



УДК 621.762

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-3-15-24>

Научная статья

Research article



Разработка гранулята на полиформальдегидном связующем на основе порошка нержавеющей стали 09X16H4Б для МІМ-технологии

А. В. Пархоменко¹, А. П. Амосов¹, А. М. Пастухов²¹ Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244² Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40✉ egundor@yandex.ru

Аннотация. Металлические порошки нержавеющей стали являются наиболее распространенными исходными материалами, применяемыми для производства малогабаритных высокоточных машиностроительных деталей по технологии инъекционного формования металлических порошков с расплавами полимеров (МІМ-технологии). Настоящая работа посвящена разработке состава и технологических режимов изготовления исходного сырья (гранулята) для производства деталей по МІМ-технологии из отечественных компонентов: порошка нержавеющей стали мартенситного класса 09X16H4Б, связующего на основе полиформальдегида и технологических добавок (стеариновой кислоты, пчелиного воска и полиэтилена высокого давления). Исходный порошок нержавеющей стали имел сферическую форму частиц с размером основной массы частиц в диапазоне от 8 до 23 мкм. С применением сканирующей электронной микроскопии, метода определения показателя текучести расплава термопластов и пикнометрического метода исследовались микроструктуры, реологические и физические свойства полученных гранулятов. Установлены зависимости показателя текучести расплава (ПТР) от содержания исходных компонентов гранулята, соотношения металлической и полимерной частей, количества и вида технологических добавок, гранулометрического состава металлической части. Опытным путем определена оптимальная рецептура гранулята. Приведены результаты исследования микроструктуры и физических свойств опытных образцов, изготовленных по МІМ-технологии, в сравнении со спеченными образцами из импортного гранулята марки Catamold®. Показано, что для изделий, полученных по МІМ-технологии, целесообразно использовать типовые режимы термообработки, поскольку схемы фазовых превращений не отличаются от традиционных для данного вида стали. Установлено, что образцы из разработанного гранулята соответствуют требованиям нормативных документов на применяемый материал и не уступают по физическим показателям гранулятам импортного производства.

Ключевые слова: МІМ-технология, инъекционное 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 гранулята на полиформальдегидном связующем на основе порошка нержавеющей стали 09X16H4Б для МІМ-технологии. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2025;19(3):15–24. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-3-15-24>

Development of a polyoxymethylene-based feedstock for metal injection molding using 09Cr16Ni4Nb stainless steel powder

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

¹ Samara State Technical University

244 Molodogvardeiskaya Str., Samara 443100, Russia

² Penza State University

40 Krasnaya Str., Penza 440026, Russia

 egundor@yandex.ru

Abstract. Stainless steel powders are among the most widely used raw materials for the production of small, high-precision engineering components by metal injection molding (MIM), a process that combines metal powders with molten polymer binders. This study focuses on the development of feedstock composition and processing parameters for MIM production using domestically sourced components: a martensitic stainless steel powder grade 09Cr16Ni4Nb, a polyoxymethylene-based binder, and processing additives including stearic acid, beeswax, and low-density polyethylene. The starting stainless steel powder had a spherical morphology with a predominant particle size range of 8–23 μm . Scanning electron microscopy, melt flow index (MFI) testing, and helium pycnometry were employed to investigate the microstructure, rheological behavior, and physical properties of the resulting feedstock granules. Dependencies of MFI on the feedstock composition, metal-to-polymer ratio, type and content of additives, and particle size distribution of the metallic phase were established. The optimal feedstock formulation was determined experimentally. The microstructure and physical properties of sintered samples produced from the developed feedstock were evaluated and compared with those made from imported Catamold[®] feedstock. It was demonstrated that standard heat treatment modes are suitable for MIM-fabricated parts, as the phase transformation behavior of the studied steel does not differ from that of conventionally processed materials. The results confirm that components manufactured from the in-house feedstock comply with relevant regulatory standards and match the performance of their imported counterparts.

Keywords: MIM technology, injection molding, powder injection molding, feedstock, stainless steel powder, binder, polyoxymethylene, sintering, composition, structure

For citation: Parkhomenko A.V., Amosov A.P., Pastukhov A.M. Development of a polyoxymethylene-based feedstock for metal injection molding using 09Cr16Ni4Nb stainless steel powder. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2025;19(3):15–24. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-3-15-24>

Введение

Технология инъекционного формования металлических порошков (*metal injection molding* – МИМ-технология) представляет собой сочетание процессов порошковой металлургии и литья полимеров под давлением. Данный метод заключается в получении смесей металлических порошков и полимерных связующих, формовании из них заготовок деталей методом литья под давлением с последующим удалением полимерного связующего и спеканием металлической части. Изделия, произведенные по МИМ-технологии, характеризуются сочетанием геометрической сложности и точности, сопоставимой с полимерными изделиями, с механической прочностью, свойственной металлам [1]. Ключевым достоинством МИМ-технологии является возможность крупносерийного производства малоразмерных деталей сложной формы, не требующих дополнительной механической обработки.

В качестве исходного материала в МИМ-технологии используется гранулят (фидсток) – композиционный гранулированный материал, состоящий из мелкодисперсных металлических порошков, смешанных с полимерным связующим. Оптимизация состава фидстока является важным этапом для обеспечения качественного МИМ-процесса. Объемная доля металлического порошка в грануляте обычно составляет 50–65 %, но может быть увеличена до 80 % и более. Однако с ростом концентрации металлического порошка повышается вязкость гранулята, что может негативно сказаться на процессе литья под давлением [2; 3].

Характеристики металлических порошков оказывают значительное влияние на свойства конечных изделий, получаемых методом МИМ [4]. Одним из ключевых требований к порошкам является низкая свободная поверхностная энергия, способствующая эффективному смешению со связующим. Это требование в наибольшей степени

выполняется при использовании порошков со сферическими частицами размером до 50 мкм, предпочтительно от 1 до 5 мкм. Например, исследованием гранулометрического состава гранулята Catamold® 42CrMo4 компании BASF установлено, что он состоит из тонкого металлического порошка сферической формы с размером частиц от 1 до 5 мкм [5].

Важными характеристиками порошка также являются форма частиц, гранулометрический состав и состояние их поверхности. Форма частиц влияет на реологические свойства смеси и сохранение формы детали при термической обработке. Частицы неправильной формы могут повышать прочность изделия после удаления связующего, но снижают плотность упаковки и увеличивают вязкость смеси, что требует большего количества связующего и может приводить к избыточной пористости в спеченных деталях. То же касается сферических частиц с негладкой поверхностью, имеющих выступы и выемки [6]. Сферические частицы с гладкой поверхностью являются оптимальными для МИМ-технологии благодаря высокой плотности упаковки и низкой вязкости потока, хотя они могут снижать прочность изделия после удаления связующего. Наибольшее преимущество в МИМ-процессе обеспечивают смеси сферических частиц и частиц неправильной формы [7; 8].

Средний размер частиц порошка также является важным параметром в МИМ-технологии. Мелкие порошки более склонны к агломерации, что делает их предпочтительными к применению в МИМ [9]. Минимальный размер частиц ограничивается текучестью смеси порошка и связующего: при повышении температуры мелкие частицы делают смесь менее текучей, что негативно сказывается на инъекционном формовании. Максимальный размер частиц влияет на плотность спеченного изделия: чем больше размер частиц, тем ниже вероятность достижения высокой плотности [10]. Улучшения структуры конечного изделия можно достичь, используя материал с двумя типами частиц – крупными и мелко-дисперсными, что уменьшает пористость за счет заполнения промежутков между крупными частицами. В исследовании [11] показано, что широкий диапазон гранулометрического состава способствует более эффективному уплотнению, но усложняет распределение гранулята на стадии формования по причине снижения однородности смеси порошка и связующего. Регулирование формы и размера сферических частиц и частиц неправильной формы позволяет достичь высоких плотностей упаковки и специфических свойств изделий [12].

Перечень металлов, используемых в МИМ-технологии, разнообразен и включает низколегированные стали, жаропрочные и коррозионно-стойкие сплавы, а также материалы на основе меди, никеля, кобальта

и титана, интерметаллические и магнитные сплавы, карбиды и бориды [13]. В отличие от традиционных методов металлообработки, где до 80 % материала уходит в стружку, МИМ-технология демонстрирует коэффициент использования материала на уровне ~99 %, что особенно важно при работе с дорогостоящими металлами, такими как нержавеющие стали и титановые сплавы. В последних зарубежных научных работах часто встречается применение сферических порошков мартенситной нержавеющей стали 17-4PH [14–21]. Например, в работе [19] использовался газораспыленный порошок нержавеющей стали 17-4PH с размером частиц от 4,8 до 30 мкм. В исследовании [20] применялся водораспыленный порошок нержавеющей стали 17-4PH с формой, близкой к сферической. Авторы [21] использовали четыре различных порошка нержавеющей стали 17-4PH с различными размерами и формами частиц.

Ключевую роль в производстве деталей по МИМ-технологии играет связующее, которое должно обеспечивать низкую вязкость при высокой загрузке порошка и быть инертным для эффективного смешивания. Обычно используются полимеры или воски с низкой молекулярной массой. Для регулирования свойств связующего применяются добавки. Важным требованием к связующему является его способность обеспечивать достаточную вязкость для формирования изделий сложной геометрической формы. Обязательное свойство связующего – его способность к смачиванию поверхности порошкообразного материала для оптимизации процессов смешивания и придания формы конечному изделию. С этой целью в технологический процесс вводят поверхностно-активные вещества (ПАВ) – такие, как титанаты, силаны, фосфаты и стеараты, которые снижают вязкость смеси и увеличивают содержание сухого вещества за счет создания межповерхностной связи между порошком и связующим.

Учитывая, что МИМ-технология предполагает изготовление изделий сложной геометрической формы, одним из важных требований к компонентам связующего является достаточная прочность. Высокие показатели прочности определяет полиформальдегид (полиацеталь, полиоксиметилен) в составе связующего. Полиформальдегидная система обеспечивает отличное проливание деталей, сохранение их геометрической формы. Изготовленные из данного гранулята изделия обладают высокими показателями прочности и твердости, а также хорошими усталостными свойствами и минимальной усадкой [22–24]. Одной из широко распространенных связующих систем в МИМ-технологии является композиция на основе полиформальдегида, полиэтилена высокого давления и стеариновой кислоты. Эти компоненты обеспечивают хорошую сохранность формы детали

и ее целостность при повышенной пористости после удаления полиформальдегида [4].

Одним из наиболее значимых свойств исходной смеси для МИМ-технологии является ее однородность, которая обусловлена необходимостью минимизации разделения смеси на стадии литья под давлением, а также получения изотропной усадки после процессов выжигания и спекания. Неоднородная смесь может привести к возникновению видимых дефектов в конечном спеченном изделии, а также к чрезмерной пористости, образованию трещин и деформации. Для достижения необходимой однородности применяются различные типы смесителей, дробилок, мельниц и шнековых экструдеров. Эффективное смешивание обеспечивается при равномерном сдвиге во всех областях смесителя. Наиболее успешным решением является двухшнековый экструдер, который сочетает интенсивный сдвиг с коротким временем обработки металлополимерной композиции при повышенных температурах [1].

Для оптимизации составов смеси связующее – порошок, а также для выбора модификаторов и добавок на этапе подготовки гранулята проводятся реологические испытания для определения характеристик текучести расплава. Расплавленный материал пропускается через сопло определенного диаметра при заданной температуре в течение 10 мин, после чего определяется показатель текучести расплава (ПТР), характеризующий способность подачи материала в пресс-форму литьевой машины.

Цель настоящей работы состояла в разработке отечественного металлопорошкового гранулята из порошка нержавеющей стали и полиформальдегидного связующего для изготовления стальных деталей по МИМ-технологии, а также в установлении взаимосвязей состава и структуры металлополимерной композиции и режимов ее обработки с физико-механическими, реологическими и эксплуатационными свойствами гранулятов и спеченных из них МИМ-деталей.

Методика исследований

Для разработки гранулята использовался сферический металлический порошок низкоуглеродистой нержавеющей стали марки 09Х16Н4Б, полученный методом газовой атомизации, производства АО «Полема» (г. Тула). В качестве полимерного связующего был выбран полиформальдегид (ПФЛ) марки «Технасет А-110» (ТУ 2226-020-11517367) производства НПП «Полипластик» (г. Москва). Поверхностно-активным веществом служили кислота стеариновая техническая (СК) марки Т-32 (ГОСТ 6484-96) производства ОАО «НЭФИС КОСМЕТИКС» (г. Казань) или пчелиный воск

(ГОСТ 21179-2000). В качестве добавки, удерживающей структуру материала после удаления связующего, применялся полиэтилен высокого давления (ПЭВД) 15813-020 (ГОСТ 16337-22) производства ПАО «Казаньоргсинтез» (г. Казань).

Гранулометрический состав металлического порошка определялся с использованием лазерного анализатора «Analysette 22 Compact» (компания «Fritsch GmbH», Германия). Исследование микроструктуры исходных материалов, а также гранулятов, разработанных на основе отечественных компонентов, проводилось с применением растрового электронного микроскопа JSM-6390A (Jeol, Япония). Реологические свойства гранулята изучались по ГОСТ 11645-73 на приборе по определению показателя текучести расплава «Modular Melt Flow 7026» (фирма «Ceast S.p.A.», Италия) при температуре 190 °С и нагрузке 21,6 кгс. Плотность и неоднородность измеряли с помощью гелиевого пикнометра «AccuPyc 1340» (Micromeritics, США). Твердость спеченных из гранулята изделий определялась по ГОСТ 9013-59 на испытательной машине-твердомере (WPM LEIPZIG, Германия). Исследования на сжатие и растяжение спеченных из гранулята образцов проводились по ГОСТ 18227-85 на испытательной машине «Instron 5988» (США).

Результаты и их обсуждение

Исходный порошок нержавеющей стали 09Х16Н4Б имел гранулометрический состав, представленный на рис. 1. Размер основной массы частиц находился в диапазоне от 8 до 23 мкм, что соответствует основным требованиям, предъявляемых к металлическим порошкам для производства МИМ-гранулята.

С целью определения оптимального соотношения между металлической и полимерной частями было изготовлено 8 партий гранулята с различными составами. При производстве гранулятов соблюдалась следующая последовательность смешивания компонентов: к порошку нержавеющей стали 09Х16Н4Б добавлялась стеариновая кислота (СК) или пчелиный воск (ПВ), затем вводился полиэтилен высокого давления (ПЭВД) и в последнюю очередь – полиформальдегид (ПФЛ). Гранулят изготавливался по следующему режиму:

Температура шнека, °С.	160–180
Частота вращения шнека, об/мин.	120–130
Частота резчика гранул, об/мин.	1100

Внешний вид полученного гранулята из порошка нержавеющей стали 09Х16Н4Б представлен на рис. 2.

В табл. 1 приведены результаты определения показателя текучести расплава (ПТР) и плотности для опытных партий гранулятов.

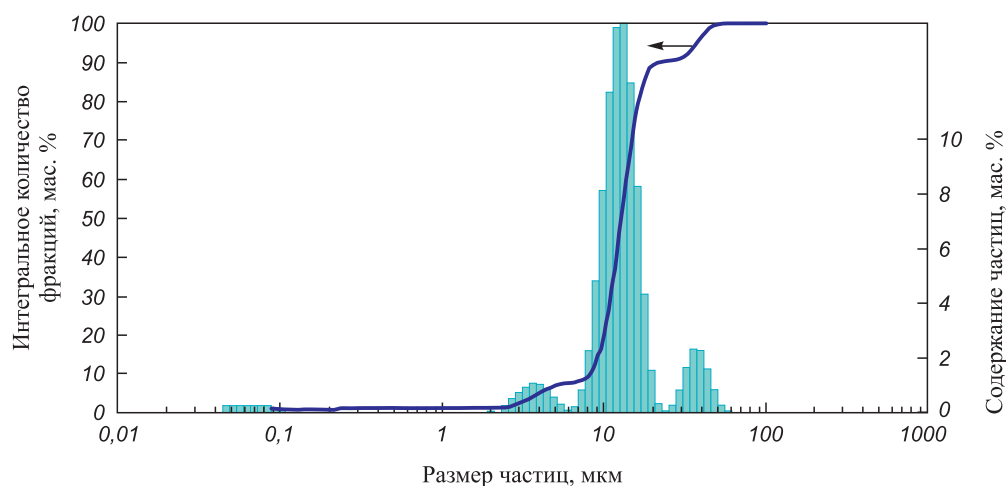


Рис. 1. Гранулометрический состав порошка нержавеющей стали 09X16H4Б

Fig. 1. Particle size distribution of the 09Cr16Ni4Nb stainless steel powder



Рис. 2. Внешний вид гранулята 09X16H4Б

Fig. 2. Appearance of the 09Cr16Ni4Nb feedstock granules

В качестве поверхностно-активного вещества использовались пчелиный воск и стеариновая кислота. Для составов с пчелиным воском (5–8) наблюдается более высокое значение ПТР, что, в свою очередь, приводит к более низкой плотности гранулята. Графики изменения показателя текучести расплава для исследуемых составов гранулята представлены на рис. 3.

Наиболее предпочтительными являются грануляты состава 2 (со стеариновой кислотой) и 6 (с пчелиным воском), которые рекомендованы к использованию для последующих исследований.

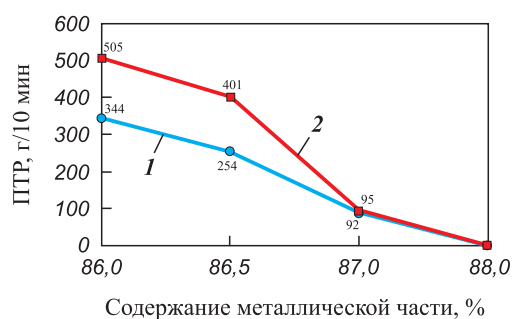


Рис. 3. Зависимости ПТР от содержания металлической части в грануляте

1 – состав гранулятов 1–4; 2 – состав гранулятов 5–8

Fig. 3. Dependences of MFI on metal powder content in the feedstock

1 – formulations 1–4; 2 – formulations 5–8

Таблица 1. Реологические и физические свойства гранулятов из порошка нержавеющей стали 09X16H4Б

Table 1. Rheological and physical properties of feedstock granules based on 09Cr16Ni4Nb stainless steel powder

№ состава гранулята	Содержание компонентов, мас. %					ПТР, г/10 мин	Плотность, г/см ³
	09X16H4Б	ПФЛ	ПЭВД	СК	ПВ		
1	86,0	11,5	1,0	1,5	–	344	4,2
2	86,5	11,0	1,0	1,5	–	254	4,6
3	87,0	10,5	1,0	1,5	–	92	4,5
4	88,0	9,5	1,0	1,5	–	0	4,6
5	86,0	11,5	1,0	–	1,5	505	4,2
6	86,5	11,0	1,0	–	1,5	401	4,2
7	87,0	10,5	1,0	–	1,5	95	4,4
8	88,0	9,5	1,0	–	1,5	0	4,5

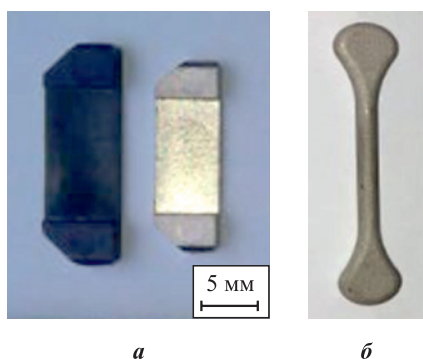


Рис. 4. Внешний вид образцов из разработанного гранулята
a – заготовка (слева) и спеченная деталь «подложка» (справа)
б – образцы-свидетели

Fig. 4. Appearance of samples made from the developed feedstock
stock
a – green part (left) and sintered substrate component (right)
б – reference test sample

Из гранулята состава 2 были изготовлены заготовки детали «подложка». На рис. 4, *a* представлены заготовка детали (слева) и спеченная деталь «подложка» (справа). Для сравнительного анализа также были произведены образцы из импортного гранулята Catamold® Stainless 17-4PH, а для исследования микроструктуры и испытания механических свойств – образцы-свидетели (см. рис. 4, *б*), размеры которых соответствуют ГОСТ Р 59651-2021.

Литье под давлением заготовок из порошка нержавеющей стали 09X16H4Б проводилось на термопластавтомате по следующему режиму:

Температура пресс-формы, °C	130 ± 10
Давление литья, МПа	120 ± 10
Дозировка (навеска), см ³	10
Температура по зонам, °C:	
сопло	190 ± 5
1 зона	175 ± 5
2 зона	180 ± 5
3 зона	185 ± 5
Выдержка в пресс-форме, с:	
под давлением	5
при охлаждении	10

Исследование микроструктуры заготовок из металлополимерной композиции показало, что образцы из импортного гранулята Catamold® (рис. 5, *б*) характеризуются меньшей однородностью и наличием скоплений металлической фазы размером до 15 мкм, в то время как в заготовках из гранулята собственного производства (рис. 5, *a*) наблюдается равномерное распределение частиц.

Удаление связующего из образцов производилось в печи каталитическим методом в парах концентрированной азотной кислоты; потеря массы составила ~7,5 %. Режим удаления связующего из заготовок из

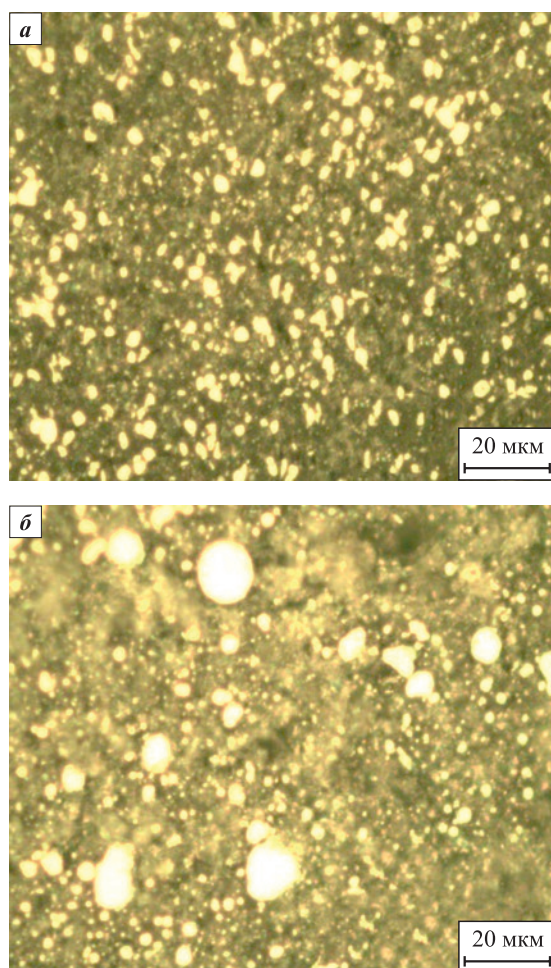


Рис. 5. Микроструктура заготовки из гранулята собственного производства (*a*) и из гранулята Catamold® (*б*)

Fig. 5. Microstructure of the green part made from the in-house feedstock (*a*) and from Catamold® feedstock (*б*)

порошка нержавеющей стали 09X16H4Б приведен ниже:

Температура, °C	112 ± 5
Время продувки, мин:	
до цикла	40
после цикла	60
Время цикла, ч	5
Подача кислоты, мл/мин	0,8

Спекание образцов осуществлялось в среде вакуума со скоростью нагрева 5 °C/мин до температуры 1330 °C, время выдержки составляло 2 ч.

Микроструктуры центрального участка и края спеченного образца из стали 09X16H4Б, полученного по МИМ-технологии из гранулята собственного производства, представлены на рис. 6.

В результате металлографического анализа образцов установлено, что микроструктура спеченного образца неоднородна. Структура края образца представляет собой мартенсит, а центральный участок имеет зернистую феррито-карбидную структуру, при

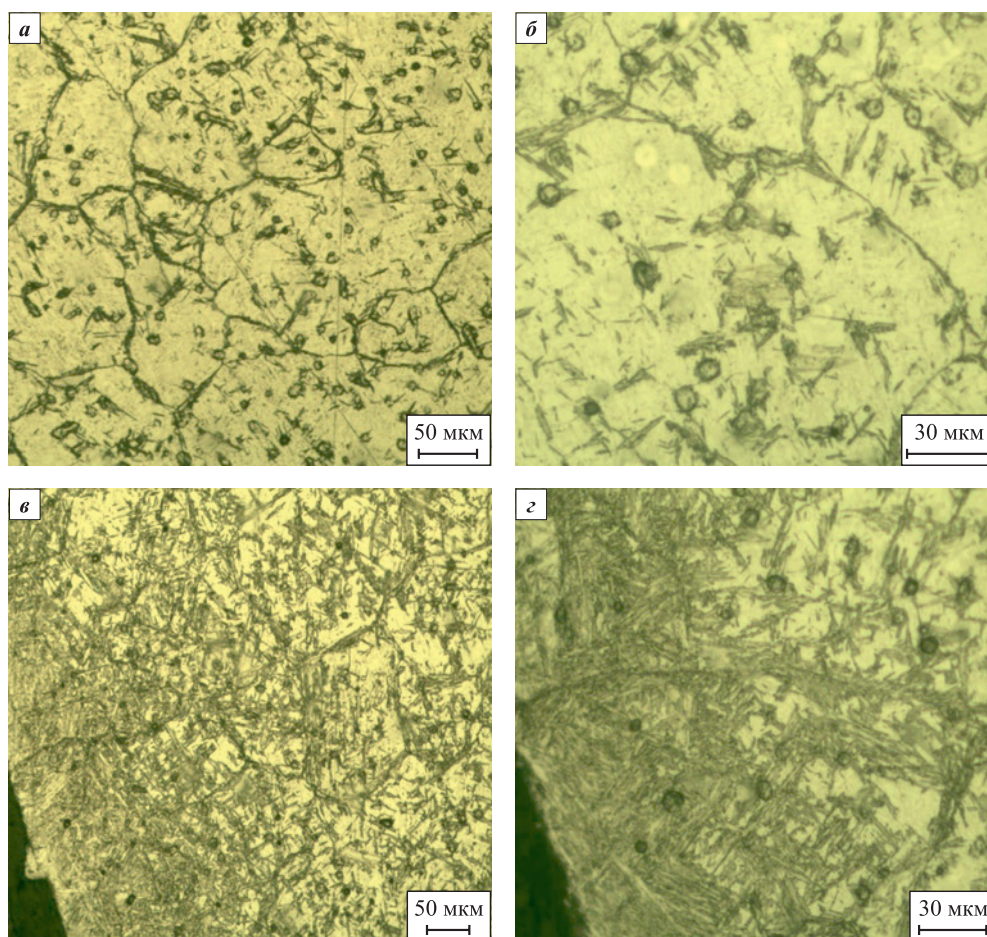


Рис. 6. Микроструктура центрального участка (*а, б*) и края (*в, з*) образца из гранулята собственного производства после спекания

Fig. 6. Microstructure of the central region (*a, b*) and edge (*v, z*) of the sample produced from the in-house feedstock after sintering

этом наблюдаются отдельные области с мартенситной структурой, а белые участки свидетельствуют о содержании остаточного аустенита. Также в структуре отмечена микропористость, что свойственно для образцов, полученных по МІМ-технологии.

В табл. 2 представлены результаты испытаний физико-механических характеристик спеченных

образцов из гранулята собственного производства в сравнении с характеристиками импортного гранулята Catamold® Stainless 17-4PH и с требованиями, содержащимися в ГОСТ Р 59651-2021.

Установлено, что физико-механические свойства спеченных образцов соответствуют требованиям ГОСТ Р 59651-2021 на применяемый материал

Таблица 2. Физико-механические характеристики спеченных образцов из порошка нержавеющей стали 09X16H4Б

Table 2. Physical and mechanical characteristics of sintered samples made from 09Cr16Ni4Nb stainless steel powder

Материал	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 09X16H4Б	162	106	8	7,87	440
Catamold® Stainless 17-4PH	81–97	66–76	≥6	≥7,65	264–301
ГОСТ Р 59651-2021	не менее 110	не менее 93	не менее 8	не менее 7,50	не менее 330

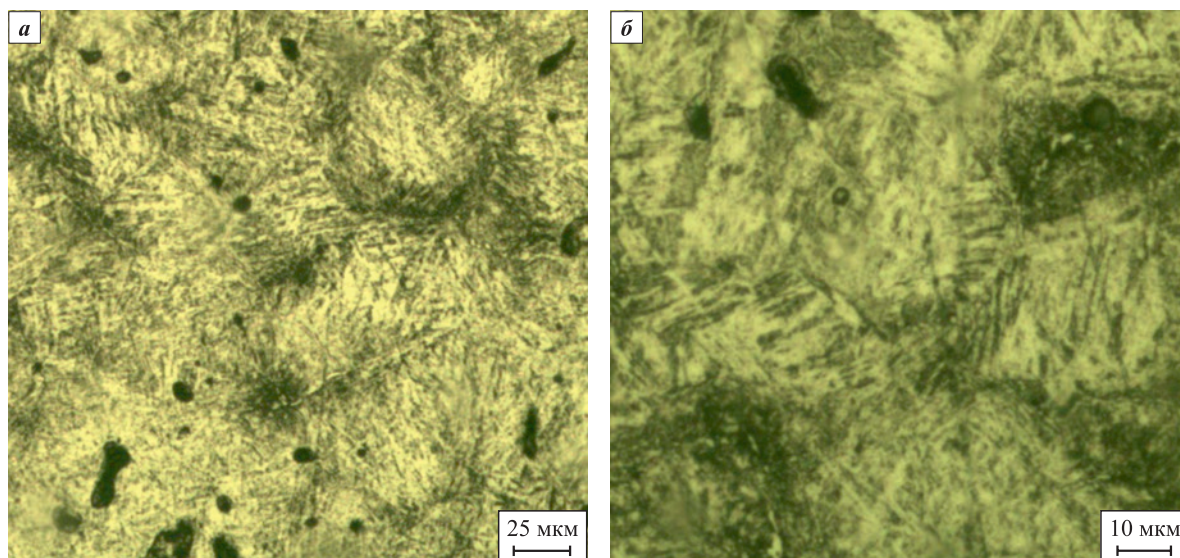


Рис. 7. Микроструктура образца после термической обработки

Fig. 7. Microstructure of the sample after heat treatment

и превосходят характеристики импортного аналога. Спеченные образцы обладают высокими показателями прочности и твердости, что свидетельствует о повышенной хрупкости образцов.

Далее на образцах был проведен цикл термической обработки согласно ГОСТ 977-88 по следующему режиму:

- нормализация при $t = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\tau = 30\text{ мин}$) в вакууме;
- отпуск при $t = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\tau = 2\text{ ч}$) в вакууме;
- закалка с выдержкой при $t = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\tau = 30\text{ мин}$) в вакууме и охлаждением до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- обработка холодом при $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\tau = 4\text{ ч}$);
- отпуск при $t = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\tau = 2\text{ ч}$) в вакууме.

Обработка холодом была применена для уменьшения количества остаточного аустенита и повышения его стабильности в образцах [24].

После термической обработки был проведен анализ микроструктуры образцов, который показал, что структура представляет собой среднеигльчатый мартенсит отпуска, в ней также наблюдается остаточная микропористость, что свойственно для образцов, полученных по МИМ-технологии (рис. 7). Микропористость не контролируется, так как заклю-

чение о пригодности деталей осуществляется по физико-механическим свойствам.

Физико-механические свойства образцов после термической обработки представлены в табл. 3.

Результаты исследования показали, что применение термической обработки позволяет добиться повышения пластичности и уменьшения твердости и хрупкости материала за счет снятия внутренних напряжений в образцах.

Выводы

1. Разработаны для применения в МИМ-технологии отечественные грануляты на основе смеси полиформальдегидного связующего и порошка нержавеющей стали марки 09X16H4Б.

2. Установлено влияние соотношения исходных компонентов в смеси полимеров с металлическим порошком на реологические свойства гранулята.

3. Определено оптимальное соотношение между металлической и полимерной частями гранулята. Наиболее оптимальным является следующий состав гранулята, %: 09X16H4Б – 86,5, полиформальдегид – 11,0, ПЭВД – 1,0, СК – 1,5.

Таблица 3. Физико-механические свойства образцов из порошка нержавеющей стали 09X16H4Б после термической обработки

Table 3. Physical and mechanical properties samples of stainless steel powder 09Cr16Ni4Nb after heat treatment

Материал	Временное сопротивление при разрыве, σ_b , кгс/мм ²	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	Относительное удлинение при разрыве, %	Твердость по шкале HV10	Плотность ρ , г/см ³
Гранулят 09X16H4Б	127	107	9	355	7,69
ГОСТ Р 59651-2021	не менее 110	не менее 93	не менее 8	не менее 330	не менее 7,50

4. Исследованы микроструктуры спеченных образцов до и после термической обработки. Показано, что для изделий, полученных по МИМ-технологии, целесообразно использовать типовые режимы термообработки, поскольку схемы фазовых превращений не отличаются от традиционных для данного вида стали.

5. Установлено, что полученные из разработанного гранулята стальные изделия по физико-механическим свойствам соответствуют требованиям нормативных документов на применяемый материал и не уступают аналогам, изготовленным из импортного гранулята.

Список литературы / References

- German R.M., Bose A. Injection molding of metals and ceramics. New Jersey, USA: Metal Powder Industries Federation, 1997. 414 p.
- Liu Z.Y., Loh N.H., Tor S.B., Khor K.A. Characterization of powder injection molding feedstock. *Materials Characterization*. 2002;49(4):313–320.
[https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(02\)00282-6](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(02)00282-6)
- Li Y., Jiang F., Zhao L., Huang B. Critical thickness in binder removal process for injection molded compacts. *Materials Science and Engineering: A*. 2003;362(1–2):292–299.
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00613-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00613-0)
- Пархоменко А.В., Амосов А.П., Самборук А.Р., Игнатов С.В., Костин Д.В., Шультимова 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>
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 polyformaldehyde-based binder for MIM-technology. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2015;56(1):68–72.
<https://doi.org/10.3103/S1067821215010149>
- Пархоменко А.В., Амосов А.П., Самборук А.Р., Ермошкин А.А. Исследование состава и структуры импортного гранулята для МИМ-технологии. В сб.: *Высокие технологии в машиностроении*: Материалы Всероссийской научно-технической интеллектуальной конференции с международным участием (Самара, 11–17 ноября 2010 г.). Самара: СамГТУ, 2010. С. 202–204.
- Contreras J.M., Jiménez-Morales A., Torralba J.M. Influence of particle size distribution and chemical composition of the powder on final properties of Inconel 718 fabricated by Metal Injection Moulding (MIM). *PIM International*. 2010;4(1):67–70.
- Ahn S., Park S.J., Lee Sh., Atre S.V., German R.M. Effect of powders and binders on material properties and molding parameters in iron and stainless steel powder injection molding process. *Powder Technology*. 2009;193(2):162–169.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.03.010>
- Mahmud N.N., Azam F.A.A., Ramli M.I., Foudzi F.M., Ameyama K., Sulong A.B. Rheological properties of irregular-shaped titanium-hydroxyapatite bimodal powder composite moulded by powder injection moulding. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;11:2255–2264.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.016>
- Okubo K., Tanaka Sh., Ito H. The effects of metal particle size and distributions on dimensional accuracy for micro parts in micro metal injection molding. *Microsystem Technologies*. 2010;16:2037–2041.
<https://doi.org/10.1007/s00542-010-1122-9>
- Sotomayor M.E., Várez A., Levenfeld B. Influence of powder particle size distribution on rheological properties of 316L powder injection molding feedstocks. *Powder Technology*. 2010;200(1–2):30–36.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.02.003>
- Meendering D.N., Malhotra D., Baltich L.K. Conditioning metal powder for injection molding: Patent 5314658 (USA). 1994.
- Barriere T., Liu B., Gelin J.C. Analyses of powder segregation in MIM. *Metal Powder Report*. 2002;57(5):30–33.
[https://doi.org/10.1016/S0026-0657\(02\)80173-4](https://doi.org/10.1016/S0026-0657(02)80173-4)
- Пархоменко А.В., Амосов А.П., Самборук А.Р. Развитие применения металлических порошков для МИМ-технологии. В сб.: *Высокие технологии в машиностроении*: Материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (Самара, 10–12 апреля 2024 г.). Самара: СамГТУ, 2024. С. 285–289.
- Pandey A.K., Chaudhari A.P., Vemula P., Sunil B., Nayak K.Ch., 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>
- Haihong Ma, Shuo Li, Zhesheng Jin, Yiwen Tian, Fengmei Ren, Zhengfa Zhou, Weibing Xu. Effect of 17-4PH stainless steel powders interaction on feedstocks. *Powder Technology*. 2020;372:204–211.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.106>
- Mukundab B.N., Hausnerovaac 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>
- Machaka R., Ndlangamandla P., Seeranea M. Capillary rheological studies of 17-4PH 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>
- Basir A., Bakar A., Nashrah S., Jamadon H., Muhammad N. Feedstock properties and debinding mechanism of yttria-stabilized zirconia / stainless steel 17-4PH micro-components fabricated via two-component micro-powder injection molding process. *Ceramics International*. 2021;47(14):20476–20485.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.057>
- 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*.

ing. 2023;19:101258.

<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101258>

20. Langlais D., Demers V., Brailovski V. Rheology of dry powders and metal injection molding feedstocks formulated on their base. *Powder Technology*. 2022;396(A):13–26. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.10.039>
21. Ammosova L., Cano S.C., Schuschnigg S., Kukla C., Mönkkönen K., Suvanto M., Gonzalez-Gutierrez J. Effect of metal particle size and powder volume fraction on the filling performance of powder injection moulded parts with a micro textured surface. *Precision Engineering*. 2021;72:604–612. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.06.014>

22. Wohlfrom H., Maat R.F.J., Blomacher M. Metal powder injection molding material and metal powder injection molding method: Patent 2006/0099103A1 (USA). 2006.
23. Берлин А.А., Дебердеев Р.Я., Перухин Ю.В., Гарипов Р.М. Полиоксиметилены. М.: Наука, 2008. 286 с.
24. Гринберг Е.М., Гончаров С.С., Маркова Е.В. Влияние режимов термической обработки на количество остаточного аустенита в стали 09Х16Н4БЛ. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2012;6(2):280–285.
Grinberg E.M., Goncharov S.S., Markova E.V. The heat treatment modes effect on residue austenite amount in 09Cr16Ni4Nb cast steel. *Izvestiya TulGU. Technical Sciences*. 2012;6(2):280–285. (In Russ.).

Сведения об авторах



Information about the Authors

Андрей Валерьевич Пархоменко – аспирант кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» (МПМН) Самарского государственного технического университета (СамГТУ)

ORCID: 0009-0007-0442-0044

E-mail: parhomandr@gmail.com

Александр Петрович Амосов – д.ф.-м.н., проф., заведующий кафедрой МПМН, СамГТУ

ORCID: 0000-0003-1994-5672

E-mail: egundor@yandex.ru

Александр Михайлович Пастухов – аспирант кафедры «Информационно-измерительная техника и метрология» Пензенского государственного университета

ORCID: 0009-0003-6566-9872

E-mail: alexpastuch@mail.ru

Andrei V. Parkhomenko – Graduate Student of the Department of Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials (MPMN), Samara State Technical University (SamSTU)

ORCID: 0009-0007-0442-0044

E-mail: parhomandr@gmail.com

Aleksandr P. Amosov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department of MPMN, SamSTU

ORCID: 0000-0003-1994-5672

E-mail: egundor@yandex.ru

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

ORCID: 0009-0003-6566-9872

E-mail: alexpastuch@mail.ru

Вклад авторов



Contribution of the Authors

А. В. Пархоменко – постановка задач исследования, планирование экспериментов, участие в проведении экспериментов, подготовка и оформление результатов экспериментов, участие в анализе и обсуждении результатов, написание и редактирование текста статьи.

А. П. Амосов – определение цели работы, обобщение полученных результатов, участие в написании статьи.

А. М. Пастухов – проведение экспериментов, подготовка и оформление результатов экспериментов, участие в анализе и обсуждении результатов.

A. V. Parkhomenko – formulation of research objectives, experimental planning, participation in experiments, preparation and presentation of experimental results, participation in data analysis and discussion, writing and editing of the manuscript.

A. P. Amosov – definition of the research goal, synthesis of the obtained results, participation in manuscript writing.

A. M. Pastukhov – conducting experiments, preparation and presentation of experimental results, participation in data analysis and discussion.

Статья поступила 31.03.2025 г.
Доработана 02.05.2025 г.
Принята к публикации 05.05.2025 г.

Received 31.03.2025
Revised 02.05.2025
Accepted 05.05.2025