excavator bucket teeth with selective explosive hardening]. *Suchasni resursoenerhozhberihaiuchi tekhnologii hirnychoho vyrobnytstva – Modern resource-energy-saving technologies of mining production*, 1(13), 157–164 [in Russian].
4. Shivali, S., Amardeep, S.K., Jasmaninder, S.G., & Gurmeet, S.C. (2006). Wear Behavior of Weld Overlays on Excavator Bucket Teeth. *Tribology International*, 39, 6, 570–574.
5. Paton, B. Ye. (Ed.). (1974). *Tekhnolohiia elektricheskoi svarky metallov i splavov plavlaniem [Technology of electric fusion welding of metals and alloys]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
6. Artsimovich, G. V. (1985). *Mekhanofizicheskie osnovy sozdaniia porodorazrushaiushcheho instrumenta [Mechanophysical basis of creation of a rock-destroying tool]*. Novosibirsk: Nauka [in Russian].
7. Bondarenko, V. P., & Pavlotskaia, E. G. (1995). *Spekanie volframovykh tverdyykh splavov v pretsizionno-kontroliruemoi hazovoi srede [Sintering of tungsten hard alloys in a precision-controlled gas environment]*. Kiev: Naukova Dumka [in Russian].
8. Babich, M.M. (1975). *Neodnorodnost tverdyykh splavov po sodержaniuu uhleroda y ee ustraneniye [Inhomogeneity of hard alloys in terms of carbon content and its elimination]*. Kiev: Naukova Dumka [in Russian].
9. Kinakh, A.K., Piven, V. O., Novikov, M. V. (2007). Utility model patent of Ukraine 23230 [in Ukrainian].
10. Kinakh, A.K., Piven, V. O., Novikov, M. V. (2007). Utility model patent of Ukraine 23231 [in Ukrainian].