

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ МІМ-ТЕХНОЛОГИИ

**А. С. Никиткин¹, А. Д. Семенов², А. М. Пастухов³,
И. А. Рубцов⁴, А. П. Цветков⁵, Е. А. Печерская⁶**

¹ ФНПЦ «ПО "Старт"» имени М. В. Проценко, Заречный, Пензенская обл., Россия

^{2, 3, 4, 5, 6} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ paul-startatom@yandex.ru, ² ad-semenov@mail.ru, ^{3, 5} iit@pnzgu.ru, ⁴ rui2000@yandex.ru, ⁶ peal@list.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматриваются методы контроля технологического процесса производства изделий с использованием МІМ-технологии (Metal Injection Molding), которая является перспективным направлением для достижения технологического суверенитета и модернизации производства. Цель работы – повышение параметров качества изделий, изготовленных методом МІМ-технологии посредством анализа ключевых этапов МІМ-процесса и контроля технологических режимов, обуславливающих дефекты изделий на каждом этапе. *Материалы и методы.* Представлены результаты исследования металлических порошков (нержавеющая сталь, титан, медь и др.), связующих компонентов (воск/полимер и полимер/полимер) на основе современных методов анализа: электронная микроскопия, лазерная дифракция, газовая пикнометрия, радиографический контроль, капиллярная и моментная реометрия. Проанализированы с точки зрения управления качеством этапы производства: приготовление гранулята, литье под давлением, удаление связующего (термический, растворный, каталитический методы) и спекание. *Результаты.* Установлено, что качество гранулята и равномерность распределения компонентов критически влияют на отсутствие дефектов в спеченных изделиях. Определены оптимальные параметры литья (температура, давление, скорость впрыска) и спекания (температурные профили, атмосфера печи). Показано, что современные методы контроля (например, масс-спектрометрия, лазерное сканирование) позволяют минимизировать дефекты и улучшить механические свойства изделий. *Выводы.* Применение комплексного контроля на всех этапах МІМ-технологии обеспечивает высокое качество продукции, снижение брака и соответствие требованиям для ответственных применений (аэрокосмическая отрасль, медицина). Особое внимание уделено необходимости стандартизации процессов и использованию автоматизированных систем мониторинга для повышения эффективности производства.

Ключевые слова: МІМ-технология, металлические порошки, спекание, контроль качества, дефекты, гранулят

Для цитирования: Никиткин А. С., Семенов А. Д., Пастухов А. М., Рубцов И. А., Цветков А. П., Печерская Е. А. Контроль параметров в процессе изготовления изделий методом МІМ-технологии // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 3. С. 80–88. doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-10

PARAMETER CONTROL IN THE PROCESS OF MANUFACTURING PRODUCTS USING MIM TECHNOLOGY

**A.S. Nikitkin¹, A.D. Semenov², A.M. Pastukhov³,
I.A. Rubtsov⁴, A.P. Tsvetkov⁵, E.A. Pecherskaya⁶**

¹ FNPC Start named after M.V. Protsenko, Zarechny, Penza region, Russia

^{2, 3, 4, 5, 6} Penza State University, Penza, Russia

¹ paul-startatom@yandex.ru, ² ad-semenov@mail.ru, ^{3, 5} iit@pnzgu.ru, ⁴ rui2000@yandex.ru, ⁶ peal@list.ru

Abstract. *Background.* The article is devoted to methods of controlling the technological process of manufacturing products using MIM technology (Metal Injection Molding), which is a promising direction for achieving technological sovereignty and modernization of production. The aim of the work is to improve the quality parameters of products manufactured using MIM technology by analyzing the key stages of the MIM process and monitoring the technological modes that cause defects in products at each stage. *Materials and methods.* The study used metal powders (stainless steel, titanium, copper, etc.), binding components (wax/polymer and polymer/polymer), as well as modern methods of analysis: electron microscopy, laser diffraction, gas pycnometry, radiographic control, capillary and moment rheometry. The stages of production are analyzed from the point of view of quality management: preparation of granulate, injection molding, removal of binder (thermal, solution, catalytic methods) and sintering. *Results.* It was found that the quality of the

granulate and the uniformity of the distribution of components critically affect the absence of defects in sintered products. The optimal parameters of casting (temperature, pressure, injection rate) and sintering (temperature profiles, furnace atmosphere) are determined. It is shown that modern control methods (for example, mass spectrometry, laser scanning) can minimize defects and improve the mechanical properties of products. *Conclusions.* The use of integrated control at all stages of MIM technology ensures high product quality, reduced defects, and compliance with requirements for critical applications (aerospace, medicine). Special attention is paid to the need for standardization of processes and the use of automated monitoring systems to improve production efficiency. **Keywords:** MIM technology, metal powders, sintering, quality control, defects, granulate.

Keywords: MIM technology, metal powders, sintering, quality control, defects, granulate

For citation: Nikitkin A.S., Semenov A.D., Pastukhov A.M., Rubtsov I.A., Tsvetkov A.P., Pecherskaya E.A. Parameter control in the process of manufacturing products using MIM technology. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(3):80–88. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-10

Введение

МИМ-технология (Metal Injecting Molding) представляет собой литье под давлением термопластичных полимерных материалов, высоконаполненных металлическим порошком. В мире около 70 % металлических деталей весом до 150 г изготавливается методом МИМ-технологии [1, с. 13], а объем их продаж в 2020 г. составил более 2,5 млрд долл. [2, с. 57]. МИМ-технология имеет ряд преимуществ, а именно: высокую производительность, высокий коэффициент использования материала, а также высокую точность воспроизведения геометрии изделия.

Технология изготовления изделий методом МИМ-технологии является сложным и наукоемким технологическим процессом, схема изготовления изделий методом МИМ-технологии приведена на рис. 1 [3]. Основные этапы технологического процесса включают: приготовление фидстока (гранулята) сырья для МИМ-технологии, формование деталей методами литья под давлением на термопластавтоматах (ТПА), удаление связующего компонента и спекание.

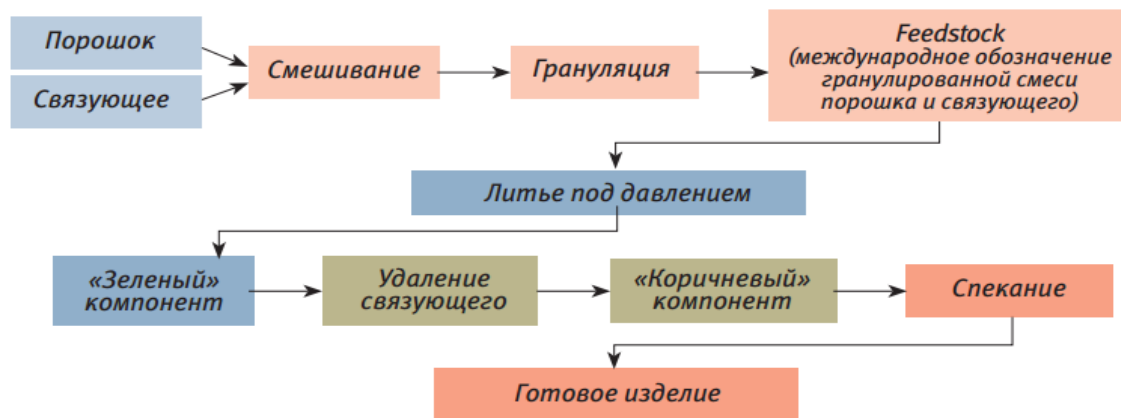


Рис. 1. Схема изготовления изделий по МИМ-технологии [3]

Материалы и методы

Многие металлы обрабатываются методом литья под давлением. Типичными материалами являются нержавеющая сталь, железо, железо-никелевые сплавы, жаропрочные сплавы (например, инконель), титан, титановые сплавы и медь [4]. Наиболее важными характеристиками металлического порошка являются размер частиц, их гранулометрический состав и форма [4]. Эти параметры, особенно форма частиц, зависят от способа получения порошка. На данный момент известны следующие основные методы производства измельченных порошков: газового распыления, водного распыления, электрохимического и плазменного распыления [5, 6]. Связь между процессом получения порошка и формой частиц очень четко определена, например, при распылении газа получаются круглые частицы, в то время как при распылении воды получаются частицы неправильной формы, с другой стороны, электрохимические методы дают губчатые частицы неправильного контура. Особая форма обусловлена динамическими особенностями формирования порошка из расплавленного или растворенного металла или сплава.

Предпочтительной формой порошка в МИМ является сферическая, которая позволяет получить более плотную упаковку, чем при использовании частиц неправильной формы.

Форма частиц исследуется с помощью электронной микроскопии (рис. 2).

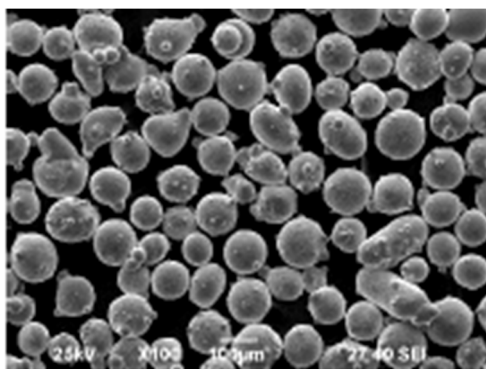


Рис. 2. Изображения порошка титана, полученные с помощью электронного микроскопа, увеличение 1000×

Кроме того, предпочтение отдается порошкам с широким распределением по размерам из-за более плотной упаковки по сравнению с порошками одного размера зерна. Гранулометрический состав исследуется с помощью метода лазерной дифракции: на основе анализа дифракционной картины интенсивности рассеивания лазерного излучения на взвеси частиц исследуемого порошка строится гистограмма распределения частиц по размерам (рис. 3).

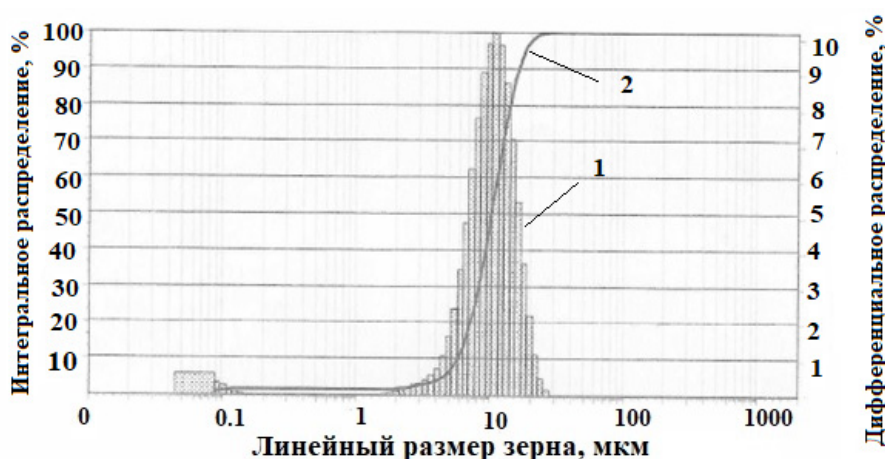


Рис. 3. Гистограмма распределения частиц порошка стали 12X18H10Т:

1 – дифференциальная функция распределения частиц по размерам (плотность распределения); 2 – интегральная функция распределения

Связующие для МИМ можно разделить в зависимости от основных компонентов на две группы: связующие на основе воска, модифицированные полимерами (или воск/полимер), и связующие на основе полимера (или полимер/полимер). Связующие на основе воска, модифицированные полимерами, состоят из одного или нескольких восков различного происхождения и одного или нескольких полимеров. Второй набор связующих на полимерной основе состоит из смесей двух или более полимеров. Роль связующего заключается в придании текучести исходному материалу и возможности осуществления процесса литья под давлением на ТПА. Поэтому связующее следует рассматривать как средство для придания формы так называемой «зеленой» детали¹. Окончательные свойства материал получает после спекания – процесса, в котором связующее вещество не играет никакой роли.

Для изготовления сырья для МИМ-технологии необходимо провести смешивание связующего компонента с металлическим порошком. Смешанное сырье представляет собой гранулят

¹ ГОСТ Р 59650-2021. Литье под давлением полимерных материалов, высоконаполненных металлическими или керамическими порошками (ПИМ-технология). Термины и определения.

(рис. 4). Качество гранулята является важнейшим параметром в процессе МІМ, поскольку неоднородность исходного сырья не может быть скорректирована на следующих этапах процесса МІМ и приводит к ряду дефектов в спеченных изделиях [7, 8].

Гранулят для МІМ-технологии возможно изготавливать на различных установках, начиная от ручных миксеров с лопастями типа морского гребного винта и заканчивая двухшнековыми экструдерами. При изготовлении гранулята основными факторами, определяющими однородность исходного сырья, являются: скорость загрузки порошка или масса смешиваемого материала (в зависимости от используемого оборудования для смешивания), частота вращения лопасти ротора, тип лопасти ротора, температура перемешивания и размер частиц [9–11].



Рис. 4. Гранулят на основе порошка стали 38ХМ

Для оценки параметров смеси используются как моментная, так и капиллярная реометрия. Капиллярная реометрия широко используется для определения однородности, стабильности и основных свойств гранулята. С другой стороны, реометрия крутящего момента полезна для определения максимальной и оптимальной загрузки твердых частиц, однородности полученного сырья в результате процесса смешивания и количества энергии, требуемой для смешивания. Разница между двумя методами заключается в том, что реометры крутящего момента регистрируют крутящий момент во время перемешивания, в то время как капиллярные реометры работают с предварительно смешанным сырьем. Определение коэффициента усадки «зеленой» детали [7], после этапа спекания, контролируется соотношением металлического порошка и связующего в грануляте, контроль осуществляется с использованием метода замещения в газовой пикнометрии.

Литье под давлением

Литье под давлением в МІМ-технологии представляет собой технологический процесс формирования термопластичных полимерных материалов высоконаполненных металлическим порошком посредством литья на термопластавтоматах. Процесс начинается с дозированной подачи гранулированного материала в материальный цилиндр, где происходит нагрев и получение расплава в виде пластиката. Далее осуществляется инжекционный впрыск расплава в пресс-форму под рабочим давлением 500–2000 бар с последующей выдержкой для компенсации усадки материала. После охлаждения отливки до температуры застывания производится извлечение готового изделия механизмом выталкивания [14].

Ключевыми технологическими параметрами процесса являются температура расплава, давление впрыска (500–2000 бар), скорость впрыска (50–300 мм/с), время выдержки под давлением (2–30 с) и температура формы (50–140 °С). Процесс осуществляется на термопластавтоматах с усилием смыкания 25–10 000 т с использованием пресс-форм из инструментальных сталей, обеспечивающих точность обработки поверхности до 0,01 мм.

При литье металлических порошков под давлением ключевыми технологическими дефектами являются сегрегация порошка и расслоение связующего компонента. Данные дефекты формируются на стадии литья вследствие неоднородного распределения компонентов смеси под действием высоких давлений.

Расслоение связующего проявляется в виде образования концентрированного полимерного слоя в приповерхностной области литниковой системы. Это явление обусловлено реологическим

поведением многокомпонентной системы, где низковязкий связующий компонент мигрирует к стенкам формы, создавая смазочный эффект. Последующее высокоскоростное течение высоконаполненной порошковой массы приводит к ударному взаимодействию с поверхностью формы с последующим отражением потока, что вызывает образование дефектов структуры в виде газовых включений и линий спая. Сегрегация порошка возникает как следствие дифференциального движения фаз в процессе течения расплава, когда твердые частицы и полимерная матрица демонстрируют различное поведение при высоких скоростях сдвига. Данный эффект усугубляется при наличии резких перепадов давления в литниковой системе. Указанные дефекты (сегрегация порошка и расслоение связующего) критически влияют на качество спеченных изделий, приводя к неоднородности плотности, снижению механических свойств и образованию дефектов структуры. Это подтверждает важность контроля «зеленых» заготовок на ранних этапах.

Для обеспечения высокого качества «зеленых» деталей применяются следующие методы контроля: визуальный и оптический контроль, метод газовой пикнометрии, метод радиографического контроля.

Визуальный и оптический контроль позволяют осуществлять проверку поверхности на наличие трещин, сколов, неравномерного заполнения формы. Перспективным представляется использование микроскопов и систем машинного зрения для автоматического обнаружения дефектов, измерение плотности заготовки до и после литья для выявления отклонений, связанных с неполным заполнением формы или избыточным содержанием связующего¹.

Радиографический метод контроля позволяет выявить внутренние дефектные участки с пониженной плотностью, воздушные включения и зоны недолива. Такая информация помогает оперативно корректировать технологические параметры процесса. Анализ рентгеновских снимков позволяет прогнозировать возможные дефекты, которые могут проявиться на последующих этапах обработки. Например, участки с неравномерной плотностью часто становятся причиной коробления при спекании.

Современные системы обработки изображений значительно расширяют возможности анализа. Программное обеспечение автоматически выделяет проблемные зоны, измеряет их геометрические параметры и оценивает потенциальное влияние на качество готового изделия. Это особенно важно при работе со сложными формами и миниатюрными деталями.

Удаление связующего

Этап удаления, или дебинг, выполняется для очистки «зеленой» детали от термопластичного полимера, для подготовки заготовки перед спеканием². На данный момент используются многокомпонентные системы связующих: первичный компонент составляет от 60 до 90 % от общей массы связующего, вторичный от 7 до 35 %, остальное представляют собой масла и ПАВ (поверхностно-активные вещества), для улучшения реологических свойств и адгезии связующего с металлическим порошком. Превышение предельного содержания неудаленного связующего компонента приводит к уменьшению плотности спеченного изделия, снижению физико-механических характеристик и риску появления дефектов в спеченном изделии [12]. Существует несколько методов удаления связующего компонента: термический, растворный и каталитический. Термический метод заключается в деструкции полимеров при пониженном давлении и повышенной температуре (порядка 400–600 °C). Ввиду того, что данный процесс крайне неэффективен и занимает длительное время, он применяется только для удаления вторичного компонента связующего непосредственно перед спеканием. Удаление связующего растворным методом осуществляется путем экстракции первичного связующего. В зависимости от связующего подбираются различные растворители, не оказывающие влияния на основной материал (металлический порошок). Каталитический метод осуществляется путем реакции паров концентрированной азотной кислоты с первичным связующим, где в результате реакции полимер переходит в газообразное состояние и выдувается из камеры печи. Данный метод используется для удаления связующего на основе полиформальдегида. В этом случае при прямом воздействии продуктов разложения паров азотной кислоты с чистотой более, чем 98,5 %,

¹ ГОСТ Р ЕН 13018-2014 Национальный стандарт российской федерации контроль визуальный

² ГОСТ Р 59650-2021. Литье под давлением полимерных материалов, высоконаполненных металлическими или керамическими порошками (PIM-технология). Термины и определения.

полиформальдегид превращается в газообразный формальдегид, который удаляется из зеленой заготовки потоком защитного газа. Процесс происходит при температуре от 110 и до 120 °С. Данный метод отличается высокой скоростью удаления связующего, а также высокой остаточной пористостью полученной заготовки (так называемой, «коричневой детали»)¹. После удаления связующего замеряется потеря массы путем сравнения массы до удаления связующего и после. В процессе очищения заготовки первичное связующее должно быть полностью удалено.

Спекание

Процесс спекания в ММ-технологии представляет собой сложную многостадийную операцию, требующую точного контроля множества параметров. В ходе спекания формируются окончательные физико-механические свойства изделий [15]. На начальном этапе после завершения процесса дебиндинга, когда основная часть связующего вещества уже удалена, заготовка поступает в печь для спекания. Важно понимать, что даже незначительные остатки связующего могут существенно повлиять на качество конечного продукта, поэтому температурный режим на первых стадиях нагрева должен быть особенно тщательно выверен. Рекомендуется начинать нагрев с очень плавного повышения температуры – не более 2 °С в минуту. Подобная скорость нагрева позволяет полностью удалить остаточные полимеры без риска образования дефектов [16].

При достижении температурного диапазона от 300 до 600 °С происходит термическое разложение вторичного связующего компонента. Этот процесс сопровождается активным газо-выделением, что требует особого внимания к системе вентиляции печи. В современных промышленных установках для контроля данного этапа используют масс-спектрометрические анализаторы, позволяющие в реальном времени отслеживать состав выделяющихся газов. Одновременно с этим ведется постоянный мониторинг геометрических параметров изделия с помощью прецизионных лазерных сканеров, фиксирующих малейшие изменения размеров.

Переход к фазе предварительного спекания знаменуется началом активных диффузионных процессов. На этой стадии между частицами металлического порошка формируются первые прочные соединения, так называемые «шейки спекания». Микроструктура материала начинает претерпевать существенные изменения: уменьшается общая пористость, увеличивается плотность контактов между частицами. Слишком интенсивный подъем температуры ведет к образованию деформаций и короблений поверхности спекаемых образцов, поэтому крайне важно контролировать скорость нагрева.

Основная стадия спекания происходит при температуре порядка 0,7 от температуры плавления и является наиболее ответственной. На данной стадии происходит окончательное формирование микроструктуры материала. Атомы металла получают достаточную энергию для активной диффузии, что приводит к заполнению остаточных пор и достижению практически теоретической плотности материала. В этот момент важное значение имеет атмосфера в печи: спекание можно осуществлять в среде высокоочищенных инертных газов, водорода или в среде вакуума [17].

Процесс охлаждения после спекания не менее важен, чем нагрев. Скорость охлаждения должна быть строго регламентирована, так как она определяет конечную фазовую структуру материала. Например, для нержавеющей стали слишком быстрое охлаждение может привести к образованию нежелательных хрупких фаз, а слишком медленное – к излишнему росту зерна. В современных производственных линиях этот этап контролируется с помощью систем принудительного охлаждения с регулируемой интенсивностью.

Контроль параметров спекания требует комплексного подхода. Температурные профили оптимизируются с учетом данных дифференциальной сканирующей калориметрии, учитывающих теплофизические характеристики материала. Состав газовой атмосферы поддерживается в соответствии с термодинамическими расчетами равновесия окислительно-восстановительных реакций, где критическим параметром является парциальное давление кислорода [14].

Структурный анализ спеченных изделий включает определение среднего размера зерна, которое подчиняется параболическому закону роста, и оценку фракционной пористости. Современные методы компьютерного моделирования, в частности метод конечных элементов, позволяют прогнозировать распределение термических напряжений в процессе спекания, что особенно важно для изделий сложной геометрии [18].

¹ ГОСТ Р 59650-2021. Литье под давлением полимерных материалов, высоконаполненных металлическими или керамическими порошками (РМ-технология). Термины и определения.

Особого внимания заслуживает система контроля качества на всех этапах спекания. Современные предприятия оснащаются комплексными системами мониторинга, включающими:

- многоточечный температурный контроль с абсолютной погрешностью не более $\pm 2^\circ\text{C}$;
- лазерные измерители усадки с разрешением 0,1 %;
- газоанализаторы для контроля атмосферы печи;
- системы визуального контроля геометрии изделий.

После завершения спекания все изделия проходят обязательную проверку. Основными контролируруемыми параметрами являются следующие:

- плотность (измеряется методом гидростатического взвешивания или замещающей газовой пикнометрии);
- микроструктура (анализируется с помощью электронной микроскопии);
- механические свойства (определяются на универсальных испытательных машинах);
- геометрические параметры (измеряются с помощью координатно-измерительных машин).

Для особо ответственных деталей, таких как медицинские имплантаты или аэрокосмические компоненты, может применяться дополнительный контроль методами рентгеновской томографии, позволяющий выявить внутренние дефекты, невидимые при поверхностном осмотре.

Заключение

Применение современных систем контроля технологического процесса производства изделий методом МИМ-технологий необходимо ввиду многоэтапности процесса изготовления, для минимизации ошибок и повышения качества продукции. Установлено, что качество гранулята и равномерность распределения компонентов оказывают существенное влияние на дефекты в спеченных изделиях. Определены оптимальные параметры литья (температура, давление, скорость впрыска) и спекания (температурные профили, атмосфера печи). Показано, что современные методы контроля (например, масс-спектрометрия, лазерное сканирование) позволяют минимизировать дефекты и улучшить механические свойства изделий.

Список литературы

1. Philipp I., Rota A. Dr. Ing., Petzoldt F., Simchi A. Manufacturing of multi-functional micro parts by two-component metal injection moulding // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2007. Vol. 33. P. 176–186.
2. Li Y., Yu Y., He H. [et al.]. Metal Injection Moulding in China: Market opportunities and research activities // PIM International. 2020. Vol. 14, № 1. P. 57.
3. Погодина Е. Литье порошковых смесей // Пластикс. Эффективные ТПА. 2013. № 6. С. 34–36.
4. German R., Bose A. Powder Injection Molding. 2nd ed. Metal process Industries Federation. 1997. 490 p.
5. Ye H., Liu X. Y., Hong H. P. Fabrication of metal matrix composites by metal injection molding – a review // Journal of Materials Processing Technology. 2008. Vol. 200, № 1. P. 12–24. doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2007.10.066
6. Hartwig T., Veltl G., Petzoldt F. [et al.]. Powders for metal injection molding. Journal of the European Ceramic Society. 1998. Vol. 18. P. 1211–1216.
7. Barriere T. Determination of the optimal process parameters in metal injection molding from experiments and numerical modeling // Journal of Materials Processing Technology. 2003. Vol. 143–144. P. 636–644.
8. Supati R., Loh N. H., Khor K. A., Tor S. B. Mixing and characterization of feedstock for powder injection molding // Materials Letters. 2000. Vol. 46. P. 109–114.
9. Binet C., Heaney D. F., Spina R., Tricarico L. Experimental and numerical analysis of metal injection molded products // Journal of Materials Processing Technology. 2005. Vol. 164–165. P. 1160–1166. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.128
10. Bose A., Valencia J. J., Spirko J., Schmees R. Advances in Powder Metallurgy and Particular Materials. MPIF, Princeton, NJ, 1997. P. 18. P. 99–112.
11. Torkar D., Novak S., Novak F. Apparent viscosity prediction of alumina–paraffin suspensions using artificial neural networks // Journal of Materials Processing Technology. 2008. Vol. 203. P. 208–215. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.09.058
12. Nishiyabu K., Matsuzaki S., Ishida M. [et al.]. Development of Porous Aluminum by Metal Injection Molding // Presented for 9th Int. Conf. on Aluminum Alloys (ICAA9). 2004. P. 376–382.
13. Гини Э. Ч., Зарубин А. М., Рыбкин В. А. Технология литейного производства: Специальные виды литья : учебник для студ. высш. учеб. заведений / под ред. В. А. Рыбкина. М. : Издательский центр «Академия», 2005. 352 с.
14. Белоусов В. А. Машины и технология литейного производства. Дипломное проектирование : учеб. пособие. Тула : изд-во Тул-ГУ, 2007. 78 с.

15. Zhang S., Li Y., Liu J. Sintering densification behavior of MIM 316L stainless steel // Powder Metallurgy. 2015. Vol. 58, № 1. P. 59–65.
16. Li Y., Li L., Khalil K. A. Effect of powder loading on metal injection molding stainless steel // Journal of Materials Processing Technology. 2007. Vol. 183, № 2-3. P. 432–439.
17. Zauner R. Micro powder injection molding // Microelectronic Engineering. 2006. Vol. 83, № 4-9. P. 1442–1444.
18. Liu Z. Y., Loh N. H., Tor S. B. [et al.]. Taguchi analysis of the shrinkage of injection molded parts // Materials & Design. 2003. Vol. 24, № 3. P. 221–230.

References

1. Philipp I., Rota A. Dr. Ing., Petzoldt F., Simchi A. Manufacturing of multi-functional micro parts by two-component metal injection moulding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2007;33:176–186.
2. Li Y., Yu Y., He H. et al. Metal Injection Moulding in China: Market opportunities and research activities. *PIM International*. 2020;14(1):57.
3. Pogodina E. Casting of powder mixtures. *Plastiks. Effektivnye TPA = Plastics. Effective TPA*. 2013;(6): 34–36. (In Russ.)
4. German R., Bose A. Powder Injection Molding. 2nd ed. *Metal process Industries Federation*. 1997:490.
5. Ye H., Liu X.Y., Hong H.P. Fabrication of metal matrix composites by metal injection molding – a review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;200(1):12–24. doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2007.10.066
6. Hartwig T., Veltl G., Petzoldt F. et al. Powders for metal injection molding. *Journal of the European Ceramic Society*. 1998;18:1211–1216.
7. Barriere T. Determination of the optimal process parameters in metal injection molding from experiments and numerical modeling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;143–144:636–644.
8. Supati R., Loh N.H., Khor K.A., Tor S.B. Mixing and characterization of feedstock for powder injection molding. *Materials Letters*. 2000;46:109–114.
9. Binet C., Heaney D.F., Spina R., Tricarico L. Experimental and numerical analysis of metal injection molded products. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005;164–165:1160–1166. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.128
10. Bose A., Valencia J.J., Spirko J., Schmees R. *Advances in Powder Metallurgy and Particular Materials*. MPIF, Princeton, NJ, 1997;18:99–112.
11. Torkar D., Novak S., Novak F. Apparent viscosity prediction of alumina–paraffin suspensions using artificial neural networks. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;203:208–215. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.09.058
12. Nishiyabu K., Matsuzaki S., Ishida M. et al. Development of Porous Aluminum by Metal Injection Molding. *Presented for 9th Int. Conf. on Aluminum Alloys (ICAA9)*. 2004:376–382.
13. Gini E.Ch., Zarubin A.M., Rybkin V.A. *Tekhnologiya liteynogo proizvodstva: Spetsial'nye vidy lit'ya: uchebnik dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy = Technology of foundry production: Special types of casting: a textbook for students of higher educational institutions*. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2005:352. (In Russ.)
14. Belousov V.A. *Mashiny i tekhnologiya liteynogo proizvodstva. Diplomnoe proektirovanie: ucheb. posobie = Machines and technology of foundry production. Diploma design: textbook*. Tula: izd-vo Tul-GU, 2007:78. (In Russ.)
15. Zhang S., Li Y., Liu J. Sintering densification behavior of MIM 316L stainless steel. *Powder Metallurgy*. 2015;58(1):59–65.
16. Li Y., Li L., Khalil K.A. Effect of powder loading on metal injection molding stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;183(2-3):432–439.
17. Zauner R. Micro powder injection molding. *Microelectronic Engineering*. 2006;83(4-9):1442–1444.
18. Liu Z.Y., Loh N.H., Tor S.B. et al. Taguchi analysis of the shrinkage of injection molded parts. *Materials & Design*. 2003;24(3):221–230.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Сергеевич Никиткин

кандидат технических наук,
заместитель главного металлурга по аддитивным
технологиям и порошковой металлургии,
ФНПЦ «ПО "Старт"» имени М. В. Проценко
(Россия, Пензенская обл., г. Заречный, пр-т Мира, 1)
E-mail: paul-startatom@yandex.ru

Aleksandr S. Nikitkin

Candidate of technical sciences,
deputy chief metallurgist for additive technologies and
powder metallurgy,
FNPC Start named after M.V. Protsenko
(1 Mira avenue, Zarechny, Penza region, Russia)

Анатолий Дмитриевич Семенов

доктор технических наук, профессор кафедры
автоматики и телемеханики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ad-semenov@mail.ru

Anatoliy D. Semenov

Doctor of technical sciences, professor
of the sub-department
of automation and remote control,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Михайлович Пастухов

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Aleksandr M. Pastukhov

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Илья Александрович Рубцов

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rui2000@yandex.ru

Ilya A. Rubtsov

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Павлович Цветков

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Aleksandr P. Tsvetkov

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Екатерина Анатольевна Печерская

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: peal@list.ru

Ekaterina A. Pecherskaya

Doctor of technical sciences, professor,
head of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 06.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 08.04.2025

Принята к публикации / Accepted 06.05.2025