

increased physico-chemical, mechanical and special properties at normal and high temperatures under conditions of intensive wear.

It has been established that when choosing the type of metal for conditions of high-temperature abrasive-corrosive wear, it is necessary to give preference to a structurally stable ferrite base with highly hard particles that comply with the Charpy principle.

Key words: *heat-resistant alloys, wear resistance, heat resistance, corrosion resistance, abrasive wear, rotary furnace.*

Стаття надійшла 25.04.2024 р.

УДК 621.762.02:669.295

doi.org/10.31498/2522-9990272024303158

Джуган О. А., Ольшанецький В. Ю., Капустян О.Є., Буліш С.О.

МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ НЕСФЕРИЧНИХ ТИТАНОВИХ ПОРОШКІВ ДЛЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Аддитивні технології є перспективним напрямком у розвитку таких галузей промисловості як високоточне машинобудування та авіадвигунобудування. Водночас висока собівартість процесу 3D-друку та відсутність альтернативної (сферичному порошку) сировини перешкоджає широкому розповсюдженню зазначених технологій. У даній роботі показано принципову можливість використання більш дешевих порошкових матеріалів на основі титану, що за хімічним складом відповідає марці сплаву VT1-0, з несферичною формою частинок, що отримують за технологією гідрування-дегідрування і призначених для виготовлення об'ємних виробів різними методами адитивних технологій. Методом профілювання насипаних і закріплених із підкладкою порошкових шарів мінімальної товщини із застосуванням різних фракцій показано, що оптимальна зовнішня поверхня отримується за умови використання порошкового матеріалу, в якому частинки мають форму багатогранників, умовно прийнятих за об'єкти, які за формою наближаються до частинок, у вигляді гексаєдрів та їхніх різновидів. Використання таких порошоків має забезпечити більш щільну та однорідну структуру у порівнянні з порошками сферичної форми. Розглянуто можливість застосування різних джерел енергії та способів для пошарового нарощування матеріалу при формуванні виробів – автоматичне електронно-променеве наплавлення та ручне аргонодугове наплавлення. Визначено оптимальні режими процесів покрокового сплавлення тонких шарів порошкових матеріалів. Описано перевагу запропонованих порошоків порівняно із порошками сферичної форми, що переважно застосовуються на сьогоднішній день. Проведено металографічні дослідження зразків, отриманих з несферичних порошоків, що показало високий рівень адгезії шарів без видимих несучільностей.

Ключові слова: *адитивні технології; титан; порошок; частинка; форма; фракція; поверхня; шар; компактування; сплавлення; структура; властивості.*

Постановка проблеми. Застосування адитивних технологій є перспективним напрямком у розвитку різних галузей промисловості (особливо таких як високоточне машинобудування та авіадвигунобудування), що дає змогу одержувати готові вироби, а також виготовляти необхідне в промисловості технологічно складне оснащення. Найважливішим завданням при цьому є заміна наявних дорогих імпорتنих порошкових матеріалів дешевшими аналогами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ці технології дають змогу об'єднати в собі головні переваги таких методів отримання виробів, як порошкова металургія, ливарне

Машинобудування і зварювальне виробництво

виробництво та наплавлення. Зазначені технології передбачають виготовлення виробу за даними цифрової моделі (або САD-файлу) методом пошарового додавання матеріалу. Процес пошарового нарощування виробів різними методами адитивних технологій набуває дедалі більшої популярності, оскільки має низку значних переваг над наявними, традиційними методами виготовлення, обробки та ремонту деталей. Формування виробу відбувається покроково, відповідно до конфігурації перерізу цифрової моделі і з'єднання кожного наступного шару з попереднім, (замість існуючої технології обробки металів різанням, коли матеріал нібито "віднімається") [1–4]. Технології 3D-друку дали змогу об'єднати в собі не тільки переваги порошкової металургії, як-от високий коефіцієнт використання матеріалу, чого не вдається досягти методами лиття, а й переваги ливарного виробництва як от одержання деталей складної форми та різної конфігурації.

Сьогодні зазначені технології успішно застосовуються для виробництва виробів із пластику та металу, але вже ведуться активні роботи з використання як сировини для таких технологій різних інтерметалідних і керамічних порошоків. Однак викликані при цьому складнощі процесу зменшують номенклатуру металевих виробів, одержуваних за допомогою адитивних технологій [5–10]. Таким чином, розвитку адитивних технологій у секторі промисловості, безумовно, сприяло б істотне розширення номенклатури металопорошкових матеріалів різної морфології. Якщо на початку 2000-х років це був перелік із щонайбільше 5-6 найменувань, то сьогодні намагаються використовувати десятки видів різноманітних композицій: від звичайних конструкційних сталей до жароміцних сплавів і дорогоцінних металів здебільшого порошоків сферичної форми [2–4]. Водночас порошки зі спеціальних сплавів (наприклад титанові) мають дуже обмежену номенклатуру видів цих матеріалів.

До основних переваг адитивних технологій можна віднести наступні:

1. можливість виготовлення деталей складної геометрії та різної конфігурації;
2. можливість оперативно змінювати геометрію деталей;
3. високий коефіцієнт використання матеріалу;
4. різні методи 3D-друку дають змогу використовувати їх для відновлення і ремонту виробів, а також дають змогу виготовляти деталі із закритими порожнинами.

Незважаючи на всі переваги, які надає використання 3D-друку, залишається низка проблем, що стримують поширення цієї технології в промисловості. Однією з них є необхідність ретельних досліджень властивостей (механічних, фізичних) виробів, що одержують з різних порошкових матеріалів, залежно від таких чинників, як вплив фракційного складу і форми самих частинок, що безумовно дуже важливо в таких відповідальних галузях виробництва, як авіабудування. При цьому слід зазначити, що на сьогоднішній день вже існує низка деталей, виготовлених методами 3D-друку, які встановлюються на газотурбінні двигуни виробництва зарубіжних компаній. Ще однією важливою проблемою є дорожнеча обладнання для 3D-друку, хоча, виходячи з досвіду підприємств, які впроваджують у своєму виробництві технології пошарового вирощування виробів, можна зробити висновок, що головним стримуючим фактором на шляху до широкого застосування адитивних технологій є вартість сировини для об'ємного друку. Особливо це позначається при використанні порошоків титану, як легованих, так і нелегованих, і основну роль у ціноутворенні тут відіграє не стільки вартість легувальних елементів, скільки вартість самої технології одержання порошоків необхідної сферичної форми (яка складає близько 300–500 доларів за кілограм). Таким чином, існує необхідність розробки порошоків для адитивних технологій. Тому основним завданням, поставленим у даній роботі, було визначити можливість застосування титанових порошоків несферичної форми, які пройшли процеси гідрування та дегідрування, в адитивних технологіях для отримання готових виробів. Процес гідрування титану (губчастого) полягає в прямому насиченні воднем титану і проходить за температур 400...600° С. Гідрування титану губчастого проводиться з метою насичення і окрихчування вихідного матеріалу для

подальшого подрібнення. Процес дегідрування здійснюється за температур 700...900° С і полягає в дегазації гідриду титану за температур розкладання гідриду: $TiH_2 \rightarrow Ti + H_2$. Аналіз технологічних показників виробництва порошків, їх переваг і недоліків показав, що найперспективнішим матеріалом для 3D-друку є порошок, одержуваний за гідридною технологією. Такий матеріал має низькорозвинені поверхні граней частинок порошку, наближених за формою до сфероїдів. Він менш, ніж інші, забруднений домішками, оскільки водень сприяє очищенню титану при дегідруванні [11]. Сукупність технологічних рішень виробництва таких порошків титану дає змогу одержувати більш щільний матеріал із меншим вмістом шкідливих домішок, що підвищує якість порошку та покращує морфологію окремих його частинок. На рис. 1 показано зовнішній вигляд і структуру сферичних і несферичних порошків. Зазвичай вважають, що найкращими за формою частинками є сфероїди приблизно однакового розміру [1, 2], при цьому кожен шар таких частинок зазвичай компактують шляхом докладання незначних поверхневих зусиль (наприклад, за допомогою валика, що обертається). Оскільки подальша технологічна операція передбачає спікання або проплавлення шару з такого роду частинок [8–10], то необхідно від самого початку передбачити можливість використання суто термодинамічних підходів для отримання найкращих результатів як за часом завершення процесу спікання або сплавлення (адгезії) шарів, так і за якістю поверхні, що формується.

Мета досліджень. Оцінка можливості використання титанових порошків, які попередньо піддавали операціям гідрування та дегідрування в технологічному ланцюжку їх виробництва для подальшого отримання виробів різними методами адитивних технологій.

Основний матеріал дослідження. На рис. 1 наведено реальні частинки металічного порошку (сферичного титану та порошку титану, отриманого за технологією гідрування-дегідрування [11–14]), що відповідають спрощеним моделям, представленим у роботі [12–15], різних типів укладання гіпотетичних частинок тієї чи іншої форми.

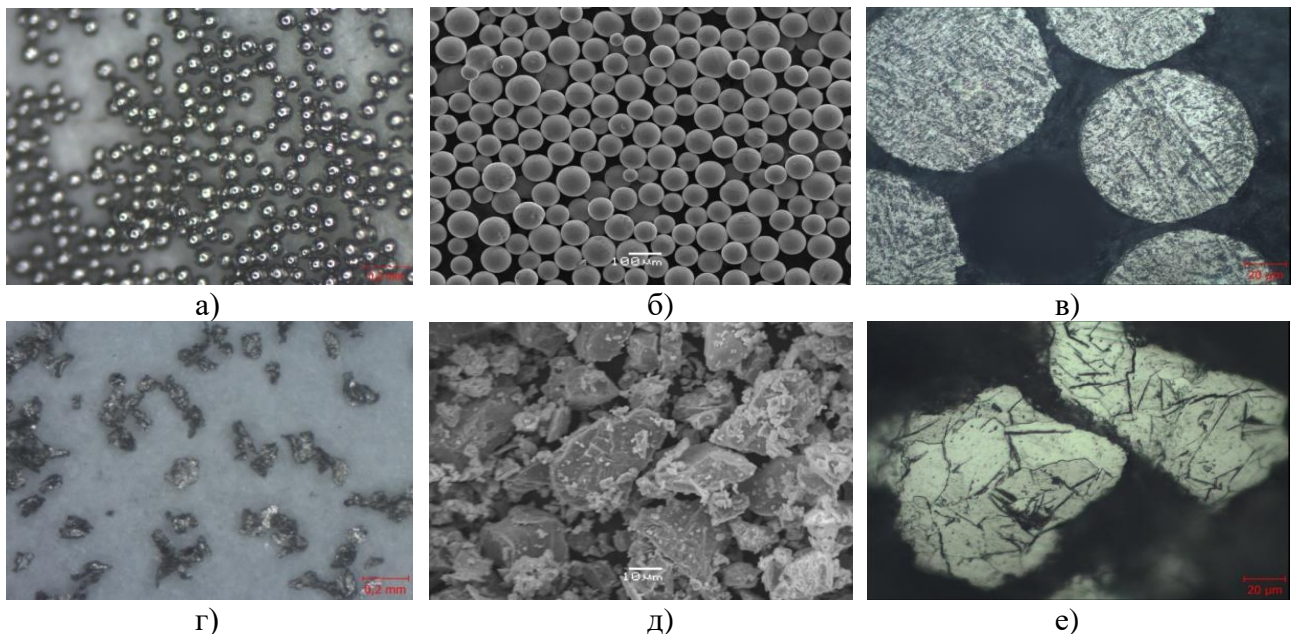


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд і структура сферичних (а, б, в) і несферичних (г, д, е) порошків титану (фракція – 100 мкм)

Питання про характер сполучення частинок на контактних поверхнях (точках і лініях у плоских моделях) можна приблизно розв'язати за допомогою прогону голівки профілометра-профілографа уздовж і впоперек насипаних і закріплених із підкладкою порошкових шарів

Машинобудування і зварювальне виробництво

мінімальної товщини (одинарної укладки), тобто шарів, що мають мінімальну висоту. Для отримання зазначених об'єктів дослідження нами були використані скляні плоскі зразки, вкриті тонким шаром малов'язкої клейової основи. Попередні графічні результати експериментів із використанням зазначеного приладу наведено на рис. 2.

Вони свідчать про те, що у випадку порошоків різних фракцій "найбільш гладка" зовнішня поверхня отримується за умови використання порошкового матеріалу, в якому частинки мають форму багатогранників, умовно прийнятих за об'єкти, які за формою наближаються до частинок, у вигляді гексаєдрів та їхніх різновидів.

Це свідчить про те, що орієнтація на використання порошоків такого типу забезпечить, за умови використання адитивних технологій, достатнє і краще, у порівнянні із порошковими матеріалами зі сферичною формою частинок, вихідне ущільнення, що має сприяти отриманню щільніших та однорідніших шарів 3D зразків під час їх формування шляхом пошарового спікання або сплавлення [6, 7, 12].

На наведеній нижче (рис. 3) мікрофотографії багат шарового зразка з нелегованого титану (отриманого сплавленням за технологією електронно-променевого сплавлення) показано досить хороший рівень адгезії шарів без будь-яких видимих дефектів, типу несущільностей (раковин або непроплавів).

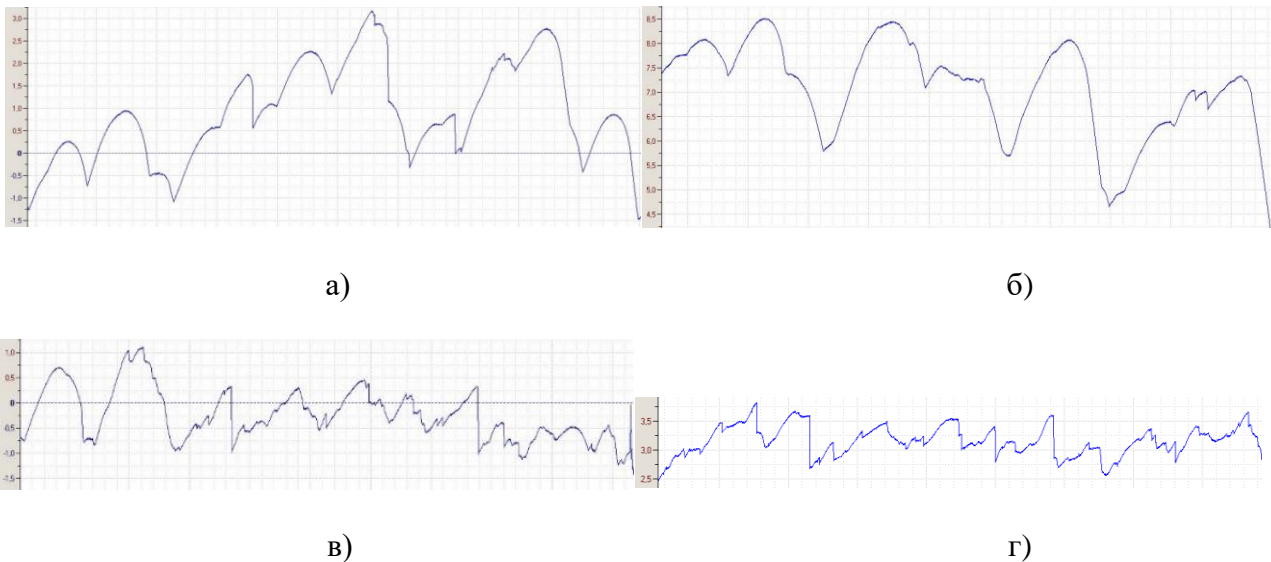


Рисунок 2 – Результати дослідження порошоків на профілометрі-профілографі:
 а, б) сферичний порошок фракцією -200+100 мкм; в) несферичний порошок фракцією - 250+100 мкм; г) несферичний порошок фракцією -50 мкм.

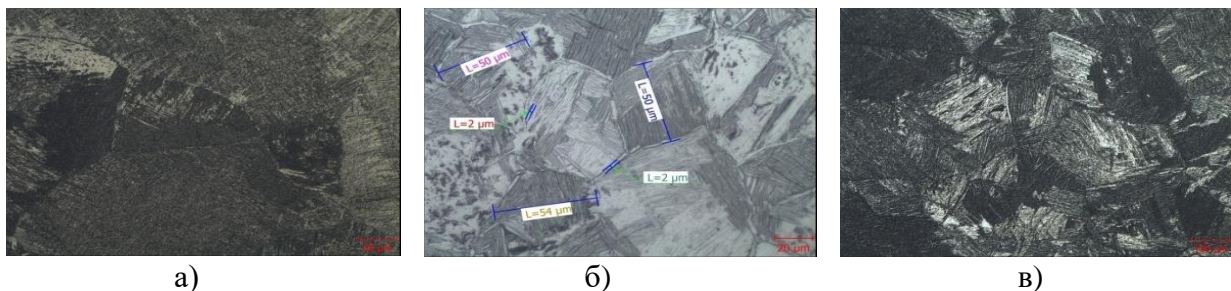


Рисунок 3 – Мікроструктура дослідних зразків отриманих за технологією пошарового нарощування з титанового порошку (фракція -250+100 мкм): а) метод електронно-променевого наплавлення б, в) метод аргонодугового наплавлення

Наплавлення порошку за хімічним складом, що відповідає марці сплаву ВТ1-0, здійснювали методом ЕПН (електронно-променевого наплавлення) на установці ЕПЗ-20, з попереднім насипанням порошку. Швидкість наплавлення становила 1,11 мм/с; струм наплавлення 40...50 мА; струм фокусування 605...610 мА. Аргонодугове наплавлення проводили вручну з пошаровим насипанням і оплавленням порошку в камері з контрольованим середовищем (інертний газ – аргон). Режим наплавлення був приблизно однаковий для всіх зразків (зварювальний струм до 30 А, джерело струму Fronius TT3000).

ВИСНОВКИ

З наведених вище рисунків видно, що отриманий (сплавлений) шар матеріалу характеризується наявністю рівновісної, однорідної, щільної та безпористої структури без будь-яких видимих дефектів (у вигляді несущільностей або пор). При цьому, структура дослідних зразків наближена до структури заготовок, отриманих методами лиття. Таким чином, можна констатувати, що відносно дешевий порошок, отриманий за технологією гідрування-дегідрування, є перспективним з погляду заміни наявних дорогих порошків титану сферичної форми.

Список використаних джерел

1. Джуган А. А. Получение качественных порошковых материалов с несферической формой частиц из деформированных заготовок / А.А. Джуган, В.Е. Ольшанецкий, А.В. Овчинников // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2018. – №2. – С. 114 – 116.
2. Джуган А.А. Аддитивные технологии и возможности их применения в современных условиях / А.А. Джуган, А.В. Овчинников, В.Е. Ольшанецкий // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2014. – №2. – С. 96 – 101.
3. Балака Е.В. Основные факторы влияния на процесс формообразования деталей с помощью технологий послойного выращивания (rapid prototyping) / Е.В. Балака // Високі технології в машинобудуванні. – 2011. – №1. – С. 29 – 36.
4. Волхонский А.Е. Методы изготовления прототипов и деталей агрегатов различных изделий промышленности с помощью аддитивных технологий / А.Е. Волхонский, К.В. Дудков // Образовательные технологии. – 2014. – №1. – С. 127 – 143.
5. Bin Xiao Partial melting and resolidification of metal powder in selective laser sintering / Bin Xiao and Yuwen Zhang // Journal of thermophysics and heat transfer. – 2006. – Vol. 20, No. 3. – p. 439 – 448.
6. Овчинников А.В. Моделирование процесса 3-d печати с использованием несферических гидрированных-дегидрированных порошков титана / А.В. Овчинников, А.А. Джуган, А.В. Шевченко, [и др.] // Стародубовские чтения. Сборник трудов. – 2015. С. 222 – 228.
7. Овчинников А.В. Применение несферических гидрированных и дегидрированных порошков титана для получения изделий в аддитивных технологиях / А.В. Овчинников, В.Е. Ольшанецкий, А.А. Джуган // Вестник двигателестроения. – 2015. – №1. – С. 114 – 117.
8. Wei-Chin Huang Microstructure-controllable laser additive manufacturing process for metal products / Wei-Chin Huang, Chuan-Sheng Chuang, Ching-Chih Lin // Physics Procedia 8th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering LANE 2014, Vol. 56, 2014, pp 58–63.

9. *Cokmak G.* The processing of Mg-Ti for hydrogen storage; mechanical milling and plasma synthesis / *G. Cokmak, Z. Karoly, I. Mohai, T. Ozturk, J. Szepevolguy* // International journal of hydrogen energy. – 2010. – №35. – p. 118 – 125.
10. *D.D. Gu* Laser Additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms [Electronic resource]: / *D.D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe* / International Materials Reviews 57, 2012, No.3, pp.133–164 ISSN: 0950-6608, Access mode: <http://www.maneyonline.com/doi/full/10.1179/1743280411Y.0000000014>.
11. *Івасишин О.М.* Поверхневі явища при нагріванні порошку гідриду титану / *О.М. Івасишин, О.Б. Бондарчук, М.М. Гуменяк, Д.Г. Саввакін* // Фізика і хімія твердого тіла. — 2011. — Т. 12, №4. — С. 900 — 907.
12. Уплотняемость порошковых материалов с различной формой частиц / *В.Е. Ольшанецкий, А.В. Овчинников, А.А. Джуган* [и др.] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2015. – №1. – С. 130 – 133.
13. *Джуган О.А.* Применение титановых порошков с несферической формой частиц при изготовлении изделий методами 3d печати / *О.А. Джуган, В.Ю. Ольшанецкий* // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2019. – №1. – С. 52 – 55.
14. *Джуган О.А.* Получение качественных порошковых материалов с несферической формой частиц из деформированных заготовок / *О.А. Джуган, В.Ю. Ольшанецкий, О.В. Овчинников* // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2018. – №2. – С.114 – 116.
15. *Джуган О.А.* Использование титановых порошков в методах 3d печати изделий / *О.А. Джуган, В.Ю. Ольшанецкий, О.В. Овчинников, Л.П. Степанова, О.А. Михайлютенко* // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2016. – №2. – С. 77 – 81.
16. *Дурягіна З.А.* Гранулометричні характеристики порошку титанового сплаву ВТ6, отриманого методом відцентрового плазмового розпилення електроду / *З.А. Дурягіна, А.М. Тростянчин, І.А. Лемішка, О.А. Джуган* // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2016. – №2. – С. 26 – 28.

Dzhugan O.A., Olshanetskiy V.E. , Kapustian O.Ye., Bulish S.O.

POSSIBILITY OF USING OF NON-SPHERICAL TITANIUM POWDERS FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES

Additive technology is a promising direction in the development of industries such as the high-precision engineering and Aircraft engine building. At the same time, the high cost of 3D printing process and the lack of alternative (spherical powder) raw materials prevents the wide dissemination of these technologies. In this paper, the possibility of using cheaper powder materials based on titanium, which in terms of chemical composition corresponds to the VT1-0 alloy brand, with particles of non-spherical shape, obtained by hydrogenation-dehydrogenation technology and intended for the three-dimensional products production by various methods of additive technologies is shown. The method of profiling poured and fixed powder layers of minimum thickness using various fractions shows that the optimal external surface is obtained under the condition of using a powder material in which the particles have the shape of polyhedra, conventionally taken as objects that are close to particles in shape, in in the form of hexahedra and their varieties. The use of such powders should provide a denser and more uniform structure compared to spherical powders. The possibility of using different energy sources to build layered material in the formation of products is considered – automatic electron beam welding and manual argon arc welding. The optimal modes of process of step fusing of thin layers of powdered materials are settled. Advantages of offered powders

in comparison with applied today powders of spherical shape are described. The results of metallographic investigation of samples derived from the experimental powders are presented, which showed a good level of layer adhesion without visible discontinuities.

Keywords: additive technologies; titanium; powder; particles; shape; fractions; surface; layer; compaction; fusion; structure; properties.

Стаття надійшла 25.04.2024 р.

УДК 621.791.753.042

doi.org/10.31498/2522-9990272024303159

Щетинін С.В., Щетиніна В.І., Воленко І.В.

PROCESS OF ARGON-ARC SURFACING OF BLAST FURNACE CHARGING APPARATUS AT LOW POWER CONSUMPTION

The feeding apparatus, which ensures the loading of charge materials into the blast furnace, operates under high specific dynamic loads caused by ore, coke, sinter, abrasive and gas-abrasive wear, high temperatures and aggressive environments. Increasing the wear resistance of charging machines reduces production costs, improves the quality of pig iron and increases the efficiency of metallurgical production. Therefore, increasing the crack resistance and wear resistance of backfill machines is an important scientific and technical problem.

Keywords: filling apparatus, argon arc surfacing, influence of arc concentration, microstructure grinding.

Problem statement. The cone of the backfill machine is made of steel 30L. However, the operating conditions, under the influence of abrasive and gas-abrasive wear, require that the hardness of the deposited metal should be at least 55 HRC, which is ensured by a high carbon content of 5.5%, chromium 20.2% and the formation of chromium carbides. Cracks are allowed when surfacing the protective surface of a cone with a width of no more than 1.5 mm and a contact surface of no more than 0.3 mm. Therefore, the study of the crack formation mechanism and the development of a high-speed surfacing process at low power consumption, which ensures an increase in crack resistance and wear resistance of blast furnace charging apparatus, is an important scientific and technical problem.

It is well known that the susceptibility to cracking increases with increasing carbon content. An effective way to increase crack resistance is high-speed surfacing at low power consumption, which reduces welding stresses, grinds the microstructure and increases interatomic bonds, the nature of which is electromagnetic.

Analysis of recent research and publications. The influence of arc concentration, energy, speed and surfacing energy on the crack resistance and wear resistance of the deposited metal under conditions of abrasive and gas-abrasive wear has been insufficiently studied [1-11].

The object of the study. To develop a process of argon-arc high-speed surfacing at low power consumption of blast furnace charging apparatus with high-carbon chromium cored wire.

The main material of the study. The automatic welding process is a nanoprocess, as the current flowing through the electrode creates a strong magnetic field and a pinch effect, i.e. compression under the influence of its own magnetic field. The pinch effect causes a chain reaction - the compression of the cathode spot under the influence of its own magnetic field reduces the spot diameter, which strengthens the magnetic field, which leads to a reduction in the spot diameter. The process continues until the arc breaks. The arc is re-excited at the point where the distance between the electrodes is smallest, according to the law of least resistance.