



УДК 621.762:669.018.8

DOI 10.17073/0368-0797-2023-1-80-85



Оригинальная статья

Original article

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СФЕРИЧЕСКОГО ПОРОШКА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ 03X17N10M2

М. А. Каплан¹✉, А. Д. Горбенко^{1,2}, А. Ю. Иванников¹,
С. В. Конушкин¹, А. В. Михайлова^{1,2}, А. А. Кирсанкин¹,
А. С. Баикин¹, К. В. Сергиенко¹, Е. О. Насакина¹,
А. Г. Колмаков¹, М. А. Севостьянов^{1,2}

¹ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 49)

² Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии (Россия, 143050, Московская область, Одинцовский район, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, владение 5)

✉ mkaplan@imet.ac.ru

Аннотация. В настоящее время порошок со сферическими частицами из коррозионностойких сталей используют в таких распространенных аддитивных методах, как селективное лазерное плавление, селективное лазерное спекание, прямое лазерное спекание, электронно-лучевая плавка и других. Каждый из этих методов предъявляет высокие требования к характеристикам сферических частиц порошка коррозионностойких сталей. Данная работа посвящена получению сферического порошка методом плазменного распыления проволоки диаметром 1 мм из коррозионностойкой стали 03X17N10M2 и исследованию характеристик порошка на пригодность для применения в аддитивных методах. Отработана технология получения сферического порошка и изучена зависимость влияния режимов распыления на выход фракции менее 160 мкм, пригодной для аддитивных методов. С увеличением мощности и расхода газа выход фракции менее 160 мкм увеличивается и достигает более 70 %. Полученный порошок обладает высокой текучестью ($17,6 \pm 1$ с), насыпной плотностью ($4,15 \pm 0,1$ г/см³), плотностью после утряски ($4,36 \pm 0,2$ г/см³) и пригоден для применения в аддитивном производстве. Также изучена зависимость влияния фракции сферического порошка на текучесть, насыпную плотность и плотность после утряски. Наилучшие характеристики получились для фракции –90 мкм: текучесть $16,64 \pm 1$ с, насыпная плотность $4,16 \pm 0,1$ г/см³ и плотность после утряски $4,38 \pm 0,2$ г/см³. Данные показатели соответствуют требованиям, предъявляемым к порошкам, применяемым для аддитивного производства, а именно текучести 50 г порошка менее 30 с и насыпной плотности более 3 г/см³.

Ключевые слова: коррозионностойкая сталь, плазменное диспергирование, сферический порошок, свойства порошков, гранулометрический состав, морфология, текучесть, насыпная плотность

Благодарности: Исследование выполнено в рамках Госзадания № 075-01176-23-00 при поддержке стипендии Президента СП-4955.2022.4.

Для цитирования: Каплан М.А., Горбенко А.Д., Иванников А.Ю., Конушкин С.В., Михайлова А.В., Кирсанкин А.А., Баикин А.С., Сергиенко К.В., Насакина Е.О., Колмаков А.Г., Севостьянов М.А. Исследование характеристик сферического порошка, полученного методом плазменного распыления проволоки из коррозионностойкой стали 03X17N10M2. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023; 66(1): 80–85. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-80-85>

PROPERTIES OF SPHERICAL METAL POWDER MANUFACTURED BY PLASMA SPRAYING OF 03Cr17Ni10Mo2 STAINLESS STEEL WIRE

M. A. Kaplan¹✉, A. D. Gorbenko^{1,2}, A. Yu. Ivannikov¹,
S. V. Konushkin¹, A. V. Mikhailova^{1,2}, A. A. Kirsankin¹,
A. S. Baikin¹, K. V. Sergienko¹, E. O. Nasakina¹,
A. G. Kolmakov¹, M. A. Sevost'yanov^{1,2}

¹ Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences (49 Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation)

² All-Russian Research Institute of Phytopathology (5 Institut Str., Bol'shie Vyazemy Vil., Odintsovo District, Moscow Region 143050, Russian Federation)

✉ mkaplan@imet.ac.ru

Abstract. Stainless steel spherical powders are commonly used as additives in such manufacturing processes as selective laser melting, selective laser sintering, direct laser sintering, electron beam melting, and others. These processes require high-quality spherical powders. The purpose of this study is to develop a manufacturing process for making spherical powder by plasma spraying of a 1 mm dia. wire, stainless steel 03Cr17Ni10Mo2 (US analog: 316L steel grade) and to analyze the powder suitability for additive manufacturing. We refined the spherical powder manufacturing process and studied the spraying conditions vs. $-160\ \mu\text{m}$ fraction yield relationship, since this fraction is required for additive manufacturing. As the arc power gas flow rate increases, the $-160\ \mu\text{m}$ fraction yield increases to over 70 %. The powder has high fluidity ($17.6 \pm 1\ \text{s}$), bulk density ($4.15 \pm 0.1\ \text{g/cm}^3$), and tapped density ($4.36 \pm 0.2\ \text{g/cm}^3$). It is suitable for additive manufacturing applications. We also studied the effect of the spherical powder fraction size distribution on the fluidity, bulk density, and tapped density. The best results (fluidity: $16.64 \pm 1\ \text{s}$; bulk density: $4.16 \pm 0.1\ \text{g/cm}^3$; tapped density: $4.38 \pm 0.2\ \text{g/cm}^3$) were obtained for $-90\ \mu\text{m}$ fraction. With these properties, the powder meets the basic additive manufacturing requirements: less than the 30 s/50 g fluidity, and bulk density exceeding 3 g/cm³.

Keywords: stainless steel, plasma spraying, spherical powder, powder properties, grain size distribution, morphology, fluidity, bulk density

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the State Assignment No. 075-01176-23-00 and supported by the Presidential Scholarship SP-4955.2022.4.

For citation: Kaplan M.A., Gorbenko A.D., Ivannikov A.Yu., Konushkin S.V., Mikhailova A.V., Kirsankin A.A., Baikin A.S., Sergienko K.V., Nasa-kina E.O., Kolmakov A.G., Sevost'yanov M.A. Properties of spherical metal powder manufactured by plasma spraying of 03Cr17Ni10Mo2 stainless steel wire. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023; 66(1): 69–85. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-80-85>

ВВЕДЕНИЕ

Коррозионностойкие стали уже давно применяются в самых разных областях (включая медицинскую, пищевую, сельскохозяйственную, авиационную, автомобильную промышленности) благодаря их высокой прочности, пластичности и коррозионной стойкости [1 – 4]. Коррозионную стойкость обеспечивает богатый хромом оксидный слой, зарождающийся на поверхности. Одной из самых популярных коррозионностойких сталей является 03X17H10M2, которая до сих пор остается наиболее экономичным выбором среди материалов для работы в агрессивных средах, что обусловлено ее доступностью, простотой изготовления и коррозионной стойкостью [5 – 9].

Востребованные на сегодняшний день аддитивные методы позволяют изготавливать геометрически сложные детали без производственных ограничений, присутствующих в классическом производстве [10 – 13]. Однако очень важно применение сырья в виде металлического сферического порошка, от которого будут зависеть свойства конечного изготавливаемого изделия [14]. Поэтому сферические порошки для аддитивного производства должны обладать рядом свойств, такими как высокая текучесть, насыпная плотность, однородность химического и гранулометрического состава [15 – 18]. Для аддитивных методов применяются порошки с фракционным составом менее 160 мкм. Так для послойного сплавления используются порошки с фракцией менее 60 мкм, а для послойной наплавки – менее 160 мкм [19]. Порошки более 160 мкм можно применять в других порошковых методах, таких как спекание и/или горячее прессование.

В данном исследовании отработан режим получения сферического порошка методом плазменного распыления проволоки для получения наибольшего количества фракции, пригодной для аддитивных методов. Исследован гранулометрический состав, морфология, текучесть, а также насыпная плотность и плотность после утряски сферического порошка.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходного материала использовалась промышленная проволока 03X17H10M2 диаметром 1 мм. Сферический порошок получен методом распыления проволоки на лабораторной установке плазменного диспергирования по патенту № 2749403 РФ. Схема установки представлена на рис. 1.

Из рабочей камеры 1 производится откачка воздуха и дальнейшее заполнение ее аргоном. Далее включают плазматрон 2, генерирующий плазменную струю, и устройство подачи 3 проволоки 4. Между свободными концами проволок возбуждается независимая электрическая дуга, которая приводит к плавлению проволоки. Установка оснащена токоподводами 5 и 6, обеспечивающими электрический потенциал на прутковых материалах для горения независимой электрической дуги. Получение сферических частиц производится плазменной струей за счет распыления. Распыленные частицы порошка движутся вдоль рабочей камеры 1 (направление I). Кольцевое сопло 7 обеспечивает встречный поток охлаждающего газа, тормозящего и охлаждающего частицы порошка (направление II). Частицы порошка собираются в сборнике 8. В качестве плазмообразующего и распыляющего газа плазматрона использовался аргон.

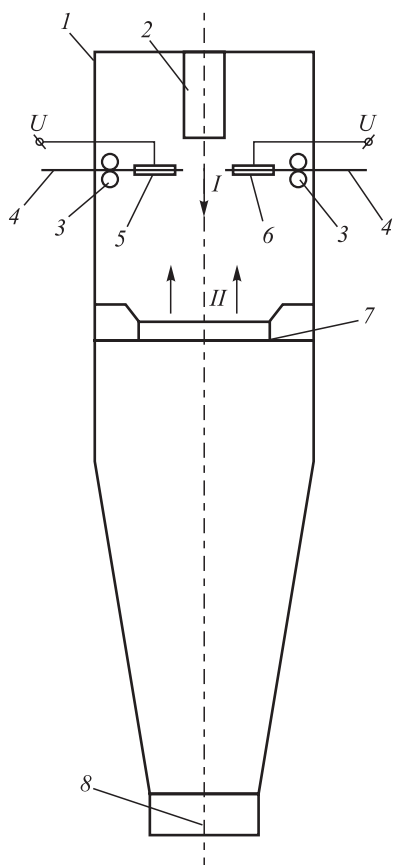


Рис. 1. Схема установки по плазменному диспергированию проволоки

Fig. 1. Layout of wire plasma spraying system

После распыления порошки рассеивали по фракциям на установке вибрационный грохот ANALYSETTE 3 SPARTAN (Германия). Изображения частиц порошка получены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JEOL JSM-IT500. Определение гранулометрического состава осуществлялось на лазерном дифракционном анализаторе размера частиц Analysette 22 NanoTec. Определение текучести и насыпной плотности полученных порошков проводилось с помощью калиброванной воронки (прибора Холла) на приборе HFlow-1 в соответствии с ГОСТ 20899-98 и с частью 1 ГОСТ 19440-94. Определение плотности после утряски порошков проводилось в соответствии с ГОСТ 25279-93 на анализаторе насыпной плотности BeDensi T1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены исследования влияния мощности электрической дуги и расхода газа на выход фракции, применяемой для аддитивных методов производства изделий (менее 160 мкм) на промышленной проволоке 03X17N10M2 диаметром 1 мм. Подобран режим получения сферического порошка методом плазменного распыления проволоки. Результаты исследований представлены на рис. 2.

С увеличением мощности и расхода газа выход фракции менее 160 мкм увеличивается и достигает более 70 %, однако мощность выше 4 кВт перегревает камеру быстрее, что сокращает процесс получения порошка. Для производства сферического порошка на данной лабораторной установке определен режим, при котором лабораторная установка может работать длительное время (мощность 4 кВт при расходе газа 250 л/мин).

Изучен гранулометрический состав и морфология сферического порошка, изготовленного из проволоки 03X17N10M2. Гранулометрический состав показал, что 70 % фракции имеет размер менее 167 мкм (рис. 3). Изображения частиц порошка, полученные на сканирующем электронном микроскопе, продемонстрировали, что частицы обладают высокой степенью сферичности и округлости без видимых дефектов, что делает данный порошок пригодным для применения в аддитивном производстве (рис. 4).

На сферическом порошке проведены исследования зависимости насыпной плотности, текучести и плотности после утряски от размера фракции порошка. Результаты представлены в таблице.

Можно сделать вывод, что чем меньше размер фракции, тем быстрее течет порошок (от 16,64 до 22,9 с), а насыпная плотность и плотность после утряски для всех фракций сохраняется на одном уровне и составляет в среднем 4,15 и 4,38 г/см³ соответственно.

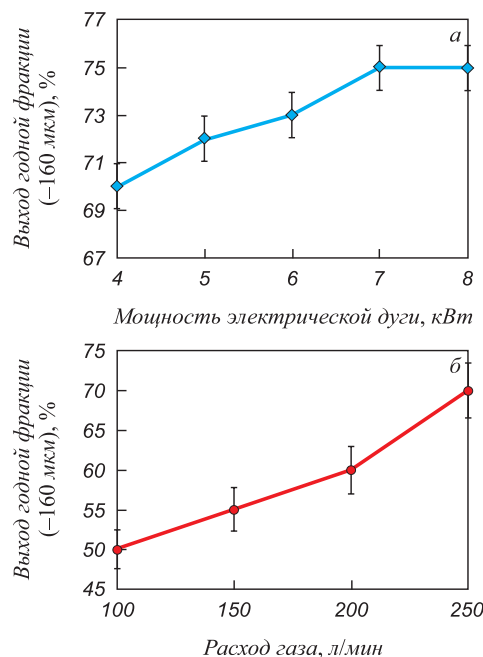
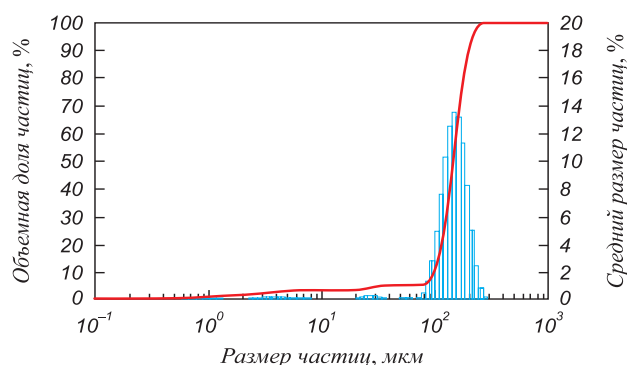


Рис. 2. Влияние режимов распыления на выход фракции менее 160 мкм, применяемой для аддитивных методов:
а – электрическая мощность дуги;
б – расход плазмообразующего и обжимного газа

Fig. 2. Spraying conditions vs. yield (<160 μm) of particles suitable for additive manufacturing
a – electric arc power; b – gas flow rate



Выход фракции, %	Размер фракции, мкм
10	99,46
20	115,34
30	126,64
40	136,62
50	146,35
60	156,21
70	167,26
80	180,66
90	198,83

Рис. 3. Гранулометрический состав порошка

Fig. 3. Powder particle size distribution

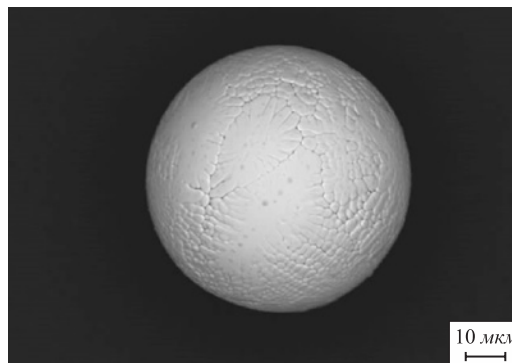
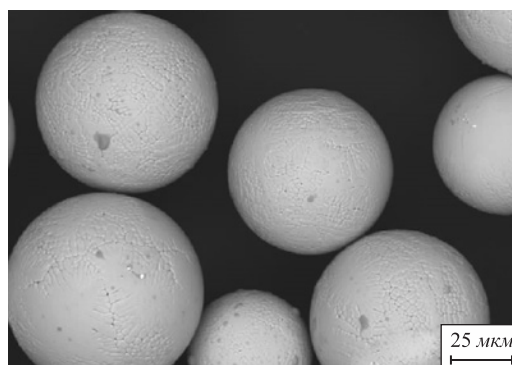


Рис. 4. СЭМ изображения частиц порошка, полученного из проволоки 03X17H10M2

Fig. 4. SEM images of the powder particles made from the 03Ch17Ni10Mo2 (316L) wire

Выводы

Изучена зависимость влияния режимов распыления на выход фракции менее 160 мкм, пригодной для аддитивных методов. С увеличением мощности и расхода газа выход фракции менее 160 мкм увеличивается и достигает более 70 %.

Отработана технология получения сферического порошка методом плазменного распыления промышленной проволоки 03X17H10M2 диаметром 1 мм и подобран оптимальный режим (мощность 4 кВт при расходе газа 250 л/мин) с выходом более 70 % фракции менее 160 мкм и следующими характеристиками: текучесть $17,6 \pm 1$ с, насыпная плотность $4,15 \pm 0,1$ г/см³ и плотность после утряски $4,36 \pm 0,2$ г/см³. Данный порошок пригоден для применения в аддитивном производстве.

Powder Properties

Characteristics of the powder

Фракция, мкм	250 – 160	160 – 90	–90	–160
Текучесть				
t , с	$22,9 \pm 1,0$	$18,62 \pm 1,0$	$16,64 \pm 1,0$	$17,6 \pm 1,0$
Насыпная плотность				
ρ , г/см ³	$4,15 \pm 0,2$	$4,15 \pm 0,2$	$4,16 \pm 0,2$	$4,15 \pm 0,1$
Плотность после утряски				
ρ , г/см ³	$4,41 \pm 0,2$	$4,35 \pm 0,2$	$4,38 \pm 0,2$	$4,36 \pm 0,2$

Изучена зависимость фракции сферического порошка, полученного из промышленной проволоки 03X17H10M2, на текучесть, насыпную плотность, плотность после утряски. Наилучшие характеристики получились для фракции –90 мкм: текучесть $16,64 \pm 1$ с, насыпная плотность $4,16 \pm 0,1$ г/см³ и плотностью после утряски $4,38 \pm 0,2$ г/см³.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Grabco D., Shikimaka O., Pyrtsac C., Prisacaru A., Barboș Z., Bivol M., Alexandrov S., Vilotic D., Vilotic M. Microstructures generated in AISI 316L stainless steel by Vickers and Berkovich indentations. *Materials Science and Engineering: A*. 2021; 805: 140597. <http://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140597>
- Bekmurzayeva A., Duncanson W.J., Azevedo H.S., Kanayeva D. Surface modification of stainless steel for biomedical applications: Revisiting a century-old material. *Materials Science and Engineering: C*. 2018; 93: 1073–1089. <http://doi.org/10.1016/j.msec.2018.08.049>
- Sheik S., Tirumalla A., Gurralla A.K., Mohammed R. Effect of microstructural morphology on corrosion susceptibility of austenitic and super austenitic stainless steels. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 66(2): 514–518. <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.113>
- Feng W., Wang Z., Sun Q., He Y., Sun Y. Effect of thermo-mechanical processing via rotary swaging on grain boundary character distribution and intergranular corrosion in 304 austenitic stainless steel. *Journal of Materials Research and*

- Technology. 2022; 19: 2470–2482.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.032>
5. Mehta H., Kaur G., Chaudhary G.R., Prabhakar N., Kaul S., Singhal N.K. Evaluation of corrosion resistant, antimicrobial and cytocompatible behaviour of cobalt based metallosurfactants self-assembled monolayers on 316L stainless steel surface. *Surface and Coatings Technology*. 2022; 444: 128657. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128657>
 6. Wongpanya P., Wongpinij T., Photongkam P., Sirita-petawee J. Improvement in corrosion resistance of 316 L stainless steel in simulated body fluid mixed with antiplatelet drugs by coating with Ti-doped DLC films for application in biomaterials. *Corrosion Science*. 2022; 208: 110611. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110611>
 7. Zhang D.H., Meng X.C., Zuo G.Z., Huang M., Li L., Xu W., Li C.L., Tang Z.L., Yuan J.S., Liu Y.B., Cao X.G. Study of the corrosion characteristics of 304 and 316L stainless steel in the static liquid lithium. *Journal of Nuclear Materials*. 2021; 553: 153032. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.153032>
 8. Каплан М.А., Иванников А.Ю., Конушкин С.В., Наскина Е.О., Баикин А.С., Картабаева Б.Б., Горбенко А.Д., Колмаков А.Г., Севостьянов М.А. Исследование структуры, механических и антибактериальных свойств коррозионноустойчивой стали, легированной серебром и титаном. *Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах*. 2022; 502(1): 41–49. <http://doi.org/10.31857/S268695352201006X>
Kaplan M.A., Ivannikov A.Yu., Konushkin S.V., Naskina E.O., Baikin A.S., Kartabaeva B.B., Gorbenko A.D., Kolmakov A.G., Sevost'yanov M.A. Study of the structure, mechanical characteristics, and antibacterial properties of corrosion-resistant steel alloyed with silver and titanium. *Doklady Chemistry*. 2022; 502(2): 37–44. <https://doi.org/10.1134/S001250082202001X>
 9. Brooks E.K., Brooks R.P., Ehrensberger M.T. Effects of simulated inflammation on the corrosion of 316L stainless steel. *Materials Science and Engineering: C*. 2017; 71: 200–205. <http://doi.org/10.1016/j.msec.2016.10.012>
 10. Singh R., Gupta A., Tripathi O., Srivastava S., Singh B., Awasthi A., Rajput S.K., Sonia P., Singhal P., Saxena K.K. Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview. *Materials Today: Proceedings*. 2020; 26(2): 3058–3070. <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.635>
 11. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018; 143: 172–196. <http://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
 12. Haselhuhn A.S., Wijnen B., Anzalone G.C., Sanders P.G., Pearce J.M. In situ formation of substrate release mechanisms for gas metal arc weld metal 3-D printing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015; 226: 50–59. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.06.038>
 13. Yap C.Y., Chua C.K., Dong Z.L., Liu Z.H., Zhang D.Q., Loh L.E., Sing S.L. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*. 2015; 2(4): 241101. <http://doi.org/10.1063/1.4935926>
 14. Chen Q., Thouas G.A. Metallic implant biomaterials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2015; 87: 1–57. <http://doi.org/10.1016/j.mser.2014.10.001>
 15. Egger G., Gygax P.E., Glardon R., Karapatis N.P. Optimization of powder layer density in selective laser sintering. In: *10th Int. Solid Freeform Fabrication Symp.* 1999: 255–263. <http://doi.org/10.26153/tsw/746>
 16. Sing S.L., An J., Yeong W.Y., Wiria F.E. Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs. *Journal of Orthopedic Research*. 2016; 34(3): 369–385. <http://doi.org/10.1002/jor.23075>
 17. Ganesan V.V., Amerinatanzi A., Jain A. Discrete Element Modeling (DEM) simulations of powder bed densification using horizontal compactors in metal additive manufacturing. *Powder Technology*. 2022; 405: 117557. <http://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117557>
 18. Zhai W., Zhou W., Nai S.M.L., Wei J. Characterization of nanoparticle mixed 316 L powder for additive manufacturing. *Journal of Materials Science & Technology*. 2020; 47:162–168. <http://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.02.019>
 19. Колмаков А.Г., Иванников А.Ю., Каплан М.А., Кирсанкин А.А., Севостьянов М.А. Коррозионноустойчивые стали в аддитивном производстве. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021; 64(9): 619–650. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-9-619-650>
Kolmakov A.G., Ivannikov A.Yu., Kaplan M.A., Kirsan-kin A.A., Sevost'yanov M.A. Corrosion-resistant steels in additive manufacturing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021; 64(9): 619–650. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-9-619-650>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Михаил Александрович Каплан, младший научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
ORCID: 0000-0002-8635-0719
E-mail: mkaplan@imet.ac.ru

Артём Дмитриевич Горбенко, инженер-исследователь, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; инженер-исследователь, Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
E-mail: artemgorbenk@yandex.ru

Александр Юрьевич Иванников, к.т.н., старший научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
ORCID: 0000-0003-1113-391X
E-mail: aivannikov@imet.ac.ru

Mikhail A. Kaplan, Junior Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-8635-0719
E-mail: mkaplan@imet.ac.ru

Artem D. Gorbenko, Research Engineer, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences; Research Engineer, All-Russian Research Institute of Phytopathology
E-mail: artemgorbenk@yandex.ru

Aleksandr Yu. Ivannikov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0003-1113-391X
E-mail: aivannikov@imet.ac.ru

Сергей Викторович Конушкин, младший научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
ORCID: 0000-0002-9574-1957
E-mail: venev.55@mail.ru

Анна Владимировна Михайлова, инженер-исследователь, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; инженер-исследователь, Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
E-mail: mikhannavlad@gmail.com

Андрей Александрович Кирсанкин, к.ф.-м.н, старший научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
ORCID: 0000-0002-9206-7805
E-mail: akirsankin@imet.ac.ru

Александр Сергеевич Баикин, научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
E-mail: baikinas@mail.ru

Константин Владимирович Сергиенко, младший научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
E-mail: shulf@yandex.ru

Елена Олеговна Насакина, старший научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
ORCID: 0000-0002-0783-1558
E-mail: nacakina@mail.ru

Алексей Георгиевич Колмаков, член-корреспондент РАН, д.т.н., заведующий лабораторией, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
ORCID: 0000-0002-4907-951X
E-mail: akolmakov@imet.ac.ru

Михаил Анатольевич Севостьянов, к.т.н, ведущий научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; руководитель центра, Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
ORCID: 0000-0003-2652-8711
E-mail: msevostyanov@imet.ac.ru

Sergei V. Konushkin, Junior Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-9574-1957
E-mail: venev.55@mail.ru

Anna V. Mikhailova, Research Engineer, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences; Research Engineer, All-Russian Research Institute of Phytopathology
E-mail: mikhannavlad@gmail.com

Andrei A. Kirsankin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-9206-7805
E-mail: akirsankin@imet.ac.ru

Aleksandr S. Baikin, Research Associate, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences
E-mail: baikinas@mail.ru

Konstantin V. Sergienko, Junior Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences
E-mail: shulf@yandex.ru

Elena O. Nasakina, Senior Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-0783-1558
E-mail: nacakina@mail.ru

Aleksei G. Kolmakov, Corresponding Member of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-4907-951X
E-mail: akolmakov@imet.ac.ru

Mikhail A. Sevost'yanov, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences; Head of the Center, All-Russian Research Institute of Phytopathology
ORCID: 0000-0003-2652-8711
E-mail: msevostyanov@imet.ac.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

М. А. Каплан – подготовка текста статьи и обработка результатов.
А. Д. Горбенко – помощь в получении порошков, отработка режимов распыления.
А. Ю. Иванников – получение порошков, настройка и наладка оборудования, получение финального порошка по отработанным режимам распыления.
С. В. Конушкин – изучение литературы, подбор методик для исследования.
А. В. Михайлова – проведение исследований на СЭМ.
А. А. Кирсанкин – исследование характеристики порошка.
А. С. Баикин – исследование гранулометрического состава.
К. В. Сергиенко – обработка рисунков.
Е. О. Насакина – консультация в исследованиях и написании работы.
А. Г. Колмаков – доработка текста, корректировка выводов.
М. А. Севостьянов – научное руководство, анализ статьи.

M. A. Kaplan – writing the text, processing of the results.
A. D. Gorbenko – assistance in obtaining powders, working out spray modes).
A. Yu. Ivannikov – obtaining powders, setting up and adjusting equipment, obtaining the final powder for waste spray modes.
S. V. Konushkin – literary review, selection of the research methods.
A. V. Mikhailova – conducting the SEM research.
A. A. Kirsankin – study of the powder characteristics.
A. S. Baikin – study of the particle size distribution.
K. V. Sergienko – figures processing.
E. O. Nasakina – consulting in the research and writing the article.
A. G. Kolmakov – revision of the text, correction of the conclusions.
M. A. Sevost'yanov – scientific guidance, article analysis.

Поступила в редакцию 19.10.2022
 После доработки 27.11.2022
 Принята к публикации 30.12.2022

Received 19.10.2022
 Revised 27.11.2022
 Accepted 30.12.2022