

Влияние механических и электрических параметров на энергоэффективность получения порошка методом электроэрозионного диспергирования лома WC–Co- и WC–TiC–Co-сплавов

© М.И. Дворник, Е.А. Михайленко, Н.М. Власова

Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения РАН,
680042 Хабаровск, Россия
e-mail: mea80@list.ru

Поступило в Редакцию 20 марта 2023 г.

В окончательной редакции 31 июля 2023 г.

Принято к публикации 4 августа 2023 г.

Исследовано влияние энергии разряда, состава сплава и жидкости на энергозатраты и производительность переработки твердых сплавов WC–Co и WC–TiC–Co методом электроэрозионного диспергирования. Приведена эмпирическая модель, описывающая зависимость частоты разрядов, производительности процесса и удельных энергозатрат от энергии разряда, амплитуды встряхивателя и свойств жидкости. Показано, что при определенных условиях удельные энергозатраты на переработку 1 kg сплава WC–Co или WC–TiC–Co можно снизить до 3.3–4.5 kW · h.

Ключевые слова: ультрадисперсный порошок, энергозатраты, производительность, карбид вольфрама.

DOI: 10.61011/JTF.2023.10.56289.46-23

Введение

Получение ультрамелкозернистых твердых сплавов WC–TiC–Co и WC–Co с высокой твердостью и износостойкостью из ультрадисперсных порошков является актуальной задачей [1–3]. Значительная часть твердых сплавов производится из порошков, полученных в результате их переработки [4]. Электроэрозионное диспергирование (ЭЭД) является прямым методом переработки и получения ультрадисперсных порошков без использования опасных и дорогостоящих реагентов [5–12]. Метод основан на образовании частиц под действием искрового разряда в диэлектрической жидкости. При искровом разряде поверхность электродов нагревается до 10^4 К, что приводит к плавлению и кипению исходного материала. Расплав и пары выбрасываются в межэлектродный промежуток, быстро (10^6 – 10^9 К/с) охлаждаются, образуя наноразмерные и ультрамелкозернистые частицы, пригодные для производства сплава повышенной твердости [5]. Энергозатраты метода высокие, производительность небольшая из-за малой энергии разряда (< 1 J) и наличия всего двух электродов. Использование специальных установок для ЭЭД, различных жидкостей и высокоэнергетических импульсов (до 6 J) повышает производительность и снижает энергозатраты.

Целью настоящей работы является изучение влияния энергии разряда, частоты импульсов напряжения, свойств жидкости на частоту разряда, производительность, энергозатраты при ЭЭД твердых сплавов WC–Co и WC–TiC–Co в специальной установке при высокой энергии разряда (> 1 J).

1. Методика

Исходным материалом для ЭЭД были образцы среднезернистых твердых сплавов WC–8Co, WC–16Co, WC–5TiC–10Co ($5.25 \times 6.5 \times 20$ mm) производства компании КЗТС. ЭЭД выполняли в специальной установке [5] в шести различных режимах при напряжении холостого хода 80, 120, 165, 205, 250 и 300 V. Напряжение и ток в разрядах, длительность импульса, частоту импульсов напряжения и импульсов тока рассчитывали на основе вольт-амперных характеристик, которые измерялись с помощью аналого-цифрового модуля. Использовали дистиллированную воду и трансформаторное масло ГК-1. После ЭЭД электроды взвешивали на весах Mettler Toledo MI-54 для определения массы полученных порошков. Порошки сушили при 600°C в вакуумной печи. Морфологию порошка исследовали на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega.

2. Результаты и обсуждения

Основная часть энергии разряда тратится на нагрев электродов, диэлектрической жидкости и ее пиролиз. Все это относится к потерям [13]. Меньшая часть энергии расходуется на нагрев и плавление материала, из которого образуются частицы. Поверхность кратеров, образовавшихся в воде (рис. 1, *a*) и масле (рис. 1, *b*), состоит из кристаллизовавшегося карбида, оставшегося после удаления расплава. Согласно современной полуэмпирической модели электроэрозионной обработки (ЭЭО) [14–17], производительность порошка за разряд

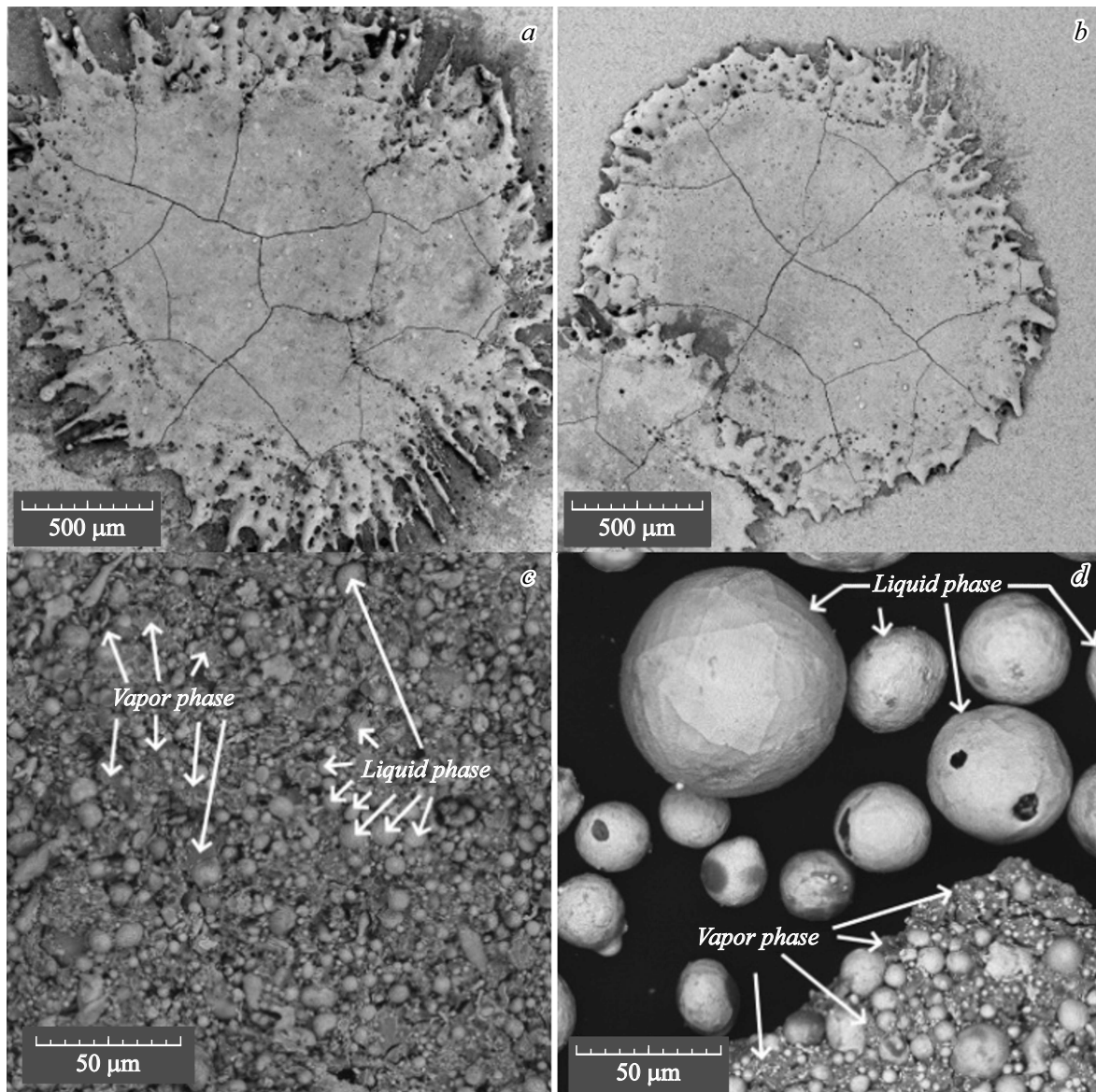


Рис. 1. Кратер после искрового разряда в воде (а) и масле (b) на поверхности анода WC–5TiC–10Co. Морфология порошков, полученных ЭЭД сплава WC–5TiC–10Co в воде при средней энергии разряда 0.34 (c), 1.52 J (d).

(PPD) зависит от энергии разряда (E_d). Мы предполагаем, что производительность порошка за разряд зависит от эффективности теплопередачи от разрядного канала к материалу кратера, теплофизических свойств эродируемых сплавов и потерь энергии при пробое диэлектрика (E_c). Полагая, что эрозия при малой энергии разряда ($E_d \leq E_c$) равна нулю ($PPD \approx 0$), PPD можно представить в виде линейной зависимости от энергии разряда:

$$PPD = \frac{\eta(E_d - E_c)}{L_v + c_p(T_m - T_0)}, \quad (1)$$

где $T_0 = 293$ К — начальная температура. Остальные теплофизические параметры представлены в таблице.

Удельные энергозатраты (SEC) равны

$$SEC = \frac{E_d}{PPD}. \quad (2)$$

В случае ЭЭД в объемном слое каждый импульс напряжения приводит к формированию цепочки разрядов. Тогда производительность (PPR) равна

$$PPR = F_I n PPD, \quad (3)$$

где F_I — частота импульсов тока, $n = 2$ — количество разрядов. Энергия разряда рассчитывается следующим образом:

$$E_d = \int_0^{t_i} \frac{U}{n} I dt, \quad (4)$$

где U — напряжение в разряде, I — ток, t — время.

Теплофизические свойства используемых сплавов и параметры процесса ЭЭД

Параметр	Сплав			
	WC-8Co	WC-15Co	WC-5TiC-10Co	
Удельная теплоемкость (c_p), J/(g·K)	201	218	239	
Температура плавления (T_m), К	3143	3143	3373	
Скрытая теплота плавления (L_v), J/g	430	418	424	
Энергия для нагрева и плавления ($L_v + c_p(T_m - T_0)$), J/g	1009	1094	1166	
Параметр a в уравнении (7)	Вода	0.009	0.007	0.010
	Масло	0.014	0.016	0.0035
Эффективность (η), %	Вода	7.4	7.3	8.7
	Масло	7.4	6.8	9.7
Диэлектрическая прочность (DS), kV/mm	Вода	0.4		
	Масло	2.2		
Минимальные удельные энергозатраты SEC, kW·h	Вода	3.9	4.1	3.7
	Масло	3.4	4.5	3.3

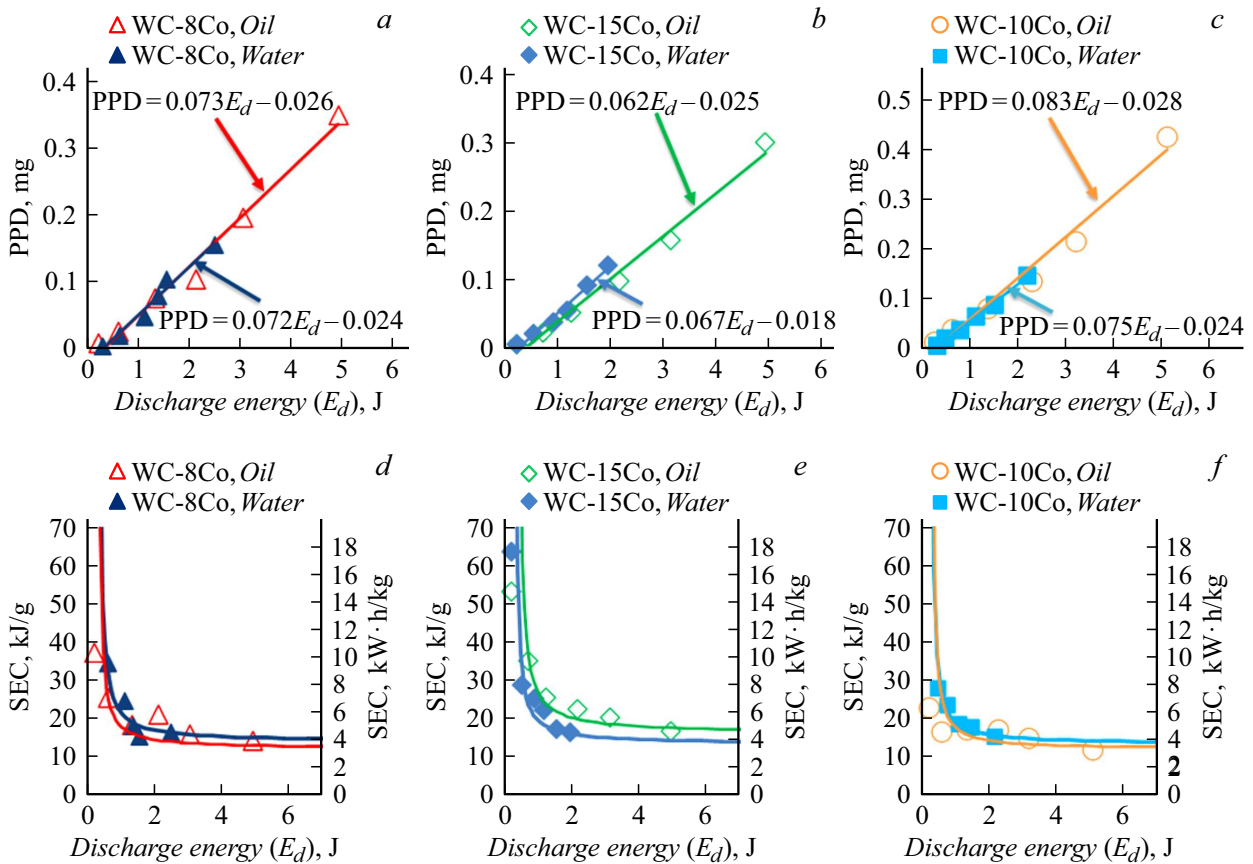


Рис. 2. Зависимости производительности порошка за разряд (PPD) (a-c) и удельных энергозатрат (d-f) от энергии разряда сплавов WC-8Co (a, d), WC-15Co (b, e) и WC-5TiC-Co (c, f).

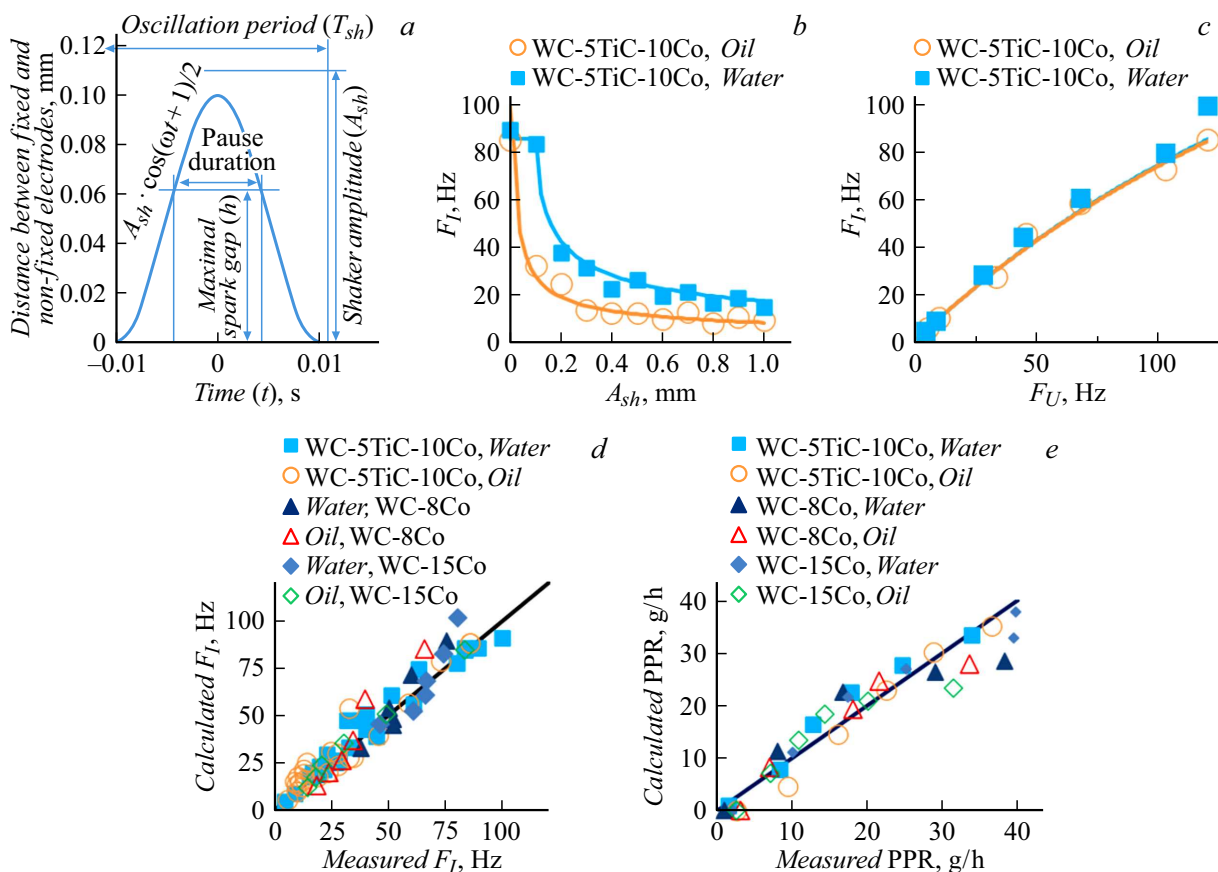


Рис. 3. Расстояние между неподвижным и незакрепленным электродами от времени (a), зависимость частоты импульсов тока от амплитуды встряхивателя (b) и от частоты импульсов напряжения (c), зависимость расчетного значения частоты импульсов (d) и производительности (PPR) (e) от опытных значений.

Полученные порошки состоят из сферических частиц и агломератов наноразмерных частиц (рис. 1, c, d). Сферические частицы, образующиеся кристаллизацией жидкой фазы, состоят из ультрадисперсных карбидов с прослойками кобальта. Агломераты наночастиц образуются кристаллизацией паровой фазы [5,7].

Так как сферические частицы образуются при плавлении карбидного скелета, температуру плавления исходного сплава считаем равной температуре плавления WC для сплавов WC-Co и (Ti,W)C для сплава WC-TiC-Co.

Производительность порошка за разряд при ЭЭД исследуемых сплавов линейно возрастает с увеличением энергии разряда до 5 J (рис. 2, a-c) по модели (1). В отличие от ЭЭО рост производительности порошка за разряд продолжается после увеличения энергии разряда выше 2 J из-за мощности разряда (15–40 kW), в несколько раз превышающей мощность разрядов при ЭЭО [14–17]. Из-за высокой мощности эффективности процесса (7–10%) (см. таблицу) выше, чем при ЭЭО. Зависимость удельных энергозатрат от энергии разряда на основе уравнений (1) и (2) принимает вид гиперболы (рис. 2, d-f). Удельные энергозатраты уменьшаются с уменьшением энергии разряда

из-за уменьшения относительных потерь энергии на начальной стадии разряда.

Производительность порошка за разряд в масле и воде сопоставима. Минимальная производительность и эффективность процесса наблюдаются при ЭЭД сплава WC-15Co, максимальная — при эрозии сплава WC-5TiC-10Co (см. таблицу). Повышение производительности, эффективности процесса и уменьшение удельных энергозатрат происходит при увеличении концентрации WC или (Ti,W)C, препятствующих отводу тепла от поверхности электродов из-за меньшей теплопроводности.

Частота импульсов тока меньше частоты импульсов напряжения, подаваемого генератором, поскольку часть времени свободный электрод находится на расстоянии от закрепленных электродов. Смещение электродов происходит в результате работы встряхивателя, необходимого для очистки зазора от образовавшихся частиц, предотвращения возникновения короткого замыкания и приваривания электродов друг к другу. Вибросито совершает гармонические колебания, описываемые косинусом (рис. 3, a). Разряды происходят только когда расстояние между закрепленными и свободным электродами мень-

ше пробивного промежутка (h):

$$A_{sh} \frac{\cos(\omega t + 1)}{2} < h. \quad (5)$$

Величина пробивного промежутка зависит от напряжения между электродами (U_0/n) и диэлектрической прочности (DS) жидкости:

$$h = \frac{U_0}{DS n}. \quad (6)$$

Частота импульсов тока снижается за счет отбрасывания незакрепленного электрода от закрепленных ударной волной, генерируемой искровым разрядом. Его возврат занимает время T_r , зависящее от расстояния, на которое был перемещен электрод. Расстояние зависит от кинетической энергии ударной волны, на формирование которой затрачивалась определенная часть энергии разряда. В первом приближении время возврата пропорционально энергии разряда:

$$T_r = a E_d, \quad (7)$$

где a — постоянная, зависящая от доли энергии разряда, затрачиваемой на формирование ударной волны, реологических свойств жидкости, массы, плотности и геометрических параметров кусков. Суммируя уравнения (5)–(7), получаем зависимость частоты импульсов тока от частоты импульсов напряжения:

$$F_I = \begin{cases} \frac{1}{\frac{1}{F_U} + T_r} \left(1 - \frac{\arccos\left(\frac{2h}{A_{sh}} - 1\right)}{\pi} \right), & A_{sh} > h, \\ \frac{1}{\frac{1}{F_U} + T_r}, & A_{sh} \leq h. \end{cases} \quad (8)$$

Выведенные уравнения (5) и (7) подробно описывают зависимости частоты импульсов от амплитуды встряхивателя (рис. 3, *b*) и частоты подаваемых импульсов (рис. 3, *c*). Значения диэлектрической прочности для всех жидкостей, полученных подгонкой, оказались на порядок ниже справочных. Вероятно, это связано с загрязнением жидкости образовавшимися частицами и продуктами пиролиза. Как и ожидалось, трансформаторное масло имеет высокую диэлектрическую прочность, а вода — низкую. Увеличение энергии импульса приводит к уменьшению частоты импульсов тока во всех жидкостях. Полученная модель (8) правильно детализирует частоту импульсов тока в установке с различными энергиями разряда, жидкостями и амплитудами (рис. 3, *d*). Значения производительности ЭЭД, рассчитанные по предложенной модели (1), (3), (8), коррелируют с экспериментальными значениями, полученными при разных энергиях разряда для масла и воды (рис. 3, *e*). Максимальная производительность в условиях эксперимента достигается в масле за счет высокого КПД и повышенной частоты импульсов тока.

Заключение

В работе установлены основные зависимости производительности и удельных энергозатрат при получении порошка электроэрозионным диспергированием твердых сплавов WC–8Co, WC–15–Co и WC–5TiC–10Co в специальной установке. Образованные порошки состоят из сферических частиц, полученных кристаллизацией жидкой фазы, и агломератов наноразмерных частиц, полученных кристаллизацией паровой фазы. Производительность процесса зависит от массы порошка, получаемого за один разряд, и от частоты разрядов. Производительность за один разряд линейно возрастает с увеличением энергии разряда, а удельные энергозатраты уменьшаются и стремятся к постоянной величине (3.3–4.5 (kW · h)/kg), равной отношению энергии, необходимой для нагрева и расплавления эродируемого материала, к теплоотдаче. Эффективность теплопередачи (6.8–9.7%) зависит от содержания карбида и свойств жидкости. Увеличение амплитуды встряхивателя снижает частоту разряда за счет увеличения времени нахождения электрода на расстоянии, когда пробой невозможен. С увеличением энергии разряда частота разрядов уменьшается за счет выталкивания электродов ударными волнами, возникающими при прохождении разрядов. Время возврата зависит от реологических свойств используемой жидкости и энергии разряда.

Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках государственного задания ХФИЦ ДВО РАН (075-01108-23-01).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Yu.V. Blagoveshchenskiy, N.V. Isaeva, E.A. Lantsev, M.S. Boldin, V.N. Chuvil'deev, A.V. Nokhrin, A.A. Murashov, P.V. Andreev, K.E. Smetanina, N.V. Malekhonova, A.V. Terentev. *Inorganic Mater. Appl. Res.*, **12**(2), 528 (2021). DOI: 10.1134/s207511332102009x
- [2] M. Tarraste, J. Kübarsepp, A. Mere, K. Juhani, M. Kolnes, M. Viljus. *Solid State Phenomena*, **320**, 176 (2021).
- [3] Y.I. Gordeev, V.B. Yasinski, A.S. Binchurov, N.E. Anistratenko, I.V. Nikolaenko. *Key Eng. Mater.*, **769**, 134 (2018).
- [4] P.K. Katiyar, N.S. Randhawa. *Intern. J. Refractory Metals and Hard Materials*, **90**, 105251 (2020).
- [5] M.I. Dvornik, E.A. Mikhailenko, S.V. Nikolenko. *Powder Technol.*, **383**, 175 (2021). DOI: 10.1016/j.powtec.2021.01.048
- [6] M.R. Shabgard, F. Kabirinia. *Mater. Manufactur. Processes*, **29**(10), 1269 (2014). DOI: 10.1080/10426914.2013.852207
- [7] M. Dvornik, E.A. Mikhailenko. *Solid State Phenomena*, **312**, 297 (2020).

- [8] Y. Liu, X. Li, Y. Li, J. Chen, W. Zhao, F. Bai. *Adv. Powder Technol.*, **27** (6), 2399 (2016). DOI: 10.1016/j.appt.2016.08.016
- [9] J.L. Walter. *Powder Metallurgy*, **31** (4), 267 (1988).
- [10] F. Kabirinia, M. Shabgard, N.S. Tabrizi. *Appl. Phys. A*, **125** (9), 610 (2019).
- [11] M. Kunieda, B. Lauwers, K.P. Rajurkar, B. Schumacher. *CIRP Annals*, **54** (2), 64 (2005).
- [12] Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев, А.А. Калинин. *Чебышевский сборник*, **23** (1(82)), 183 (2022).
- [13] K. Salonitis, A. Stournaras, P. Stavropoulos, G. Chryssolouris. *Intern. J. Adv. Manufactur. Technol.*, **40** (3–4), 316 (2009).
- [14] N. Ben Salah, F. Ghanem, K. Ben Atig. *Intern. J. Machine Tools & Manufacture*, **46** (7–8), 908 (2006). DOI: 10.1016/j.ijmactools.2005.04.022
- [15] T.T. Hong, N.H. Linh, B.T. Danh, L.H. Ky, V.T. Lien, T.N. Giang, V.N. Pi, D.T. Tam. *Mater. Sci. Forum*, **1018**, 91 (2021). DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1018.91
- [16] B. Xie, Z.L. Wang, Y.K. Wang, J.Z. Cui. *Key Eng. Mater.*, **455**, 345 (2011).
- [17] I. Kornev, F. Saprykin, G. Lobanova, V. Ushakov, S. Preis. *J. Electrostat.*, **96**, 111 (2018). DOI: 10.1016/j.elstat.2018.10.008