

Оригинальная статья

УДК 621.762

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-3(53)-73-81

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ГРАНУЛЯТА НА ОСНОВЕ ПОРОШКА
НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12X18H10T ДЛЯ МІМ-ТЕХНОЛОГИИ**

© 2025 г. А. В. Пархоменко¹, А. П. Амосов¹, А. М. Пастухов²

¹Самарский государственный технический университет (Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244)

²Пензенский государственный университет (Россия, 440026, Пенза, ул. Красная, 40)

Аннотация. Порошки нержавеющей стали занимают важное место в современном материаловедении как перспективное сырье для производства высокоточных деталей сложной геометрии с минимальными допусками. Наибольшее распространение в промышленности получила технология металлпорошкового литья с применением полимерных связующих Metal Injection Molding (MIM), которая позволяет сочетать преимущества порошковой металлургии и пластического формования. Рассматриваемый метод особенно востребован при изготовлении миниатюрных компонентов ответственного машиностроительного назначения, где традиционные способы обработки оказываются экономически нецелесообразными или технологически ограниченными. Ключевыми достоинствами MIM-технологии при работе с нержавеющей сталью являются возможность достижения плотности спеченных изделий до 95 – 98 % от теоретической, высокая повторяемость геометрических параметров, а также значительное сокращение механической постобработки. Особый интерес представляет применение аустенитной нержавеющей стали марки 12X18H10T в MIM-технологии, так как изделия на ее основе сочетают высокую коррозионную стойкость и жаропрочность, а также могут использоваться при работе в агрессивных условиях. Исследованы состав и технологические параметры получения гранулята для MIM-процесса с использованием отечественных материалов: порошки стали марки 12X18H10T, полиформальдегидное связующее и технологические добавки (стеариновая кислота, пчелиный воск и полиэтилен высокого давления). Исходный порошок нержавеющей стали имеет правильную сферическую форму частиц размером от 5 до 25 мкм. Применение сканирующей электронной микроскопии, определение показателей текучести расплава термопластов, а также использование пикнометрического метода позволило изучить микроструктуру, реологические и физические свойства полученных гранулятов. Установлено, что образцы из разработанного гранулята соответствуют требованиям нормативных документов.

Ключевые слова: MIM-технология, инжекционное формование, литье под давлением, гранулят, фидсток, порошок нержавеющей стали, связующее, полиформальдегид, спекание, состав, структура

Для цитирования: Пархоменко А.В., Амосов А.П., Пастухов А.М. Разработка и применение гранулята на основе порошка нержавеющей стали 12X18H10T для MIM-технологии. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;3(53):73–81. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3\(53\)-73-81](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-73-81)

Original article

**DEVELOPMENT AND APPLICATION OF GRANULATE BASED ON 12X18H10TI
STAINLESS STEEL POWDER FOR MIM TECHNOLOGY**

© 2025 A. V. Parkhomenko¹, A. P. Amosov¹, A. M. Pastukhov²

¹Samara State Technical University (244 Molodogvardeiskaya Str., Samara 443100, Russia)

²Penza State University (40 Krasnaya Str., Penza 440026, Russia)

Abstract. Stainless steel powders occupy an important place in modern materials science as a promising raw material for the production of high-precision parts of complex geometry with minimal tolerances. The technology of

metal powder casting using polymer binders Metal Injection Molding (MIM), which allows combining the advantages of powder metallurgy and plastic molding, has become the most widespread in industry. The method under consideration is particularly in demand in the manufacture of miniature components for responsible engineering purposes, where traditional processing methods are economically impractical or technologically limited. The key advantages of MIM technology when working with stainless steels are the ability to achieve a density of sintered products up to 95 – 98 % of the theoretical, high repeatability of geometric parameters, as well as a significant reduction in mechanical post-processing. Of particular interest is the use of austenitic stainless steel grade 12X18H10T in MIM technology, as its products combine high corrosion resistance and heat resistance, and can also be used when working in aggressive conditions. The composition and technological parameters of granulate production for the MIM process using domestic materials are studied: 12X18H10T grade steel powders, polyformaldehyde binder and technological additives (stearic acid, beeswax and high-pressure polyethylene). The initial stainless steel powder has a regular spherical particle shape ranging in size from 5 to 25 microns. The use of scanning electron microscopy, determination of melt flow characteristics of thermoplastics, as well as the use of the pycnometric method made it possible to study the microstructure, rheological and physical properties of the obtained granules. It has been established that the samples from the developed granulate comply with the requirements of regulatory documents.

Keywords: MIM-technology, injection molding, compression molding, granulate, feedstock, stainless steel powder, binder, polyformaldehyde, sintering, composition, structure

For citation: Parkhomenko A.V., Amosov A.P., Pastukhov A.M. Development and application of granulate on the basis of stainless steel powder 12Cr18Ni10Ti for MIM-technology. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;3(53):73–81. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3\(53\)-73-81](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-73-81)

Введение

Технология металлопорошкового литья (Metal Injection Molding (MIM)) – гибридный метод, сочетающий принципы порошковой металлургии и инжекционного формования полимеров, позволяющий производить металлические изделия сложной геометрической конфигурации с высокой точностью. Технологический процесс MIM включает несколько ключевых стадий: приготовление однородной смеси металлического порошка с полимерным связующим, формование заготовок методом инжекционного литья, удаление связующего компонента и окончательное высокотемпературное спекание для получения плотной металлической структуры [1].

Изделия, полученные методом MIM, обладают сложной геометрией, сочетая прочность металлов с точностью полимерных деталей. Технология позволяет массово производить мелкие сложные детали с минимальной постобработкой [2], преодолевая ограничения традиционных методов, при которых до 80 % материала теряется в виде стружки. По MIM-технологии литниковые системы можно перерабатывать, обеспечивая использование 99 % материала, что особенно важно для дорогих сплавов, например, высоколегированных нержавеющей сталей и титановых сплавов [3].

В качестве промежуточного сырья для технологии инжекционного формования применяется фидсток (feedstock) или гранулят – смесь мелкодисперсных металлических порошков с полимерным связующим. Выбор правильного соотношения порошка и связующего является основным фактором для успешного формования изде-

лий по MIM-технологии. Содержание металлического порошка в грануляте, как правило, составляет 50 – 65 % [4 – 6], однако возможно его увеличение до 80 % и более [7]. Связующее в MIM-технологии играет решающую роль: оно должно сохранять низкую вязкость при большом содержании порошка и не вступать в реакции, чтобы обеспечить однородное смешивание металлополимерной смеси. В MIM-технологии часто применяется связующая система на основе полиформальдегида, полиэтилена высокого давления и стеариновой кислоты. Эти компоненты обеспечивают стабильность формы и структурную целостность изделия, несмотря на увеличенную пористость после удаления полиформальдегида. Свойства металлических порошков, являющихся ключевым компонентом гранулята, оказывают решающее влияние на характеристики итогового продукта, получаемого с использованием MIM-процесса. В MIM-технологии можно применять широкий спектр металлов – от простых низколегированных сталей [8 – 10] до сложных составов, таких как коррозионностойкие [11 – 13] и инструментальные стали [14; 15], а также сплавы на основе титана [16; 17], интерметаллические [18; 19] и магнитные материалы [20; 21].

Нержавеющие стали занимают важное место в MIM-технологии благодаря сочетанию коррозионной стойкости, механической прочности и биосовместимости. Для приготовления MIM-гранулятов в большинстве случаев выбираются порошки нержавеющей стали с размерами частиц от 5 до 45 мкм [22]. В работе [23] в качестве исходных компонентов для изготовления изделий по MIM-технологии наиболее часто

встречается применение сферических порошков мартенситной нержавеющей стали марки 17-4PH и аустенитной 316L или их смеси.

Цель настоящей работы состояла в разработке отечественного металлопорошкового гранулята из порошка нержавеющей стали марки 12X18H10T для изготовления стальных деталей по ММ-технологии, а также в исследовании физико-механических, реологических свойств разработанного гранулята и спеченных из него ММ-изделий.

Нержавеющая сталь марки 12X18H10T (аналог AISI 321) – аустенитный сплав с титаном, обладающий стойкостью к межкристаллитной коррозии и высоким температурам. Рассматриваемый материал применяется в химической, пищевой, аэрокосмической и медицинской промышленности. Порошок стали марки 12X18H10T перспективен для ММ-технологии из-за высокой сферичности частиц и узкому распределению гранул, что обеспечивает стабильность литья и высокую плотность изделий.

Методика исследований

Для разработки гранулята использовали сферический металлический порошок низкоуглеродистой нержавеющей стали марки 12X18H10T, полученный методом газовой атомизации (НПО «Центротех», г. Новоуральск). В качестве полимерного связующего использовали полиформальдегид (ПФЛ) марки Технасет А-110 (ТУ 2226-020-11517367) производства НПП «Полипластик» (г. Москва). В качестве поверхностно-активного вещества применяли техническую стеариновую кислоту (СК) (ГОСТ 6484 – 96) марки Т-32 производства ОАО «НЭФИС КОСМЕТИКС» (г. Казань). В качестве добавки, удерживающей структуру материала после удаления связующего, был использован полиэтилен высокого давления (ПЭВД) 15813-020, полученный на ПАО «Казаньоргсинтез» (г. Казань) по ГОСТ 16337 – 22.

Смешивание исходных компонентов проводили с использованием смесителя CFine фирмы Guangdong CFine Technology Co (КНР). Гранулометрический состав металлического порошка определяли с использованием лазерного анализатора ANALYSETTE22 Compact компании «Fritsch GmbH» (Германия). Исследование микроструктуры исходных материалов, а также спеченных заготовок проводили с применением растрового электронного микроскопа JSM-6390A фирмы Jeol (Япония). Анализ элементного состава металлического порошка определяли на оптико-эмиссионном спектрометре FOUNDRY-MASTER LAB фирмы Oxford Instruments (Великобритания). Анализ по определению

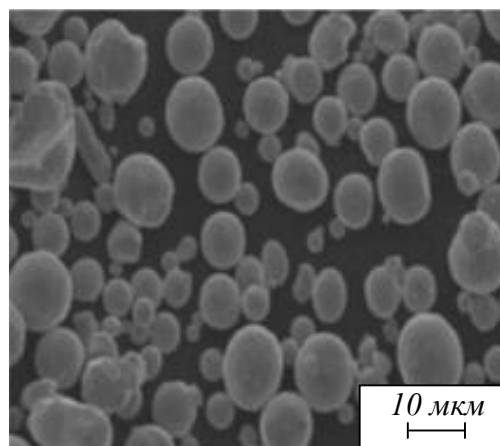


Рис. 1. Микроструктура порошка нержавеющей стали марки 12X18H10T

Fig. 1. Microstructure of stainless steel powder 12Cr18Ni10Ti

массовой доли хрома был проведен фотометрическим методом. Реологические свойства гранулята идентифицировали по ГОСТ 11645 – 73 на приборе по определению показателя текучести расплава MODULAR MELT FLOW 7026 фирмы Ceast S.p.A. (Италия) при температуре 190 °C и нагрузке 21,6 кг. Плотность и неоднородность определяли с помощью гелиевого пикнометра AccuPyc 1340 фирмы Micromeritics (США). Исследования на твердость спеченных из гранулята изделий проводили по ГОСТ 9013 – 59 на испытательной машине – твердомере фирмы WPM LEIPZIG (Германия). Исследования на сжатие и растяжение спеченных из гранулята образцов проводили по ГОСТ 18227 – 85 на испытательной машине Instron 5988 (США).

Результаты и их обсуждение

Исходный порошок нержавеющей стали марки 12X18H10T имел микроструктуру, представленную на рис. 1. Распределение частиц рассматриваемого материала по размерам (D – количество частиц; d – диаметр частиц) представлено на рис. 2 и ниже:

D , об. %	d , мкм
10	5,8
50	10,4
90	16,7

Анализ фракционного и гранулометрического составов порошка марки 12X18H10T позволил установить, что инородных включений не обнаружено, основная масса частиц имеет правильную околосферическую форму с размером от 5 до 25 мкм, 90 % частиц порошка имеют размер

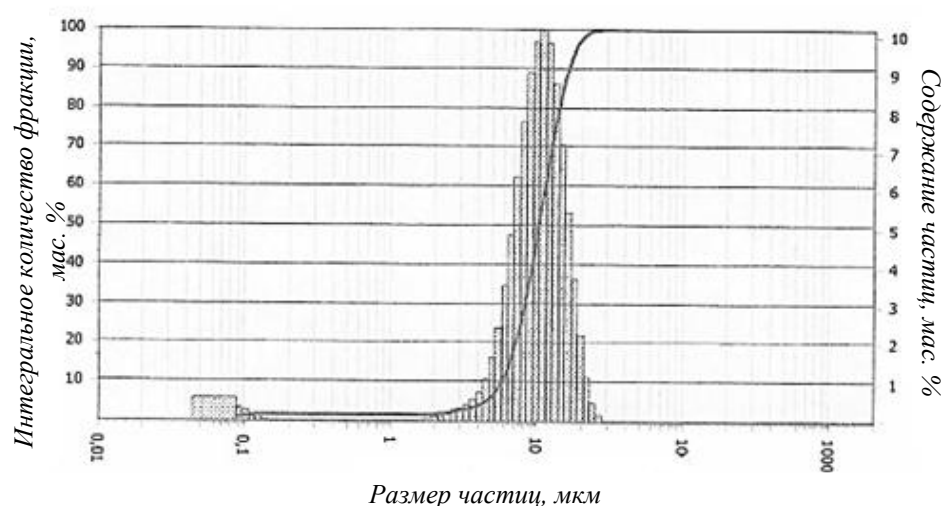


Рис. 2. Гранулометрический состав порошка нержавеющей стали марки 12X18H10T
Fig. 2. Particle size distribution stainless steel powder 12Cr18Ni10Ti

меньше 16,7 мкм, что соответствует основным требованиям, предъявляемым к металлическим порошкам для производства МИМ-гранулята. Был проведен анализ элементного состава порошка (табл. 1).

Элементный состав исследуемого порошка соответствует ТУ 1793-022-81772813 – 2019.

С учетом имеющихся результатов ранее проведенных исследований [7] подбирали рецептуру гранулята из порошка марки 12X18H10T и связующей системы на основе полиформальдегида, обеспечивающую оптимальные реологические свойства смеси. Сначала исходные компоненты смешивали в смесителе по следующему режиму: температура 180 °С; скорость вращения валов 15 об/мин; время смешивания 2 ч.

Далее полученную смесь извлекали из смесителя и после остывания дробили на роторной дробилке, после чего гранулировали в грануляторе по следующему режиму: температура шнека 170 °С; частота вращения шнека 125 об/мин; частота резчика гранул 1100 об/мин.

В итоге для изготовления гранулята была выбрана рецептура со следующим соотношением исходных компонентов: 90 % порошка 12X18H10T; 8 % ПФЛ; 1 % ПЭВД; 1 % СК. Показатель текучести расплава (ПТР) полученного гранулята составил 268 г/10 мин; плотность – 5,1 г/см³; неоднородность (Δ) – 0,27 %.

Внешний вид полученного гранулята из порошка нержавеющей стали марки 12X18H10T представлен на рис. 3.

Из полученного гранулята были изготовлены заготовки (рис. 4). Размеры заготовок приняты в соответствии с ГОСТ Р 59651 – 2021.

Литье под давлением из порошка нержавеющей стали марки 12X18H10T проводили на термопластавтомате по следующему режиму: температура пресс-формы 130 ± 10 °С; давление литья 120 ± 10 МПа; дозировка (навеска) 10 см³; температура в зонах сопла, 1 – 3 составляет 190 ± 5; 175 ± 5; 180 ± 5; 185 ± 5 °С; выдержка в пресс-форме под давлением 5 с при охлаждении 10 с.

Т а б л и ц а 1

Элементный состав порошка марки 12X18H10T

Table 1. Elemental composition of 12Cr18Ni10Ti powder

Элемент	Содержание элемента в порошке, мас. %
Cr	17,00
Ni	9,51
Mn	0,42
Mo	0,67
Ti	0,10
V	0,21
Cu	0,07



Рис. 3. Внешний вид гранулята стали марки 12X18H10T
Fig. 3. Appearance of 12Cr18Ni10Ti granulate

Удаление связующего из образцов проводили каталитическим методом в парах концентрированной азотной кислоты в печи по следующему режиму: температура 112 ± 5 °С; время продувки до цикла 40 мин; время цикла 5 ч; время продувки после цикла 60 мин; подача кислоты 0,8 мл/мин. Потеря массы составила примерно 7,2 %.

Спекание образцов проводили в среде вакуума со скоростью нагрева 5 °С/мин до температуры 1330 °С, время выдержки – 2 ч.

Микроструктура центрального участка спеченного образца из стали марки 12X18H10T, полученного по МІМ-технологии из гранулята собственного производства после спекания, представлена на рис. 5.

В результате металлографического анализа образцов установлено, что микроструктура спеченного образца представляет собой зернистую феррито-карбидную структуру, а также наблюдается микропористость. Это свойственно для образцов, полученных по МІМ-технологии при использовании связующей системы на основе полиформальдегида.

В табл. 2 представлены результаты испытаний физико-механических характеристик спеченных образцов из гранулята собственного производства, которые соответствуют требованиям ГОСТ Р 59651 – 2021 для применяемого материала. В связи с этим термическую обработку и исследования физико-механических свойств не проводили.

Выводы

Разработан для применения по МІМ-технологии отечественный гранулят на основе смеси полиформальдегидного связующего и порошка нержавеющей стали марки 12X18H10T. Исследована микроструктура образцов, изготовленных по МІМ-технологии из разработанного гранулята. Установлено, что микроструктура после процесса спекания представляет собой зернистую феррито-карбидную структуру, выявлено



Рис.4. Внешний вид заготовок из разработанного гранулята
Fig. 4. Appearance of samples from the developed granulate

наличие остаточной микропористости. Показано, что полученные из разработанного гранулята стальные изделия по физико-механическим свойствам соответствуют требованиям нормативных документов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. German R.M. *Powder Metallurgy Science*. Princeton, New Jersey, USA: Metal Powder Industries Federation, 1994:472.
2. German R.M., Bose A. *Injection Molding of Metals and Ceramics*. Princeton, New Jersey, USA: Metal Powder Industries Federation, 1997:414.
3. Васильев А.И., Путырский С.В., Коротченко А.Ю., Анисимова А.Ю. МІМ-технология как способ изготовления точных деталей из металлопорошковых композиций, в том числе титановых сплавов. В кн.: *Научно-технический журнал «ТРУДЫ ВИАМ»*. 2021;3:16–27.
<https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-3-16-27>
4. Moghadam M.S., Fayyaz A., Ardestani M. Fabrication of titanium components by low-

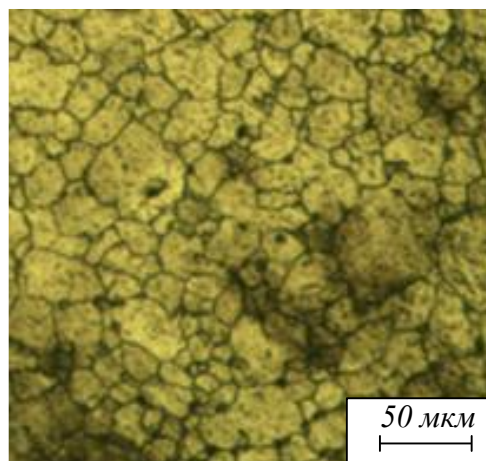


Рис. 5. Микроструктура образца из гранулята собственного производства после спекания

Fig. 5. Microstructure of the edge of a sample made from our own granulate after sintering

Физико-механические характеристики спеченных образцов

из порошка нержавеющей стали марки 12X18H10T

Table 2. Physical and mechanical characteristics of sintered samples of stainless steel powder 12Cr18Ni10Ti

Образец	Временное сопротивление при разрыве σ_B , кгс/мм ²	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	Относительное удлинение при разрыве, %	Плотность ρ , г/см ³	Твердость по шкале HV10
Опытный гранулят	57,8	20,1	53,8	7,597	165
Материал (ГОСТ Р 59651 – 2021)	не менее 45,9	не менее 17,0	не менее 40,0	не менее 7,5	не менее 120

pressure powder injection moulding using hydride-dehydride titanium powder. *Powder Technology*. 2021;377:70–79.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.075>

5. Hu K., Zou L., Shi Q., Hu R., Liu X., Duan B. Effect of titanium hydride powder addition on microstructure and properties of titanium powder injection molding. *Powder Technology*. 2020;367:225–232.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.03.059>

6. Askari A., Momeni V. Rheological investigation and injection optimization of Fe–2Ni–2Cu feedstock for metal injection molding process. *Materials Chemistry and Physics*. 2021;271:124926.

<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124926>

7. Пархоменко А.В., Амосов А.П., Самборук А.Р., Игнатов С.В., Костин Д.В., Шульцова А.С. Разработка отечественного порошкового гранулята со связующим на основе полиформальдегида для МИМ-технологии. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2013;4:8–13.

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2013-4-8-13>

8. Kumar A., Ashish P., Chaudhari P., Vemula P., Kanhu B. S., Nayak C., Date P. P. Effect of powder loading and testing condition on the different properties of metal injection molding parts. *Materials Today: Proceedings*. 2020;33(8):5492–5497.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.309>

9. Wermuth D.P., Paim T.C., Bertaco I., Zanatelli C., Naasani L.I.S., Slaviero M., Driemeier D., Tavares A.C., Martins V., Escobar C.F., Loureiro dos Santos L.A., Schaeffer L., Wink M.A. Mechanical properties, in vitro and in vivo biocompatibility analysis of pure iron porous implant produced by metal injection molding: A new eco-friendly feedstock from

natural rubber. *Materials Science & Engineering*. 2021;13:112532.

<https://doi.org/10.1016/j.msec.2021.112532>

10. Tafti A.A., Demers V., Vachon G., Brailovski V. Influence of powder size on the moldability and sintered properties of irregular iron-based feedstock used in low-pressure powder injection molding. *Powder Technology*. 2023;420:118395.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118395>

11. Mukund B.N., Hausnerova B. Variation in particle size fraction to optimize metal injection molding of water atomized 17-4PH stainless steel feedstocks. *Powder Technology*. 2020;368:130–136.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.058>

12. Machaka R., Ndlangamandl P., Seerane M. Capillary rheological studies of 17-4 PH MIM feedstocks prepared using a custom CSIR binder system. *Powder Technology*. 2018;326:37–43.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.051>

13. Krinitcyn M., Toropkov N., Pervikov A., Glazkova E., Lerner M. Characterization of nano/micro bimodal 316L SS powder obtained by electrical explosion of wire for feedstock application in powder injection molding. *Powder Technology*. 2021;394:225–233.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.061>

14. García C., Martín F., Herranz G., Berges C., Romero A. Effect of adding carbides on dry sliding wear behaviour of steel matrix composites processed by metal injection moulding. *Wear*. 2018;414-415:182–193.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.08.010>

15. Charpentier N., Barrière T., Bernard F., Boudeau N., Gilbin A., Vikner P. Procedia. PIM-like EAM of steel-tool alloy via bio-based polymer. *Procedia CIRP*. 2022;108:477–482.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.077>

16. Liu Y., Pan Y., Sun J., Wu X., Zhang J., Kuang F., Lu X. Metal injection molding of high-performance Ti composite using hydride-dehydride (HDH) powder. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023;89:328–337. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.064>
17. Thavanayagam G., Swan J. E. A new model for predicting the flow properties of Ti–6Al–4V–MIM feedstocks. *Powder Technology*. 2022;401:117306. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117306>
18. Dawari C.K., Haq I., Mönkkönen K., Suvanto M., Saarinen J.J. Reduced sliding friction on flat and microstructured metal injection molded (MIM) WC-Co hard metals with MoS₂ composite lubricants. *Tribology International*. 2021;160:107020. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107020>
19. Zhao Z., Liu R., Chen J., Xiong X. Additive manufacturing of cemented carbide using analogous powder injection molding feedstock. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2023;111:106095. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2022.106095>
20. Zhang Y., Ma R., Feng S., Cheng L., Davies P.A., Yu P. Microstructures and magnetic properties of Fe-35%Co alloy fabricated by metal injection molding *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020;497:165982. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165982>
21. Ma R., Chang L., Dong Y., Ye S., Si J., Yao K., Yu P. Magnetic properties of soft magnetic composites fabricated by injection molding of bimodal amorphous Fe₇₃Si₁₁B₁₁C₃Cr₂ and crystalline Fe₅₀Co₅₀ powders. *Powder Technology*. 2022;397:116986. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.11.030>
22. Naranjo J.A., Berges C., Campana R., Herranz G. Rheological and mechanical assessment for formulating hybrid feedstock to be used in MIM & FFF. *Results in Engineering*. 2023;19:101258. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101258>
23. Пархоменко А.В., Амосов А.П., Самборук А.Р. Развитие применения металлических порошков для MIM-технологии. В кн.: *Высокие технологии в машиностроении: Материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием*. Самара: изд. Самарского гос. техн. ун-та. 2024:285–289.
2. German R.M., Bose A. *Injection Molding of Metals and Ceramics*. Princeton, New Jersey, USA: Metal Powder Industries Federation, 1997:414.
3. Vasil'ev A.I., Putyrskii S.V., Korotchenko A.Yu., Anisimova A.Yu. MIM technology as a method of manufacturing precision parts from metal powder compositions, including titanium alloys. In: *Scientific and Technical Journal "PROCEEDINGS of VIAM"*. 2021;3:16–27. (In Russ.). <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-3-16-27>
4. Moghadam M.S., Fayyaz A., Ardestani M. Fabrication of titanium components by low-pressure powder injection moulding using hydride-dehydride titanium powder. *Powder Technology*. 2021;377:70–79. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.075>
5. Hu K., Zou L., Shi Q., Hu R., Liu X., Duan B. Effect of titanium hydride powder addition on microstructure and properties of titanium powder injection molding. *Powder Technology*. 2020;367:225–232. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.03.059>
6. Askari A., Momeni V. Rheological investigation and injection optimization of Fe–2Ni–2Cu feedstock for metal injection molding process. *Materials Chemistry and Physics*. 2021;271:124926. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124926>
7. Parkhomenko A.V., Amosov A.P., Samboruk A.R., Ignatov S.V., Kostin D.V., Shul'timova A.S. Development of domestic powder granulate with a binder based on polyformaldehyde for MIM technology. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2013;4:8–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2013-4-8-13>
8. Kumar A., Ashish P., Chaudhari P., Vemula P., Kanhu B. S., Nayak C., Date P. P. Effect of powder loading and testing condition on the different properties of metal injection molding parts. *Materials Today: Proceedings*. 2020;33(8):5492–5497. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.309>
9. Wermuth D.P., Paim T.C., Bertaco I., Zanatelli C., Naasani L.I.S., Slaviero M., Driemeier D., Tavares A.C., Martins V., Escobar C.F., Loureiro dos Santos L.A., Schaeffer L., Wink M.A. Mechanical properties, in vitro and in vivo biocompatibility analysis of pure iron porous implant produced by metal injection molding: A new eco-friendly feedstock from natural rubber. *Materials Science & Engineering*. 2021;13:112532. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2021.112532>

REFERENCES

1. German R.M. *Powder Metallurgy Science*. Princeton, New Jersey, USA: Metal Powder Industries Federation, 1994:472.

10. Tafti A.A., Demers V., Vachon G., Brailovski V. Influence of powder size on the moldability and sintered properties of irregular iron-based feedstock used in low-pressure powder injection molding. *Powder Technology*. 2023;420:118395.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118395>
11. Mukund B.N., Hausnerova B. Variation in particle size fraction to optimize metal injection molding of water atomized 17-4PH stainless steel feedstocks. *Powder Technology*. 2020;368:130–136.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.058>
12. Machaka R., Ndlangamandl P., Seerane M. Capillary rheological studies of 17-4 PH MIM feedstocks prepared using a custom CSIR binder system. *Powder Technology*. 2018;326:37–43.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.051>
13. Krinitcyn M., Toropkov N., Pervikov A., Glazkova E., Lerner M. Characterization of nano/micro bimodal 316L SS powder obtained by electrical explosion of wire for feedstock application in powder injection molding. *Powder Technology*. 2021;394:225–233.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.061>
14. García C., Martín F., Herranz G., Berges C., Romero A. Effect of adding carbides on dry sliding wear behaviour of steel matrix composites processed by metal injection moulding. *Wear*. 2018;414-415:182–193.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.08.010>
15. Charpentier N., Barrière T., Bernard F., Boudeau N., Gilbin A., Vikner P. Procedia. PIM-like EAM of steel-tool alloy via bio-based polymer. *Procedia CIRP*. 2022;108:477–482.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.077>
16. Liu Y., Pan Y., Sun J., Wu X., Zhang J., Kuang F., Lu X. Metal injection molding of high-performance Ti composite using hydride-dehydride (HDH) powder. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023;89:328–337.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.064>
17. Thavanayagam G., Swan J. E. A new model for predicting the flow properties of Ti–6Al–4V–MIM feedstocks. *Powder Technology*. 2022;401:117306.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117306>
18. Dawari C.K., Haq I, Mönkkönen K., Suvanto M., Saarinen J.J. Reduced sliding friction on flat and microstructured metal injection molded (MIM) WC-Co hard metals with MoS₂ composite lubricants. *Tribology International*. 2021;160:107020.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107020>
19. Zhao Z., Liu R., Chen J., Xiong X. Additive manufacturing of cemented carbide using analogous powder injection molding feedstock. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2023;111:106095.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2022.106095>
20. Zhang Y., Ma R., Feng S., Cheng L., Davies P.A., Yu P. Microstructures and magnetic properties of Fe – 35 % Co alloy fabricated by metal injection molding. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020;497:165982.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165982>
21. Ma R., Chang L., Dong Y., Ye S., Si J., Yao K., Yu P. Magnetic properties of soft magnetic composites fabricated by injection molding of bimodal amorphous Fe₇₃Si₁₁B₁₁C₃Cr₂ and crystalline Fe₅₀Co₅₀ powders. *Powder Technology*. 2022;397:116986.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.11.030>
22. Naranjo J.A., Berges C., Campana R., Herranz G. Rheological and mechanical assessment for formulating hybrid feedstock to be used in MIM & FFF. *Results in Engineering*. 2023;19:101258.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101258>
23. Parkhomenko A.V., Amosov A.P., Samboruk A.R., Ignatov S.V., Kostin D.V., Shul'timova A.S. Development of domestic powder granulate with a binder based on polyformaldehyde for MIM technology. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2013;4:8–13. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Андрей Валерьевич Пархоменко, аспирант кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», Самарский государственный технический университет

E-mail: parhomandr@gmail.com

ORCID: 0009-0007-0442-0044

SPIN-код: 3996-1182

Александр Петрович Амосов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», Самарский государственный технический университет

E-mail: egundor@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-1994-5672

SPIN-код: 3429-5946

Александр Михайлович Пастухов, аспирант кафедры «Информационно-измерительная техника и метрология», Пензенский государственный университет

E-mail: alexpastuch@mail.ru

ORCID: 0009-0003-6566-9872

SPIN-код: 5635-6344

Information about the authors:

Andrei V. Parkhomenko, Graduate Student of the Department of Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials, Samara State Technical University

E-mail: parhomandr@gmail.com

ORCID: 0009-0007-0442-0044
SPIN-код: 3996-1182

Aleksandr P. Amosov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department of the Department of Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials, Samara State Technical University

E-mail: egundor@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-1994-5672

SPIN-код: 3429-5946

Alexandr M. Pastukhov, Graduate Student of the Department of Information and Measuring Equipment and Metrology, Penza State University

E-mail: alexpastuch@mail.ru

ORCID: 0009-0003-6566-9872
SPIN-код: 5635-6344

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 01.08.2025

После доработки 01.09.2025

Принята к публикации 05.09.2025

Received 01.08.2025

Revised 01.09.2025

Accepted 05.09.2025