

ВИБІР ЗНОСОСТІЙКИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ В СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ ДЕТАЛЕЙ ОБЛАДНАННЯ ГІРНИЧОЇ ТЕХНІКИ

А.В. Нетяга, Ю.М. Кусков, В.М. Проскудін, В.О. Жданов

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Розглянуто умови експлуатації деталей та вузлів обладнання гірничої техніки, що виготовляються в основному зі сталі 110Г13Л. Відзначено обмежені можливості застосування цієї сталі для підвищення довговічності устаткування. Як альтернатива показана можливість застосування електрошлакового наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі різними високовуглецевими матеріалами. Найбільш перспективним матеріалом для наплавлення слід вважати високохромисті чавуни, що мають хороше поєднання підвищених механічних властивостей та опір абразивному та ударно-абразивному зношуванню. Бібліогр. 24, табл. 2, рис. 1.

Ключові слова: деталі обладнання гірської техніки, зношування, електрошлакова наплавка, струмопідвідний кристалізатор, сталь 110Г13Л, високохромистий чавун, швидкорізальна сталь

Більшість машин та механізмів гірничо-металургійного комплексу експлуатуються в жорстких умовах абразивного та ударно-абразивного зношування, а в ряді випадків і складного термонапруженого стану. Такі умови експлуатації призводять до підвищеного зношування робочих поверхонь, відповідальних за працездатність всього виробу деталей.

Відомо, що одним із способів підвищення довговічності зношуваних деталей є зносостійке наплавлення, а в разі нанесення наплавленого металу великої товщини переважно використовувати електрошлакове наплавлення (ЕШН), зокрема, ЕШН в струмопідвідному кристалізаторі (СПК), що дозволяє в широких межах регулювати теплові умови кристалізації наплавленого металу у вигляді сталей та сплавів різного класу.

Метою даної роботи є обговорення існуючих підходів до вибору технології зміцнення вузлів та деталей обладнання гірничої техніки, а також вибору матеріалів для електрошлакового відновлювального наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі.

Аналіз технологій та їх обговорення. Традиційно склалося так, що найбільш прийнятним матеріалом для виготовлення виробів і деталей (або футеровок до них) обладнання гірничої техніки є сталь 110Г13Л. Практично всі унікальні вироби великих розмірів (ковші екскаваторів, черпаки драг тощо) або масового виробництва (біла, молотки тощо) виготовляють з цієї сталі [1, 2].

Часто при прийнятті рішення про використання цієї сталі з метою підвищення працездатності виробів, що експлуатуються в умовах абразивно-

го зношування, не враховують її структурні особливості, що дозволяють домогтися позитивних результатів лише у випадку, якщо абразивне зношування супроводжується ударними навантаженнями. Встановлено, що за відсутності ударів сталь 110Г13Л не має відчутних переваг у порівнянні зі сталлю 40 [3]. Такий вплив ударних навантажень на підвищення як твердості сталі, так і її зносостійкості найчастіше пояснюють мартенситним деформаційним перетворенням (наклепом) [4]. Хоча існують інші пояснення структурних змін у цій сталі в умовах зовнішнього ударного впливу, пов'язані з процесами, що відбуваються в тонкій кристалічній структурі (дроблення мозаїчних блоків та виникнення мікронапруг) або при поєднанні протікання обох структурних процесів [5, 6].

У практичному плані можна стверджувати, що сталь 110Г13Л тим більше буде виявляти свої зносостійкі якості, чим при більших навантаженнях вона буде експлуатуватися, хоча ступінь її зміцнення (підвищення твердості) при значному зростанні навантажень знижується [7, 8].

Слід також зазначити, що глибина зміцненого шару при експлуатації виробів різного призначення в умовах ударно-абразивного зношування відносно невелика. Відомо [9], наприклад, що поверхні навіть повністю зношеного зуба ковшів екскаваторів ЕКГ-4 на глибині до 1 мм мають твердість, що не перевищує *HB* 375, а на глибині 3 мм – понад *HB* 285. Зі збільшенням глибини шару вона наближається до показника твердості металу у вихідному стані, що і обумовлює загалом низьку зносостійкість зубів зі сталі 110Г13Л. Аналогічна оцінка отримана і за результатами екс-

плуатації щік шоккової дробарки ЛД-58Б: глибина зміцненого шару складала 2,5...2,7 мм [7].

Одним із способів підвищення зносостійкості сталі є її зміцнення за рахунок виконання попереднього наклепу робочої поверхні виробу до його експлуатації. Найбільш ефективним способом такого зміцнення є обробка робочої поверхні енергією вибуху. Глибина такого зміцнення не перевищує 2 мм [10].

Проте зносостійкість деталей гірських машин, навіть зміцнених цим способом, залежить від міцності шматків перероблюваної гірничої маси (табл. 1) [11].

Сучасні схеми зміцнення вибухом дозволяють забезпечити поверхневу жорсткість після зміцнення порядку $HV\ 380...420$. Отже, ті деталі, які під час роботи отримують наклеп більше, ніж глибина зміцнення під час вибуху, зміцнювати вибухом недоцільно [11].

Вже при перших спробах оцінки впливу електрошлакового процесу на властивості сталі 110Г13Л була відзначена можливість поліпшення пластичності сталі [12].

Встановлено [13], що при ЕШН в СПК стружкою сталі 110Г13Л, при дотриманні оптимального співвідношення електричної енергії, що вводиться в шлакову ванну, та масової швидкості подачі присадки, можна забезпечити не тільки мінімальне проплавлення основного металу (сталь Ст3), але і досягти формування дрібнозернистої структури з відносно невеликим розміром осередків – 40...60 мкм. А як показали дослідження, виконані в роботі [14], при подрібненні зерна в цій сталі підвищується міцність, пластичність, ударна в'язкість, інтенсивність наклепу, абразивна стійкість при ударному навантаженні.

Таким чином, наплавлення в СПК сталлю 110Г13Л виконувати можна, але будь-які відхилення від оптимальної технології наплавлення мо-

жуть призводити до формування в зоні сплавлення крихких структурних складових і, як наслідок, дефектів у вигляді тріщин.

Матеріали для наплавлення. Найбільш ефективним наплавним матеріалом для деталей обладнання гірничої техніки можуть бути перш за все високохромисті чавуни, що містять приблизно від 15 до 30 % хрому, які знайшли широке застосування в ливарній практиці, а також при електрошлаковій наплавці в СПК виробів металургійного виробництва, зокрема, прокатних валків [15].

Таке широке застосування чавуну цього типу пов'язано з особливостями їх структури. Зі збільшенням вмісту хрому в структурі, поряд з цементитом (Fe_3C) створюється тригональний карбід хрому типу $(Cr, Fe)_7C_3$, що розчиняє від 30 до 50 % заліза [16]. При вмісті хрому понад 14 % утворюються лише спеціальні карбіди. При подальшому збільшенні хрому замість тригонального утворюється кубічний карбід хрому $(Cr, Fe)_{23}C_6$. Карбіди хрому, що формуються, мають підвищену мікротвердість. За даними К. Реріга вона становить $HV\ 12000...16000$ МПа для карбідів типу M_7C_3 [17] і приблизно $HV\ 14000$ МПа для $M_{23}C_6$ [18], тоді як твердість цементиту білих чавунів не перевищує $HV\ 8400...10000$ МПа.

Крім змін у складі карбідної фази чавуну, змінюється і морфологія евтектичної складової. Крихкий ледебурит, властивий звичайним білим чавунам, замінюється міцнішою хромистокарбідною евтектикою [19, 20]. Схематичне зображення будови ледеburиту та хромистокарбідної евтектики за К.П. Буніним представлено на рисунку.

Слід зазначити ще одну особливість високохромистих чавунів – вони, як і сталь 110Г13Л, можуть зміцнюватися під впливом ударних навантажень. Хоча вже на початку литі чавуни цього типу мають підвищену твердість ($\sim HRC\ 50$), яка, як мінімум, не знижується в процесі експлуатації.

Таблиця 1. Зносостійкість зміцнених вибухом деталей гірських машин за різної міцності шматків гірської маси

Міцність шматків гірської маси за шкалою М.М. Протоdjяконова	Збільшення зносостійкості, %	
	зубів ковшів екскаваторів ЕКГ-4, ЕКГ-8	броней конусних дробарок КМД та КСД
6...8	55	65
10...12	30	44
14...16	15	23
18...20	0	5

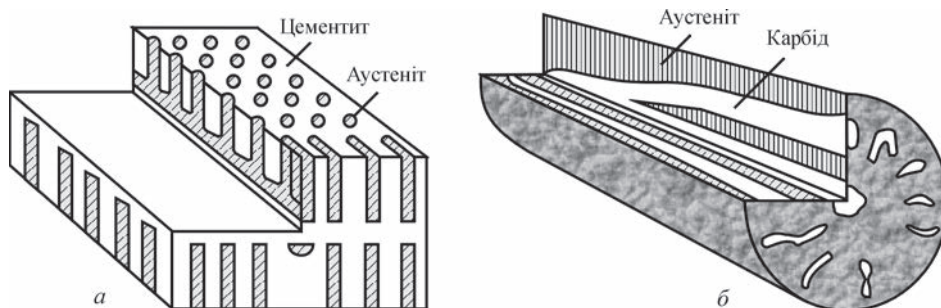


Рис. 1. Схематичне зображення структури ледеburиту (а) та хромистокарбідної евтектики (б)

Таблиця 2. Механічні властивості та твердість сталі 110Г13Л та високохромистого чавуну (~3 % С, 16 % Cr)

Марка матеріалу	Механічні властивості							Твердість HV (HRC)	Джерело
	σ_b , МПа	σ_r , МПа	Ψ , %	δ , %	KCU , МДж/м ²	$\sigma_{\text{вир}}$, МПа	Стріла прогину, мм		
110Г13Л (після лиття)	400...500	300...450	–	0,5...5	0,1...0,3	–	–	200...230	[21]
110Г13Л (після закалювання)	560...1000	250...400	35...45	40...50	1,2...2,2	–	–	170...230 (< 18...22)	[10] [21] [22]
110Г13Л (після впливу ударних навантажень)	~1000	~ 830	23...27	15...19	1,4...1,7	–	–	250...325 (24...33)	[10]
Наплавлений високохромистий чавун (ЕШН)	600	–	–	–	1,3	1270	2,3	(~ 50)	[23]
Литий високохромистий чавун	420	–	–	–	–	280	1,7	(~ 50)	

За міцнісними характеристиками наплавлений електрошлаковим способом високохромистий чавун відповідає характеристикам сталі 110Г13Л та істотно перевищує характеристики литого зносостійкого чавуну аналогічного складу (табл. 2).

До потенційно можливих для застосування при ЕШН в СПК деталей гірничого обладнання можна віднести і високолеговані швидкорізальні сталі.

Досвід експлуатації валків листового стану 1700, наплавлених в СПК рідкою присадкою сталі типу 200Х5М5Ф5В5, дозволили отримати підвищення їх стійкості в 4,0...4,5 рази в порівнянні зі стійкістю стандартних чавунних валків з вибіленим робочим шаром [24].

Слід зазначити наступне. Мабуть, такого типу матеріали все ж таки вимагають експлуатації більшою мірою в умовах абразивного зношування, ніж ударно-абразивного. Тому для них слід знаходити відповідні області застосування. Крім того, як видно з хімічного складу сталей цього типу, у кожному окремому випадку необхідно оцінювати економічну доцільність їхнього застосування.

Висновки

1. Електрошлакова технологія наплавлення в СПК може розглядатися як ефективний спосіб зміцнення деталей обладнання, що експлуатується в умовах абразивного зношування та ударних навантажень.

2. До найбільш перспективних наплавних матеріалів для ЕШП в СПК деталей обладнання гірської техніки можна віднести високохромисті чавуни, що мають добре поєднання підвищених механічних властивостей та показників зносостійкості.

3. При ЕШН в СПК можна використовувати й інші високовуглецеві леговані матеріали, зокрема сталі 110Г13Л та швидкорізальні, але при цьому слід вибирати оптимальні області їх застосування і враховувати економічну доцільність їх наплавлення.

Список літератури

- Вороненко Б.И. (1992) Современные износостойкие сплавы для рабочих органов измельчителей ударного действия (Обзор). *МиТОМ*, **11**, 13–19.
- Липницкий А.М. (1973) *Плавка чугуна и сплавов цветных металлов*. Москва, Машиностроение.
- Попов В.С., Гордиенко В.Н., Шумилов А.А., Гайдар О.Ф. (1986) Износостойкая наплавка бронзифуторочных плит шаровых барабанных мельниц. *Сварочное производство*, **6**, 10–11.
- Никоненко А.С., Кривоспицкий В.М., Харитонов В.Ф. (1968) О кинетике упрочнения высокомарганцевых сталей. *Известия вузов. Черная металлургия*, **5**, 99–102.
- Григоркин В.И. (1963) К вопросу о природе упрочнения аустенитных сталей. *Известия вузов. Черная металлургия*, **2**, 95–103.
- Далева Л.И. (1963) Теоретические основы упрочнения стали Г13 при наклепе. *Труды ЦНИИТМАШа*. Кн. 106. Москва, Машгиз, сс. 182–192.
- Каракула М.В., Парфенов Л.И. (1968) Лабораторный контроль стали Г13 на износостойкость. *Литейное производство*, **7**, 37–38.
- Блюхер В.В., Парфенов Л.И., Волчок И.П. (1970) Свойства пластически деформированной высокомарганцевистой стали. *МиТОМ*, **12**, 32–33.
- Воронова Н.А., Теслюк А.К. (1965) Зубья ковшей экскаваторов ЭКГ-4 из хромомолибденовой стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, **1-2**, 72–74.
- Мадэй К. (1977) *Исследование и разработка технологии наплавки высокомарганцевой стали и упрочнения наплавленного слоя при восстановлении крестовин*. Дис. ... канд. техн. наук. Киев.
- Шестаков А.М., Джур В.А., Зимокос Г.Н., Тимофеев В.М. (1979) Повышение износостойкости горнообогатительного оборудования. *Бюл. НТИ «Черная металлургия»*.
- Медовар Б.И., Ксендзык Г.В. (1962) Электрошлаковый переплав аустенитной стали Г13. *Автоматическая сварка*, **9**, 18–21.
- Кусков Ю.М., Богайчук И.Л., Шевченко Н.П., Фесенко М.А. (2021) Электрошлаковая наплавка стружкой стали 110Г13Л в токоподводящем кристаллизаторе. *Сварочное производство*, **1**, 3–9.
- Астафьев А.А. (1997) Влияние размера зерна на свойства марганцевистой аустенитной стали 110Г13Л. *МиТОМ*, **5**, 18–20.
- Кусков Ю.М., Сарычев И.С. (2004) Восстановительная электрошлаковая наплавка чугуновых валков стана 2000. *Сварочное производство*, **2**, 39–43.
- Гарбер М.Е. (1972) *Отливки из белых износостойких чугунов*. Москва, Машиностроение.
- Rohrig, K. (1971) Gefüge und Beständigkeit gegen Mineralverschleiss von carbidischen Gusseisen. *Giesserei*, **23**, 697–706.

18. Золочевский Г.Л. (1972) Анализ теоретических предпосылок и технологических методов улучшения свойств износостойких белых чугунов. *Новое в металлведении и металлургической технологии материалов для машиностроения*, 102, 13–28.
19. Бунин К.П., Лев И.Е., Снаговский В.М., Таран Ю.Н. (1965) О структуре хромистых белых чугунов. *Литейное производство*, 9, 23–24.
20. Таран Ю.Н., Снаговский В.М. (1966) Морфология эвтектики в Fe–C–Cr сплавах. *МіТОМ*, 4, 27–30.
21. Хорин Я.Д. (1963) *Термическая обработка стали*. Труды ЦНИИТМАШ. Кн. 106. Москва, Машгиз, сс. 148–160.
22. Гасик М.И. (2004) Сталь Гадфильда: Современное состояние технологии и материаловедения крестовин железнодорожных стрелочных переводов. *Современная электрометаллургия*, 1, 29–39.
23. Кусков Ю.М., Рябцев И.А., Кузьменко О.Г., Лентюгов И.П. (2020) *Электрошлаковые технологии наплавки и рециклинга металлических и металлодержащих отходов*. Киев, Интерсервис.
24. Дубоделов В.И., Погорский В.К., Шкурко В.К. и др. (2002) Применение магнитодинамической установки в технологии электрошлаковой наплавки жидким металлом стальных прокатных валков. *Проблемы спец. электрометаллургии*, 4, 9–10.
9. Voronova, N.A., Teslyuk, A.K. (1965) Bucket teeth of excavators EKG-4 from chromium-molybdenum steel. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost*, 1-2, 72–74 [in Russian].
10. Madej, K. (1977) *Study and development of technology for surfacing of high-manganese steel and strengthening of deposited layer in restoration of frogs*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree. Kiev [in Russian].
11. Shestakov, A.M., Dzhur, V.A., Zimokos, G.N., Timofeev, V.M. (1979) *Increase of wear resistance of mining equipment*. Bul. NTI. Chyorn. Metallurgiya [in Russian].
12. Medovar, B.I., Kzyondzyk, G.V. (1962) Electroslag remelting of austenitic steel G13. *Avtomatich. Svarka*, 9, 18–21 [in Russian].
13. Kuskov, Yu.M., Bogaichuk, I.L., Shevchenko, N.P., Fesenko, M.A. (2021) Electroslag chip surfacing in current-conducting mold. *Svarochn. Proizvodstvo*, 1, 3–9 [in Russian].
14. Astafiev, A.A. (1997) Influence of grain size on properties of high-manganese austenitic steel 110G13L. *MіТОМ*, 5, 18–20 [in Russian].
15. Kuskov, Yu.M., Sarychev, I.S. (2004) Restoration electroslag surfacing of cast iron rolls of mill 2000. *Svarochn. Proizvodstvo*, 2, 39–43 [in Russian].
16. Garber, M.E. (1972) *Castings from white wear-resistant irons*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
17. Rohrig, K. (1971) Gefuge und Bestandigkeit gegen Mineralverschleiss von carbidishen Gusseisen. *Giesserei*, 23, 697–706.
18. Zolochovsky, G.L. (1972) Analysis of theoretical backgrounds and technological methods for improvement of properties of white wear-resistant irons. In: *Novelty in physical metallurgy and metallurgical technology of materials for mechanical engineering*. 102, 13–28 [in Russian].
19. Bunin, K.P., Lev, I.E., Snagovsky, V.M., Taran, Yu.N. (1965) On structure of chromium white cast irons. *Litejnoe Proizvodstvo*, 9, 23–24 [in Russian].
20. Taran, Yu.N., Snagovsky, V.M. (1966) Morphology of eutectics in Fe–C–Cr alloys. *MіТОМ*, 4, 27–30 [in Russian].
21. Khorin, Ya.D. (1963) *Heat treatment of steel*. Trudy TsNIITMASH. Book 106. Moscow, Mashgiz, 148–160 [in Russian].
22. Gasik, M.I. (2004) Hadfield steel: State-of-the-art of technology and materials science of railway switch frogs. *Advances in Electrometallurgy*, 1, 27–36.
23. Kuskov, Yu.M., Ryabtsev, I.A., Kuzmenko, O.G., Lentyugov, I.P. (2020) *Electroslag technologies of surfacing and recycling of metal and metal-containing wastes*. Kiev, Interservice [in Russian].
24. Dubodelov, V.I., Pogorsky, V.K., Shkurko, V.K. et al. (2002) Application of magnetodynamic unit in the technology of electroslag cladding of steel mill rolls using a liquid metal. *Advances in Electrometallurgy*, 4, 7-8.

References

1. Voronenko, B.I. (1992) Modern heat-resistant alloys for working elements of impact grinders (Review). *MіТОМ*, 11, 13–19 [in Russian].
2. Lipnitsky, A.M. (1973) Melting of cast iron and alloys of nonferrous metals. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Popov, V.S., Gordienko, V.N., Shumilov, A.A., Gajdar, O.F. (1986) Hardfacing of armor lining plates of ball-tube mills. *Svarochn. Proizvodstvo*, 6, 10–11 [in Russian].
4. Nikonenko, A.S., Krivospitsky, V.M., Kharitonova, V.F. (1968) On kinetics of strengthening of high-manganese steels. *Izv. Vuzov. Chyorn. Metallurgiya*, 5, 99–102 [in Russian].
5. Grigorkin, V.I. (1963) To problem of nature of strengthening of austenitic steels. *Izv. Vuzov. Chyorn. Metallurgiya*, 2, 95–103 [in Russian].
6. Dalyaeva, L.I. (1963) Theoretical principles of strengthening of G13 steel in cold working. Trudy TsNIITMASH. Book 106. Moscow, Mashgiz, 182–192 [in Russian].
7. Karakula, M.V., Parfenov, L.I. (1968) Laboratory control of G13 steel on wear resistance. *Litejnoe Proizvodstvo*, 7, 37–38 [in Russian].
8. Blyukher, V.V., Parfenov, L.I., Volchok, I.P. (1970) Properties of plastically deformed high-manganese steel. *MіТОМ*, 12, 32–33 [in Russian].

SELECTION OF WEAR-RESISTANT MATERIALS FOR ELECTROSLAG SURFACING OF MINING EQUIPMENT PARTS IN A CURRENT-CONDUCTING MOULD

A.V. Netyaga, Yu.M. Kuskov, V.M. Proskudin, V.O. Zhdanov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150 Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

The conditions of operation of the parts and components of mining equipment, which are made mostly from 110G13L steel, are considered. Limited possibilities for application of this steel to improve the equipment service life are noted. The possibility of application of electroslag surfacing in a current-conducting mould by different high-carbon materials is shown as an alternative. High-chromium cast irons should be considered the most promising surfacing material. They have a good combination of higher mechanical properties and resistance to abrasive and shock-abrasive wear. 24 Ref., 2 Tabl., 1 Fig.

Keywords: parts of mining equipment, wear, electroslag surfacing, current-conducting mould, 110G13L steel, high-chromium cast iron, high-speed steel

Надійшла до редакції 29.12.2021