

О. В. ЛЯШКО

аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0007-5918-3832

В. М. ЛАЗОРИК

аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-2244-6815

І. А. СЕЛІВЕРСТОВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0009-6135-8165

МЕХАНОХІМІЧНЕ ЛЕГУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ ПОРОШКІВ AL-SI-BN ДЛЯ НАНЕСЕННЯ УЩІЛЬНЮЮЧИХ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ

В роботі синтезовано порошки методом механохімічного легування алюмінію за хімічним складом, аналогічним композиційному порошку Oerlikon Metco (Metco 320NS). В основі композиційного порошку використовували промислові алюмінієві порошки двох типів, які отримують пульверизацією розплаву первинного алюмінію, з округлою та витягнутою формою.

Метою цього дослідження є отримання механохімічного легованого порошку Al за допомогою планетарного шарового кульового млина зі складом кремнію (8 %), нітриду бору (20 %) для отримання порошкових покриттів, нанесених методом плазмового напилення. Було оцінено вплив способу обробки порошку на хімічний склад, морфологію порошку та мікротвердість покриття. Характеристики порошків досягали шляхом їх змішування в кульовому млині протягом 2 годин у спиртовому середовищі. Обов'язковою умовою легування було використання герметичних барабанів, які обладнані патрубками подачі інертного газу. Легування проводилося в середовищі аргону для запобігання натікання вологи та кисню на активу поверхню порошків. Після легування порошки також демонтувались з барабану в захисному середовищі, для уникнення окиснення. Співвідношення маси кульок : маса порошку = 5 : 1–10 : 1, а діаметр сталевих кульок: 8–12 мм. Для підготовки гранул до плазмового напилення до отриманої суміші додавали 5 % бензиновий розчин синтетичного каучуку. Після змішування з пластифікатором суміш гранулювали шляхом протирання через сито з розміром комірок 50 мкм. Гранульовані порошки з метою видалення залишкової вологи сушили у вакуумній сушильній шафі за температури 70 °C протягом 3 год. Осадження композиційного порошку Al-Si-BN методом плазмового напилення було досягнуто за допомогою режиму генерації ламінарного плазмового струменя, що сприяло зменшенню окислення частинок порошку під час польоту. Сформовані покриття мали товщину до 500 мкм та мікротвердість 0,3 до 0,41 ГПа.

Ключові слова: ущільнюючі покриття, плазмове напилення, композитні порошки механохімічне легування.

O. V. LIASHKO

Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics, and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0007-5918-3832

V. M. LAZORYK

Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics, and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0003-2244-6815

I. A. SIELIVERSTOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation, Robotics, and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0009-6135-8165

MECHANOCHEMICAL ALLOYING OF AL-SI-HBN COMPOSITE POWDERS FOR APPLICATION OF SEALING PLASMA COATINGS

In this study, powders were synthesized by the method of mechanochemical alloying of aluminum with a chemical composition similar to that of the Oerlikon Metco composite powder (Metco 320NS). The composite powder was based on two types of industrial aluminum powders obtained by atomization of molten primary aluminum, differing in their morphology – spherical and elongated.

The aim of this study was to produce mechanochemical alloyed Al powder using a planetary ball mill with a composition of silicon (8 %), boron nitride (20 %) for the production of powder coatings applied by plasma spraying. The effect of the powder processing method on the chemical composition, powder morphology, and coating microhardness was evaluated. The characteristics of the powders were achieved by mixing them in a ball mill for 2 hours in an alcohol environment. A prerequisite for alloying was the use of sealed drums equipped with inert gas supply nozzles. The alloying was carried out in an argon environment to prevent moisture and oxygen from entering the active surface of the powders. After alloying, the powders were also removed from the drum in a protective environment to avoid oxidation. The ratio of mass of ball: mass of powder = 5 : 1–10 : 1, and the diameter of steel balls: 8–12 mm. To prepare the pellets for plasma sputtering, a 5 % gasoline solution of synthetic rubber was added to the resulting mixture. After mixing with the plasticizer, the mixture was granulated by rubbing it through a sieve with a 50 μm mesh. To remove residual moisture, the granular powders were dried in a vacuum drying oven at 70 $^{\circ}\text{C}$ for 3 h. The deposition of the Al-Si-BN composite powder by plasma spraying was achieved by using the laminar plasma jet generation mode, which helped to reduce the oxidation of powder particles during flight. The formed coatings had a thickness of up to 500 μm and a microhardness of 0.3 to 0.41 GPa.

Key words: sealing coatings, plasma spraying, composite powders, mechanochemical alloying.

Постановка проблеми

Розвиток авіаційного двигунобудування тісно пов'язаний із розв'язанням завдань щодо підвищення довговічності та продуктивності газотурбінних установок. Значною мірою вирішення цих завдань залежить від удосконалення систем герметизації турбомашин, де застосування спеціальних ущільнюючих покриттів дає змогу істотно знизити енергетичні втрати та підвищити ефективність роботи двигуна, що має вирішальне значення для авіаційної галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для створення ущільнювальних покриттів методом газотермічного напилення застосовують композиційні порошки, склад яких базується на концепції «метал – тверде мастило». Як металеві складові зазвичай використовуються нікель, сплави Ni та Co, а також AlSi, тоді як роль твердих мастил виконують графіт, гексагональний нітрид бору, бентоніт і поліестер. Саме поєднання цих компонентів визначає робочий температурний діапазон і відповідність умовам експлуатації турбін [1].

Для середньотемпературних ущільнювальних покриттів досить поширеними є такі композиції: алюміній з полімером, алюміній з нітридом бору, а також алюміній-бронза з полімерними порошками, зокрема Metco 601N або комбінація Al-бронза + поліестер (Metco 610NS). Інший підхід передбачає використання системи Al-Si з hBN, де наявність керамічної фази підвищує змащувальні властивості й термостійкість покриття (Metco 320NS) [2].

Методи механохімічного легування синтезу, такі як обробка в кульовому млині, розвинулись від лабораторного до промислового застосування [3]. Загалом, механохімія стає методом екологічно чистої технології, оскільки вона дозволяє уникнути використання (шкідливих) розчинників [4]. Крім того, механохімічні методи без розчинників особливо підходять для синтезу сплавів з високою ентропією, тобто матеріалів, що містять п'ять або більше елементів, оскільки це обходить проблеми розчинності. Тому механохімічний синтез ідеально підходить як метод скринінгу для нових, складних матеріалів [5]. Було встановлено, що механохімічне кульова обробка є простим шляхом твердотілого синтезу для створення легованих композиційних порошків. Так в роботі досліджено фізико-хімічні процеси, що відбуваються при формуванні частинок інтерметалідів заліза на основі Fe_3Al , легованих Cr, Zr, Mg, La та Ti, в умовах механохімічного синтезу. Встановлено, що процес синтезу легованих порошків протікає через низку послідовних стадій з формуванням твердих розчинів і завершується утворенням однофазних продуктів $\text{Fe}_3\text{Al}(\text{Cr}, \text{Zr})$, $\text{Fe}_3\text{Al}(\text{Mg})$, $\text{Fe}_3\text{Al}(\text{Mg}, \text{La})$ та $(\text{Fe}, \text{Ti})_3\text{Al}$ з нанодисперсною структурою. Порошки призначені для нанесення методами газотермічного напилення та електродугової металізації жаростійких FeAl-покриттів.

Формулювання мети дослідження

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить, що більшість композиційних порошків для газотермічного нанесення отримують енергоємними методами, зокрема за допомогою гідрометалургійного автоклавного процесу, отже пошук інших технологій для виробництва композиційних порошків є актуальною задачею.

Однією з таких технологій є технологія механохімічного легування композитних порошків для нанесення ущільнюючих плазмових покриттів.

Тому метою даної роботи є розробка енергозберігаючого методу механохімічного легування композиційного порошку, аналогу Metco 320NS для отримання ущільнюючих плазмових покриттів із необхідним комплексом властивостей для робочих поверхонь газотурбінних двигунів.

Викладення основного матеріалу дослідження

В якості основи композиційного порошку використовували промислові алюмінієві порошки двох типів, які отримують пульверизацією розплаву первинного алюмінію (чистота 99,8 %). Тип I має більш округлу форму близьку до сферичної з розміром $-150 + 100$ мкм. Частинки порошку типу II мають витягнуту довгасту форму, у деяких частинках відношення довжини до поперечного розміру більше п'яти. Для легуючих елементів застосовувались порошки Si ($\sim 1-5$ мкм, чистота 97,5 %) та h-BN ($\sim 0,5-1$ мкм, чистота 99,8 %).

Суміш порошків піддавалась механохімічній обробці у планетарному млині марки XQM – 2, загальний вид якого наведено на рис. 1.

Принцип роботи полягає в обертанні 4 барабанів відносно центральної осі і навколо власної осі в протилежну сторону обертання ротора млина. Барабани планетарного млина обертаються навколо власних осей і навколо осі «переносного обертання». При збільшенні швидкості подрібнення в розмельних барабанах збільшується відцентрова сила. Це досягається завдяки використанню спеціального планетарного редуктора, що забезпечує барабанам це специфічне обертання. Така схема дозволяє створювати перевантаження в десятки G, багаторазово збільшуючи ефективність подрібнювального устаткування і знижуючи енерговитрати на процес помелу.



Рис. 1. Загальний вигляд планетарного кульового млину XQM–2

Обов'язковою умовою легування було використання герметичних барабанів, які обладнані патрубками подачі інертного газу. Попередньо з барабані відкачували повітря до тиску 1Па, а потім напускався аргон для запобігання натікання вологи та кисню на активу поверхню порошків. Після легування порошки також демонтуються з барабану в захисному середовищі, для уникнення окиснення. Співвідношення маси кульок : маса порошку = 5:1 – 10:1. Діаметр кульок: 8–12 мм (сталеві). Для інтенсифікації процесів легування та підвищення рівномірності розподілу легуючих елементів в алюмінієвій матриці в процес проводили в середовищі спирту.

Для підвищення ефективності легування ємкості завантажували кулі різного розміру, кулі $\varnothing 12$ мм – 40 шт.; кулі $\varnothing 10$ мм – 50 шт.; кулі $\varnothing 8$ – мм 60 шт. Експериментально встановлено, що при частоті обертання ємностей 200 об/хв відбувається формування порошкової суміші з необхідними гранулометричним складом.. Для підготовки гранул до плазмового наплення до отриманої суміші додавали 5 % бензиновий розчин синтетичного каучуку. Після змішування з пластифікатором суміш гранулювали шляхом протирання через сито з розміром вічок 50 мкм. Гранульовані порошки з метою видалення залишкової вологи сушили у вакуумній сушильній шафі за температури 70 °C протягом 3 год.

Наплення порошку здійснювалося плазмовим методом в режимі генерації ламінарного плазмового струменя, що сприяло зменшенню окислення частинок порошку під час польоту. Ламінарна течія плазмового струменя забезпечувалася спеціально розробленою конструкцією електродугового плазмотрона, рис. 2 і технологічними режимами наплення.

У цьому плазмотроні, завдяки окремо виготовленому анодному блоку, дуга не стискалася, а плазмовий струмінь формувався шляхом обдування концентричними потоками обтискного і захисного газу аргону. Струм дуги встановлювався в межах 80–90 А, при напрузі 30–35 В, витрата порошку становила 4 кг/год при сумарній витраті

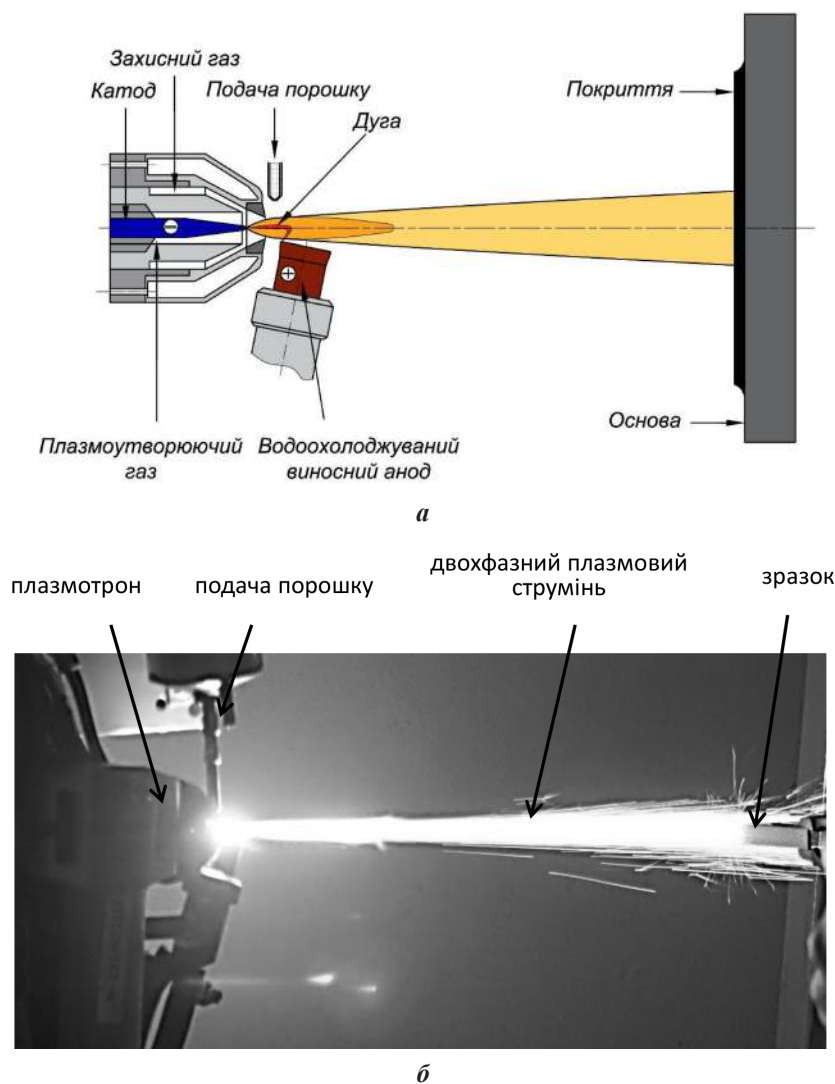


Рис. 2. Схема (а) і загальний вигляд (б) плазмового наплення ламінарним плазмовим струменем

плазмоутворюючого, транспортуючого і захисного газу (аргону) 5 л/хв. Завдяки таким конструктивним особливостям і технологічним режимам характер течії плазмового струменя був близький до ламінарного з числом Рейнольдса $Re \approx 300$, що забезпечувало захист компонентів порошку від окислення і сприятливі умови для формування покриття.

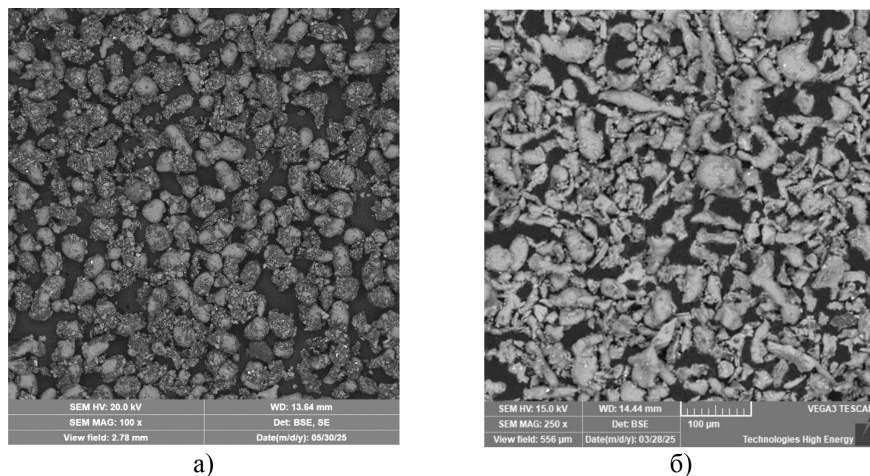


Рис. 3. Морфологія поверхні механіко-хімічно легованих алюмінієвих порошків: а) тип І; б) тип ІІ

Підкладки для напilenня були виготовлені з низьковуглецевої сталі, режим термообробки – відпуск, температура (840 ± 10) °C, охолодження на повітрі.

Характеристики порошків вимірювали за допомогою металографічного аналізу. Визначення хімічного складу покриттів, розподіл елементів і електронні знімки топографії поверхні здійснювали за допомогою скануючого електронного мікроскопа VEGA3 TESCAN. Мікротвердість покриттів визначали за Віккерсом, навантаження 0,548Н.

На рис. 3 показано морфологію поверхні порошків після механохімічного легування, структура і форма порошку алюмінію не зазнала суттєвих перетворень, на відміну від поверхні, яка щільно вкрита легуючими елементами.

Результатами енергодисперсійної спектроскопії показують (табл. 1, 2) що, елементний склад отриманих порошків приблизно відповідає необхідному хімічному складу заявленої композиції (Al-, Si – 8 %, hBN – 20 %), як для порошків I і II типу. Склад визначали тільки по основним елементам (алюмінію, кремнію та кисню). Процес визначення кисню був напрямлений для встановлення міри окислення порошків в ході механохімічного легування, слід зазначити, в порошках типу II, підвищений вміст кисню може бути обумовлений менш компактною формою і більш розвиненою по верхнюю. Також в порошках присутня незначна кількість магнію 0,34...0,44 %мас. (0,34...0,48 %atom.) та заліза 0,22...0,92 %мас. (0,1...0,41 %atom.), які потрапили до порошків разом з лігатурою.

Таблиця 1

Хімічний склад порошків типу I

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [1 sigma]	rel. error [2 sigma]
O	8	888	0.98	0.92	1.45	1.17	23.56
Mg	12	982	0.56	0.44	0.48	0.07	12.92
Al	13	213922	117.09	92.14	89.89	5.62	4.80
Si	14	3634	8.17	6.28	8.08	0.23	5.61
Fe	26	160	0.28	0.22	0.10	0.07	24.50
		Sum	127.09	100.00	100.00		

Таблиця 2

Хімічний склад порошків типу II

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm [%]	Atom [%]	abs. error [1 sigma]	rel. error [2 sigma]
O	8	3707	4.02	3.10	5.42	2.40	17.13
Mg	12	629	0.36	0.34	0.34	0.06	17.26
Al	13	154507	90.97	85.64	84.94	3.90	4.82
Si	14	11470	10.70	10.00	8.88	0.51	4.74
Fe	26	534	0.99	0.92	0.41	0.10	9.84
		Sum	107.04	100.00	100.00		

Після нанесення покриттів були проведені дослідження хімічного складу, пористості і твердості на перерізах покриттів (рис. 4).

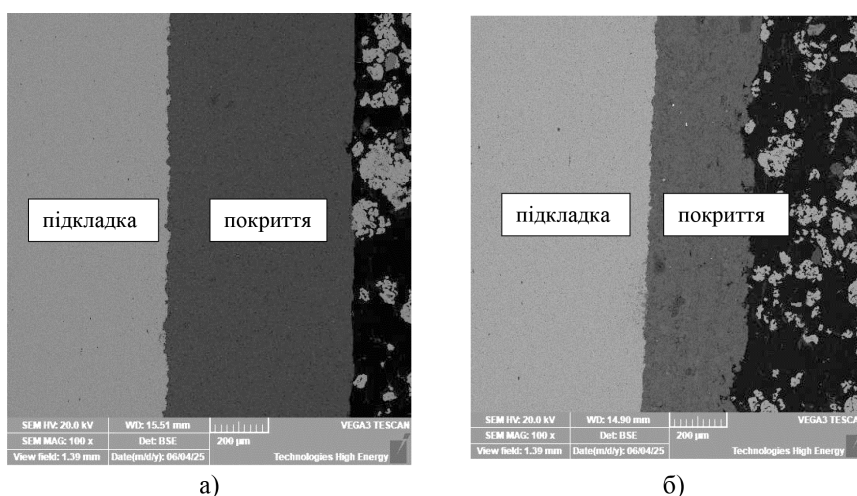


Рис. 4. Поперечні перерізи покриттів, виготовлених з порошків механіко-хімічного сплаву на сталевій основі: а) тип I; б) тип II

Товщина покриття І типу складає 500 ± 50 мкм (рис. 4, а), товщина покриття ІІ складає 300 ± 50 мкм, що обумовлено гіршими характеристиками дозування порошку в плазмотроні і коефіцієнтом використання матеріалу (рис. 4, б).

Суттєво в покриттях відрізняються значення пористості і мікротвердості, що вимірювалося від поверхні до підкладки. В покритті з порошку І типу пористість складає 2,8 % (рис. 5, а), а середнє значення мікротвердості 0,3 ГПа (рис. 7, а), в покритті з порошку ІІ типу спостерігається зворотна залежність пористості дорівнює 9,5 % (рис. 6, а) середнє значення мікротвердості 0,41 ГПа, (рис. 7, б). Високі значення твердості покриттів з порошку ІІ типу, обумовлене більш високою концентрацією оксидів, насамперед алюмінію.

Висновки

В роботі був синтезований порошок зі складом 8 % Si, 20 % Nb решта Al, що відповідає відомим аналогам для застосування для плазмового напилення ущільнюючих покриттів. Порошок був синтезований методом механохімічного легування в планетарному шаровому млині. В якості вихідного використовувався алюмінієвий порошок двох типів, округлої форми (І тип) і витягнутої (довгастої) форми (ІІ тип). Отримані порошки були напилені плазмовим (APS) методом на низьковуглецеву сталеву підкладку.

В результаті дослідження хімічного складу порошків було встановлено відповідність легуючих елементів, щодо існуючого композиційного порошку компанії Oerlikon Metco (Metco 320NS).

Таким чином, на основі отриманих даних з хімічного складу порошків і властивостей покриттів можна рекомендувати такі покриття для застосування в якості ущільнюючих для корпусів газотурбінних авіаційних двигунів. Більш конкретні рекомендації можна буде надати після проведення експлуатаційних випробувань отриманих покриттів на газо-абразивну та ерозійну стійкість.

Список використаної літератури

1. Wilson S. (2012). Overview of Sulzer Metco Thermally sprayed abrasible coating technology for sealing in gas turbines. Proceedings of the 6th International Conference (Belgium, Brussels, October 17 – 18, 2012).
2. Metco O. (2015) Thermal Spray Materials Guide.
3. Colacino E., Isoni, V., Crawford, D., Garcia, F. (2021) Upscaling Mechanochemistry: Challenges and Opportunities for Sustainable Industry. *Trends in Chemistry (electronic journal)* vol. 3 no. 5, pp. 335–339. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.trechm.2021.02.008>
4. Friščić, T. (2010) New Opportunities for Materials Synthesis Using Mechanochemistry. *Journal of Materials Chemistry (electronic journal)* vol. 20 no. 36, pp. 7599–7605. Retrieved from: <https://doi.org/10.1039/c0jm00872a>
5. Szymanski, N. J., Rendy, B., Fei, Y., Kumar, R. E., He, T., Milsted, D., McDermott, M. J., Gallant, M., Cubuk, E. D., Merchant, A., Kim, H., Jain, A., Bartel, C. J., Persson, K., Zeng, Y., Ceder, G. (2023) An Autonomous Laboratory for the Accelerated Synthesis of Novel Materials. *Nature (electronic journal)* vol. 624 no. 7990, pp. 86–91. Retrieved from: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06734-w>
6. Borisov Yu. S., Borisova A. L., Burlachenko A. N., Tsymbalistaya T. V., Senderowski C. (2017) Structure and Properties of Alloyed Powders Based on Fe₃Al Intermetallic for Thermal Spraying Produced Using Mechanochemical Synthesis Method. *The Paton Welding Journal*, no. 9, pp. 33–39. doi.org/10.15407/tpwj2017.09.06

References

1. Wilson S. (2012). Overview of Sulzer Metco Thermally sprayed abrasible coating technology for sealing in gas turbines. Proceedings of the 6th International Conference (Belgium, Brussels, October 17–18, 2012).
2. Metco O. (2015) Thermal Spray Materials Guide.
3. Colacino E., Isoni, V., Crawford, D., Garcia, F. (2021) Upscaling Mechanochemistry: Challenges and Opportunities for Sustainable Industry. *Trends in Chemistry (electronic journal)* vol. 3 no. 5, pp. 335–339. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.trechm.2021.02.008>
4. Friščić, T. (2010) New Opportunities for Materials Synthesis Using Mechanochemistry. *Journal of Materials Chemistry (electronic journal)* vol. 20 no. 36, pp. 7599–7605. Retrieved from: <https://doi.org/10.1039/c0jm00872a>
5. Szymanski, N. J., Rendy, B., Fei, Y., Kumar, R. E., He, T., Milsted, D., McDermott, M. J., Gallant, M., Cubuk, E. D., Merchant, A., Kim, H., Jain, A., Bartel, C. J., Persson, K., Zeng, Y., Ceder, G. (2023) An Autonomous Laboratory for the Accelerated Synthesis of Novel Materials. *Nature (electronic journal)* vol. 624 no. 7990, pp. 86–91. Retrieved from: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06734-w>
6. Borisov Yu. S., Borisova A. L., Burlachenko A. N., Tsymbalistaya T. V., Senderowski C. (2017) Structure and Properties of Alloyed Powders Based on Fe₃Al Intermetallic for Thermal Spraying Produced Using Mechanochemical Synthesis Method. *The Paton Welding Journal*, no. 9, pp. 33–39. doi.org/10.15407/tpwj2017.09.06

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 20.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025