



UDC 621.762:669.018.8

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



Original article

Оригинальная статья

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 $3\ \text{g/cm}^3$.

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., Nasakina 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>

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СФЕРИЧЕСКОГО ПОРОШКА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ 03Х17Н10М2

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 03X17H10M2 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 03X17H10M2. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023; 66(1): 81–85. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-80-85>

INTRODUCTION

Stainless steels have many applications (medical equipment, agriculture, aerospace, automotive, and food industries) for their high strength, ductility, and corrosion resistance [1–4]. A chromium-rich oxide layer builds up on the surface and protects the steel from corrosion. 03Cr17Ni10M2 (US analog: 316L) is a popular stainless steel grade. To date, it is the most cost-efficient material for corrosive environments. The steel is widely available, easy to manufacture, and has high corrosion resistance [5–9].

Advanced additive manufacturing processes can make complex parts without the limitations of conventional subtractive manufacturing [10–13]. The raw material is metallic spherical powder. Its quality is paramount for the properties of the final product [14]. Spherical powders for additive manufacturing should have such properties as high fluidity, bulk density, homogeneous chemical composition, and particle size distribution [15–18]. The particle size of additive manufacturing powders is less than 160 μm. For example, melting processes use powders with particle sizes less than 60 μm, and surfacing, less than 160 μm [19]. Powders with particle sizes over 160 μm can be used in other processes such as sintering and/or hot pressing.

We refined the plasma spraying process for a higher yield of the particle size fraction suitable for additive manufacturing. We also studied the particle size distribution, morphology, fluidity, bulk, and tapped density of the spherical powder.

MATERIALS AND METHODS

The powder was made from an industrial-grade wire, 1 mm dia., 03Cr17Ni10M2 (316L) steel grade. We made the spherical powder by wire spraying using a lab plasma spraying system (Russian Federation patent No. 2749403). Fig. 1 shows the system layout.

Air is evacuated from chamber 1 and then the chamber is filled with argon. Next, the plasmatron 2 is activated to generate a plasma jet, and wire feeder 3 feeds wire 4. An electric arc is excited between the free ends of the wires, and the wire melts. The system has feeders 5 and 6 delivering power to the wires to ignite an electric arc. Spherical particles are produced by pulverizing with the plasma jet. The atomized powder particles move along chamber 1 (direction I). Annular nozzle 7 produces a counter flow of cooling gas which slows down and cools the powder particles (direction II). The powder particles are collected in bin 8. Argon was used as the plasma-forming and atomizing gas.

After atomization, the powder was separated into fractions using an ANALYSETTE 3 SPARTAN vibratory sieve shaker (Germany). We used a JEOL JSM-IT500 scanning electron microscope (SEM) to obtain the powder particle images. An Analysette 22 NanoTec laser particle sizer was used for powder particle size analysis. The fluidity and bulk density were measured with an HFlow-1 Hall flowmeter, in accordance with the state standards GOST 20899-98 and GOST 19440-94, Part 1. The tapped density was measured in accordance with the state standard GOST 25279-93 using a BeDensi T1 analyzer.

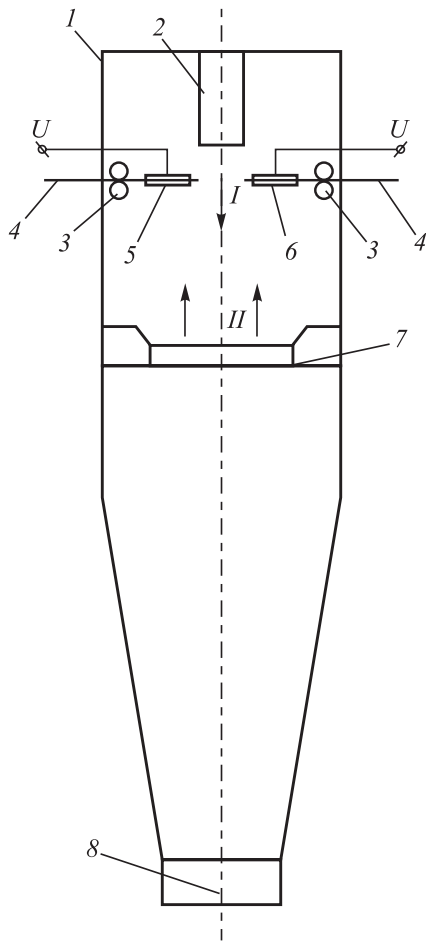


Fig. 1. Layout of wire plasma spraying system

Рис. 1. Схема установки по плазменному диспергированию проволоки

RESULTS AND DISCUSSION

We investigated the effect of electric arc power and gas flow rate on the yield of fraction suitable additive manufacturing (less than 160 μm) using a 1 mm dia. industrial-grade wire, 03Cr17H10M2 (316L) steel grade. We selected the process variables to make spherical powder by plasma spraying. The results are shown on Fig. 2.

As the electric power and gas flow rate increase, the yield of the $-160\text{ }\mu\text{m}$ fraction increases to over 70 %. When the power exceeds 4 kW, the chamber overheats rapidly, so the process has to be paused for cooling. We found the conditions (power: 4 kW; gas flow rate: 250 l/min) for continuous spherical powder manufacturing.

Then we studied the particle size distribution and morphology of the resulting spherical powder made of the 03Cr17Ni10M2 steel grade wire. It was found that 70 % of the particles are smaller than 167 μm (Fig. 3). The SEM images of the powder particles show that the shape of the particles is almost spherical with no visible defects. The powder is suitable for additive manufacturing (Fig. 4).

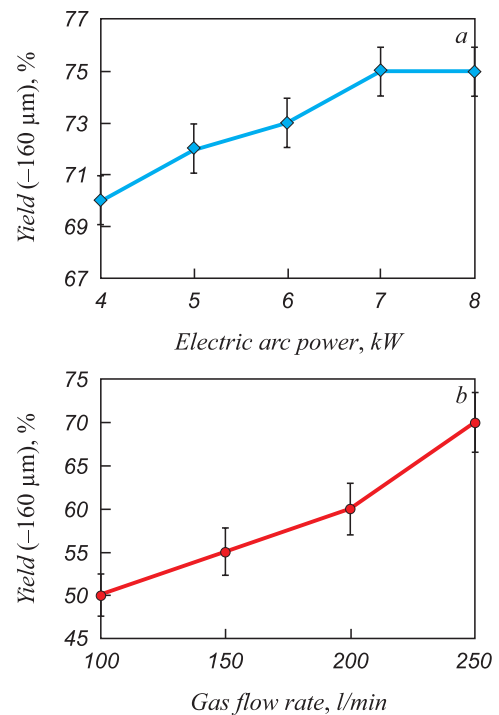
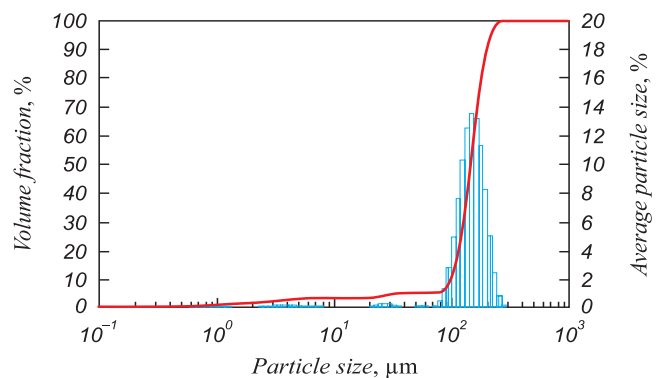


Fig. 2. Spraying conditions vs. yield ($<160 \mu\text{m}$) of particles suitable for additive manufacturing
a – electric arc power; *b* – gas flow rate

Рис. 2. Влияние режимов распыления на выход фракции менее 160 мкм, применяемой для аддитивных методов:

b – расход плазмообразующего и обжимного газа



Yield, %	Particle size, μm
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

Fig. 3. Powder particle size distribution

Рис. 3. Гранулометрический состав порошка

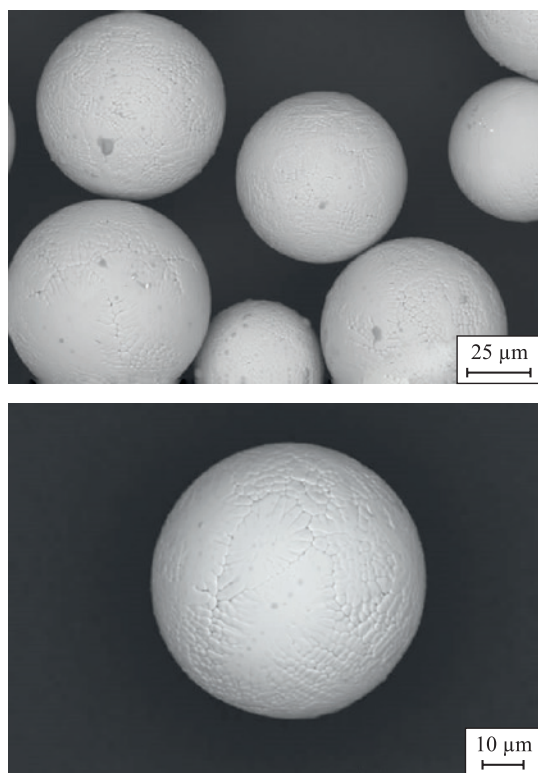


Fig. 4. SEM images of the powder particles made from the 03Cr17Ni10Mo2 (316L) wire

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

We studied the bulk density, fluidity, and tapped density vs. particle size relations. The results are presented in the table.

It can be concluded that the smaller the particle size, the higher the fluidity (16.64 to 22.9 s), while the bulk and tapped density for all particle sizes remain unchanged (average values: 4.15 and 4.38 g/cm³, respectively).

CONCLUSIONS

We studied the effect of spraying conditions on the yield of particles smaller than 160 μm suitable for additive manufacturing. As the arc power gas flow rate increase, the –160 μm fraction yield increases to over 70 %.

We refined the spherical powder manufacturing by plasma spraying on a 1 mm dia. industrial-grade wire, 03Cr17Ni10Mo2 (316L) steel grade. The optimum conditions are as follows: 4 kW arc power, 250 l/min gas flow rate. The yield of fractions smaller than 160 μm exceeds 70 %. The resulting powder properties are 17.6 ± 1 s fluidity, 4.15 ± 0.1 g/cm³ bulk density, and 4.36 ± 0.2 g/cm³ tapped density. The powder is suitable for additive manufacturing.

We also studied the effect of the spherical powder particle size on the fluidity, bulk density, and tapped density. The best results (fluidity: 16.64 ± 1 s; bulk density:

Powder Properties

Characteristics of the powder

Particle size, μm	250 – 160	160 – 90	–90	–160
Fluidity				
<i>t</i> , s	22.9 ± 1.0	18.62 ± 1.0	16.64 ± 1.0	17.6 ± 1.0
Bulk density				
<i>p</i> , g/cm ³	4.15 ± 0.2	4.15 ± 0.2	4.16 ± 0.2	4.15 ± 0.1
Tapped density				
<i>p</i> , g/cm ³	4.41 ± 0.2	4.35 ± 0.2	4.38 ± 0.2	4.36 ± 0.2

4.16 ± 0.1 g/cm³; tapped density: 4.38 ± 0.2 g/cm³) were obtained for a –90 μm fraction.

REFERENCES / СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Grabco D., Shikimaka O., Pyrtsac C., Prisacaru A., Barbosa 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>
- 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>
- Wongpanya P., Wongpinij T., Photongkam P., Siritapetawee 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>
- 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. 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>
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 коррозионностойкой стали, легированной серебром и титаном. *Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах*. 2022; 502(1): 41–49. <http://doi.org/10.31857/S268695352201006X>
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., Gygh P.E., Glandon 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. Kolmakov A.G., Ivannikov A.Yu., Kaplan M.A., Kirsankin 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>
Колмаков А.Г., Иванников А.Ю., Каплан М.А., Кирсанкин А.А., Севостьянов М.А. Коррозионностойкие стали в аддитивном производстве. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021; 64(9): 619–650. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-9-619-650>

Information about the Authors

Сведения об авторах

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

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

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

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

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

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

Contribution of the Authors

Вклад авторов

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.

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.

Received 19.10.2022

Revised 27.11.2022

Accepted 30.12.2022

Поступила в редакцию 19.10.2022

После доработки 27.11.2022

Принята к публикации 30.12.2022