

УДК 621.762:669.295

А.И. Васильев¹, С.В. Путырский¹, А.Ю. Коротченко², А.Ю. Анисимова¹

МIM-ТЕХНОЛОГИЯ КАК СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ, В ТОМ ЧИСЛЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-16-27

Представлен обзор применения MIM-технологии (технологии инжекционного литья деталей на основе металлопорошковых композиций) в качестве способа изготовления точных деталей из металлопорошковых композиций. Рассмотрены особенности производства изделий с использованием аддитивных и MIM-технологий. Приведены основные этапы технологического процесса MIM, а также отражены статистические данные по его применению в различных отраслях и используемым материалам. Отдельное внимание уделено анализу возможности применения MIM-технологии для изготовления деталей из титановых сплавов.

Ключевые слова: MIM-технология, титановые сплавы, порошковые технологии, аддитивное производство, микроструктура, фидсток.

A.I. Vasilev¹, S.V. Putyrskiy¹, A.Yu. Korotchenko², A.Yu. Anisimova¹

MIM TECHNOLOGY AS A METHOD OF MANUFACTURING PRECISION PARTS FROM METAL-POWDER COMPOSITIONS, INCLUDING TITANIUM ALLOYS (review)

The overview of MIM technology application (injection molding technologies for parts based on metal-powder compositions) as a method of manufacturing precision parts from metal-powder compositions is represented in this article. The features of the manufacturing of parts by additive technologies are also considered. The main stages of the technological process are given. Applied industries and using material statistic data are reflected. The focus was made on analyze of opportunity of application MIM technology in the manufacturing parts from titanium alloys.

Keywords: MIM technology, titanium alloys, powder technologies, additive manufacturing, microstructure, feedstock.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» [Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology)]; e-mail: bauman@bmstu.ru

Введение

Достижение высоких технико-экономических показателей при современном производстве точных изделий из металлопорошковых композиций базируется на использовании новых технологий и материалов [1, 2], необходимость применения которых обусловлена в том числе следующими факторами:

– оптимизацией конструкций деталей при применении новых материалов, а также снижением массы деталей благодаря использованию материалов с низкой плотностью (например, легких сплавов и керамик);

– снижением затрат на производство деталей, т. е. стремлением к существенному сокращению количества технологических операций и минимизацией временных затрат, а также снижением трудоемкости и повышением коэффициента использования материалов;
 – улучшением качества сопрягаемых поверхностей деталей, а также обеспечением точности и постоянства формы и размеров готовых деталей в течение длительного срока эксплуатации во всем диапазоне действующих нагрузок.

Современные методы получения сложной геометрической формы изделий, требующие применения совокупности новых технологий обработки, изготовления и изменения состояния материалов, осуществляемых в процессе производства продукции, часто развиваются путем объединения преимуществ порошковой металлургии с методами обработки давлением и литейного производства [3].

Мировые тенденции применения различных технологий изготовления металлических деталей в зависимости от сложности изделия и серийности производства представлены на рис. 1 [4].

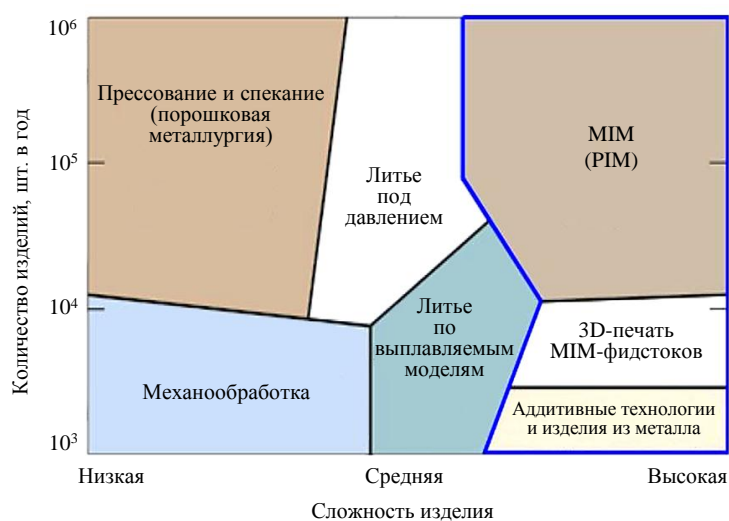


Рис. 1. Тенденции применения технологий изготовления металлических деталей в зависимости от сложности изделия и серийности производства

В настоящее время область производства изделий максимальной сложности занимают технологии аддитивного производства (additive manufacturing – AM) и инжекционного литья порошковых композиций (powder injection molding – PIM). При этом их распределение на AM-технологию, используемую для мелкосерийного и единичного производства, и PIM-технологию, актуальную для серийного и крупносерийного выпуска деталей, предопределяет особенности указанных технологий. В свою очередь PIM-технология включает изготовление не только металлических деталей (MIM-технология), но и изделий из керамики [5, 6].

Однако следует отметить, что 90% рынка изделий, полученных по PIM-технологии, в настоящее время составляют детали на основе металлических порошков. Метод MIM стал действительно серьезным конкурентом таким традиционным методам получения деталей, как механическая обработка и литье по выплавляемым моделям. Данная технология вытесняет эти методы в случаях, когда основной акцент делается на миниатюризацию деталей, усложнение геометрической формы изделий и использование новейших материалов [4].

Цель данной работы – анализ научно-технической информации о современных материалах и способах изготовления деталей, включающий рассмотрение MIM-технологии как способа производства металлических изделий.

Место МИМ-технологии в современной промышленности

Современный зарубежный рынок изделий, изготовленных методом инжекционного формования (МИМ) из порошковых композиций, представляет собой сектор заготовительных производств с ожидаемым к 2025 г. объемом продаж изделий более 4 млрд долл. (рис. 2). Следует отметить, что этот рынок демонстрирует прирост на ~15% в год, а по отдельным секторам – на 40% [4]. В настоящее время общее число компаний в мире, производящих детали методами МИМ, составляет >700 [7].

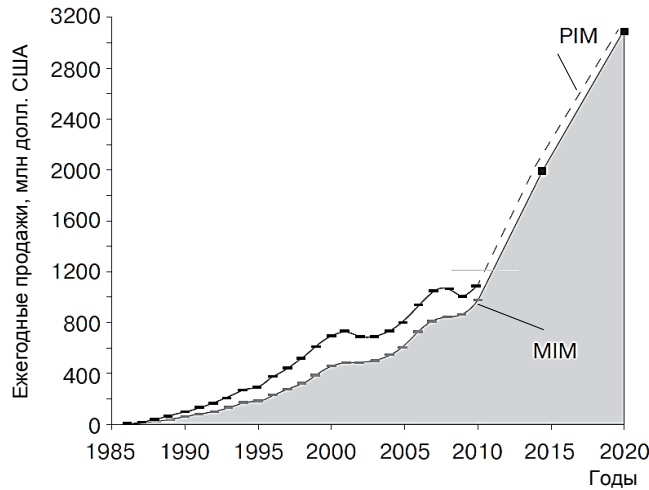


Рис. 2. Объем продаж точных изделий, изготовленных с использованием МИМ- и РИМ-технологий [4]

Применение МИМ-технологии для изготовления точных деталей в различных областях зарубежного машиностроения отображено на рис. 3 (показано долевое соотношение). Следует отметить, что подавляющий объем зарубежного рынка изделий, изготовленных методом МИМ, занимают детали для автомобильной промышленности (17,9%), а также потребительские товары и электроника (суммарно 20,6%) [5, 6, 8].

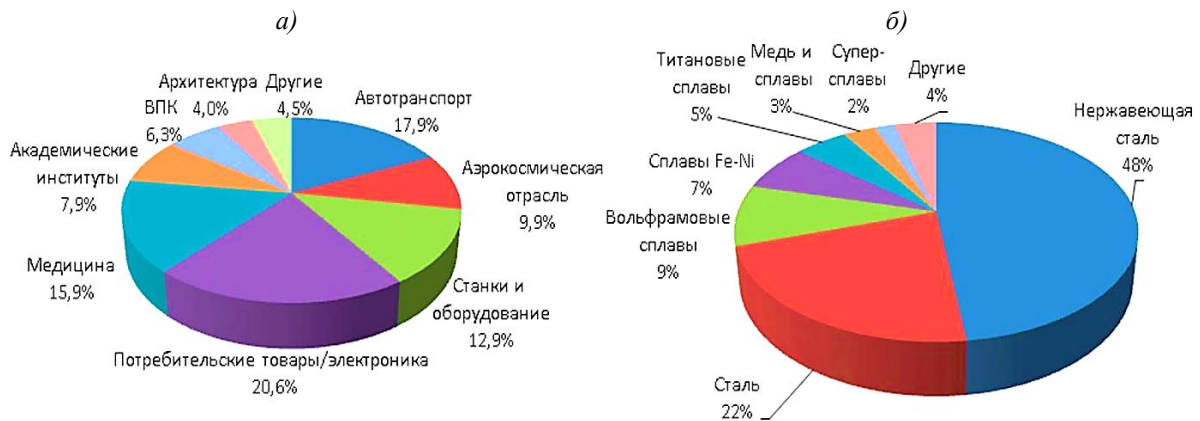


Рис. 3. Применение МИМ-технологии в различных областях зарубежного машиностроения (а) и использование сплавов в МИМ-индустрии (б)

В современном МИМ-производстве нет плавильного участка и не выполняются процессы плавки металла, однако есть литейный участок, состоящий из установок, конструктивно подобных машинам литья под давлением. При формовании металлических порошков путем инжекционного литья одним из наиболее важных этапов

является стадия производства, отвечающая за процесс изготовления нового литейного материала – фидстока, представляющего собой композиционный материал из металлических порошков требуемого химического состава (~60% (объемн.) и до 90% (по массе)) и легкоплавкого полимерного связующего. Технологические свойства фидстока устанавливают пригодность данного материала для литья.

Основным компонентом, входящим в состав фидстока и применяемым в современных порошковых технологиях, является порошок, который классифицируется по размерам (рис. 4). В свою очередь МИМ (РИМ)-технология занимает в этой классификации заметную нишу: 1–40 мкм. Особое внимание уделяют качеству порошка, где контролируемыми параметрами являются средний диаметр частиц, их распределение по размерам, химический состав и т. д. Размер частиц порошка влияет на вязкость смеси компонентов, а оптимальное распределение частиц по размерам – на однородность смеси. Затем для связующего вещества определяют уровень влажности и вязкости, а также теплофизические свойства.

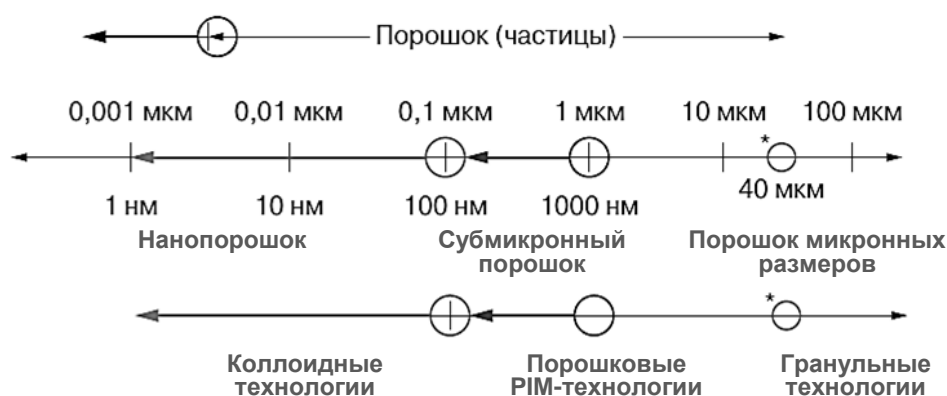


Рис. 4. Классификация порошков по размерам

Потребность в обеспечении необходимой текучести полимерной композиции с учетом минимальной тепловой энергии в материале заставила специалистов-технологов сделать упор на управление вязкостью используемых систем материалов с помощью особых приемов, а также на создание таких условий течения суспензии, которые допустимы в технологиях машиностроительного производства. Применение МИМ-технологии позволяет заменить такие параметры литейного процесса, как температура заливки расплава и напор столба жидкости, которые являются труднодостижимыми. Особым приемом стало использование специальных материалов из традиционных сплавов – фидстоков (рис. 5), структурированных многофазных материалов, которые размягчаются до состояния суспензии под воздействием сдвиговых деформаций (рис. 6) [3, 7].

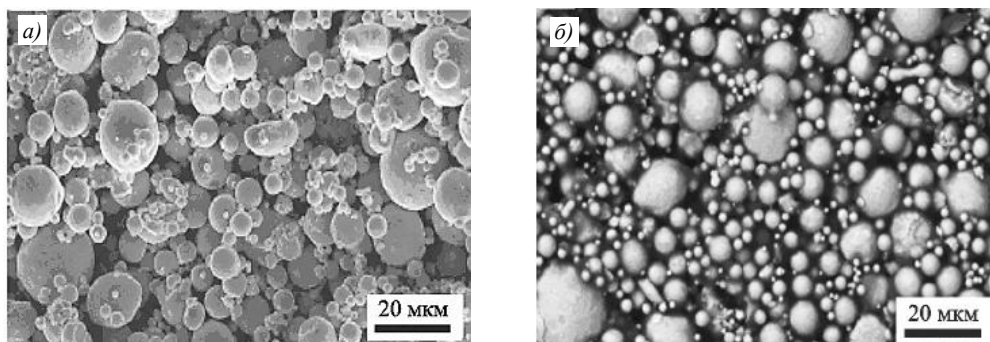


Рис. 5. Типичная микроструктура порошка (а) и фидстока (б)

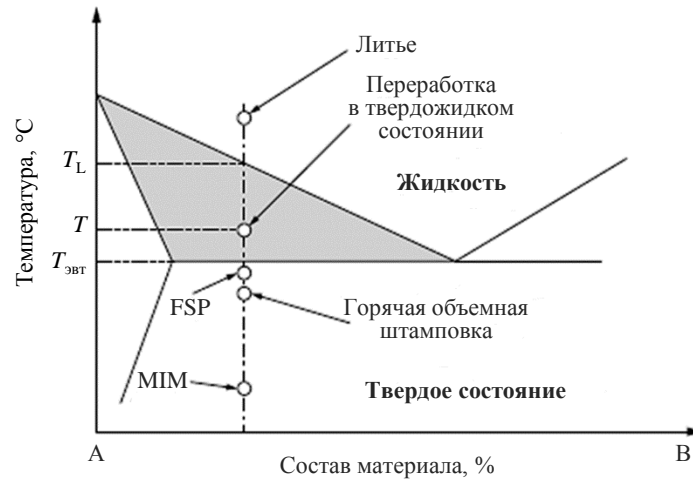


Рис. 6. Использование технологий в зависимости от состояния материала, где T_L – температура ликвидус, $T_{эвт}$ – температура эвтектики

Этапы технологического процесса

Производство изделий с использованием MIM-технологии выполняется в несколько этапов. Технологический процесс изготовления деталей методом MIM представлен на рис. 7 [9, 10].

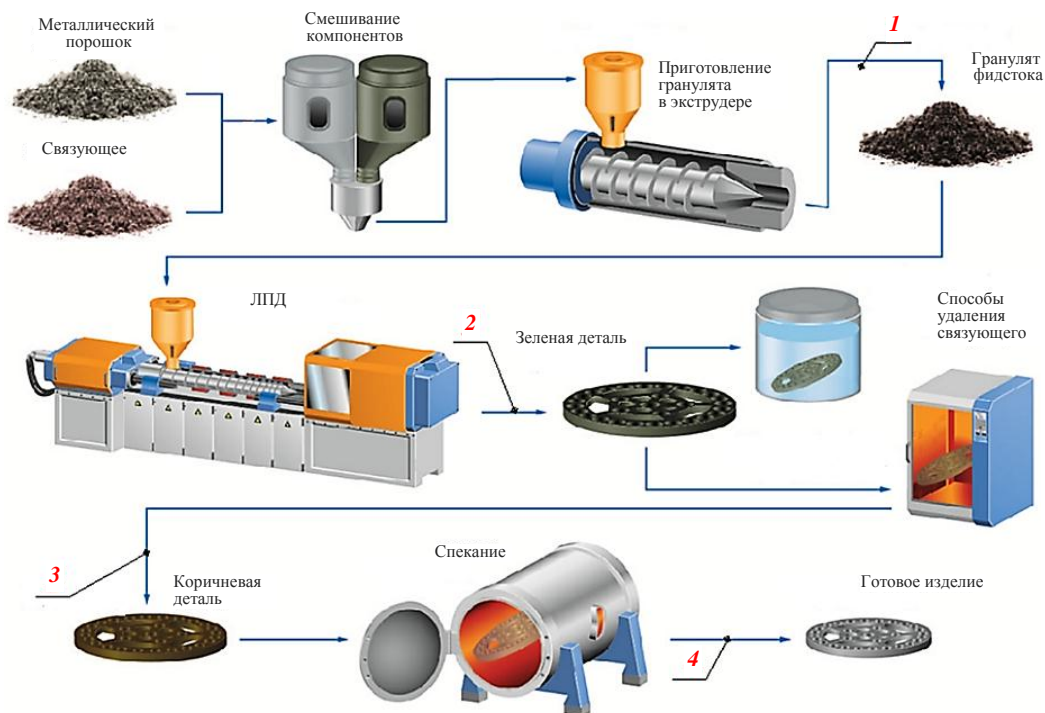


Рис. 7. Этапы технологического процесса изготовления деталей методом MIM [10]:

1 – подготовка исходного сырья; 2 – формование заготовки; 3 – удаление полимерного связующего; 4 – спекание до готового изделия

Подготовка сырья включает получение наполнителя и связующего компонента в виде порошка, последующее их перемешивание и гранулирование. Финальным продуктом на первом этапе является гранулят, однако чаще употребляется англоязычное название «фидсток» (feedstock – смесь мелкодисперсных металлических или керамических порошков с полимерной матрицей). Основные параметры, определяющие

качество фидстока, – плотность, стабильность вязкости и необходимая зависимость вязкости от скорости сдвига. Плотность фидстока определяется соотношением количества порошка и связующего. Стабильность вязкости обеспечивается равномерным распределением частиц порошка по объему. Несоответствие плотности и вязкости фидстока приводит к нестабильному режиму течения при заполнении и не позволяет управлять течением потока суспензии [7, 10].

Следующий этап – загрузка фидстока в бункер литейной машины, где в интервале температур от 170 до 200 °С начинается процесс плавления полимерного связующего – фидсток преобразуется в единую массу (расплав) [9, 10]. Затем происходит впрыскивание расплавленного фидстока под давлением, которое осуществляют в несколько стадий. Сначала происходит подготовка порции фидстока (красная область на рис. 8). Затем расплав дополнительно перемешивают при помощи шнека. После подготовки порции смеси производят ее впрыскивание в формообразующую полость – расплав заполняет пресс-форму, предварительно подогретую до температур 125–145 °С, где происходит его затвердевание [10]. В процессе прессования давление, приложенное к расплаву, обеспечивает скорости сдвига, которые позволяют снизить вязкость суспензии до необходимого значения. В результате получается первичная деталь, которую называют «зеленой». Особенность МИМ-технологии на данном этапе – использование компактных установок, которые не нуждаются в приложении значительных усилий прессования по сравнению с традиционным литьем под давлением.

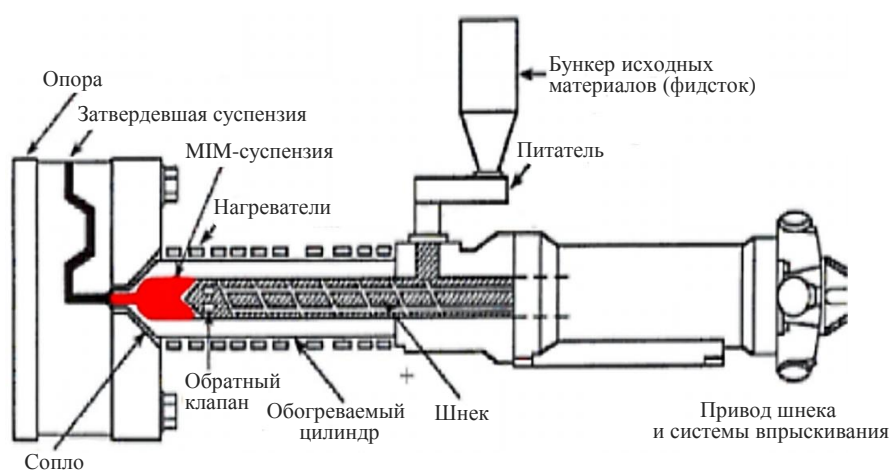


Рис. 8. Схема устройства конструктивно-подобной машины литья под давлением

Третий этап заключается в исключении из «зеленой» детали полимерного связующего вещества – происходит так называемый процесс дебайдинга. Данный этап является одним из основных в методе МИМ, поскольку в случае неполного удаления связующего в дальнейшем могут быть выявлены различные дефекты в конечных изделиях: пузыри, внутренние пустоты, поверхностные трещины и др. Дебайдинг можно выполнить, применяя различные способы в зависимости от состава связующего компонента [9]. Наиболее часто используются следующие методы удаления полимерных составляющих: каталитический, термический, а также метод удаления при помощи растворителей. По окончании процесса удаления полимерного связующего деталь называется «коричневой». Она имеет пористую структуру и не обладает высокой прочностью [10].

В завершении процесса МИМ выполняют заключительный этап – спекание «коричневой» детали в печи. При этом происходит окончательное уплотнение материала благодаря слиянию частиц и устранению пор – формирование готовой детали. Процесс спекания заключается в нагреве и выдержке заготовок при температуре, принимаемой

0,7–0,8 от температуры плавления основного компонента металлопорошковой композиции [11]. Такая температура нагрева материала является достаточно высокой для осуществления процесса рекристаллизации частиц металла и достаточно низкой для недопущения их расплавления. Частицы рекристаллизуются, что приводит к увеличению размера зерна и дальнейшему сцеплению металлических частиц друг с другом [12]. Размеры конечной детали получаются меньше размеров «зеленой» детали вследствие усадочных процессов [13]. В результате спекания готовое изделие перестает быть хрупким и приобретает необходимую прочность, что позволяет подвергнуть его поверхность механической обработке (при необходимости) [14].

Продолжительность спекания деталей зависит от применяемых материалов, а также от размеров самого изделия и может варьироваться от 1 до 10 ч. Процесс спекания должен проводиться в условиях защитной среды во избежание окисления спеченных деталей. В качестве подобной атмосферы чаще всего используется среда диссоциированного аммиака и азота, применяют также вакуум – например, для деталей из титана, вольфрама и других сплавов [15].

За сплавлением частиц металла на различных этапах процесса спекания можно наблюдать при помощи синхротронной микротомографии. В данной работе наблюдали за частицами меди (рис. 9) – в ходе процесса металлические частицы приближаются друг к другу, площадь их контакта увеличивается и пористость в детали снижается [9].

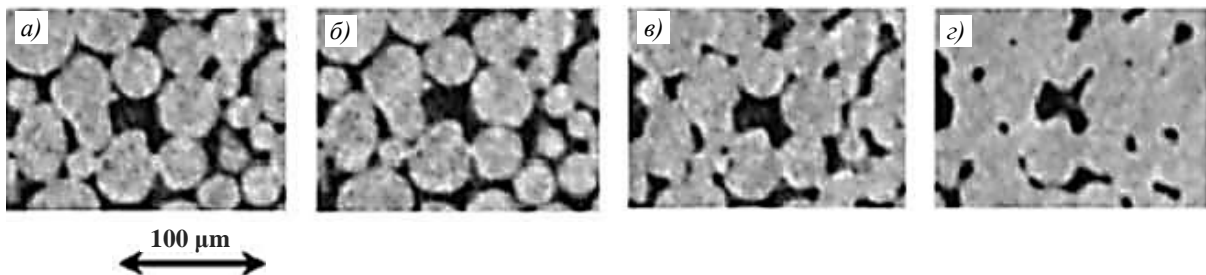


Рис. 9. Микроструктура частиц меди непосредственно перед спеканием (а) и в процессе спекания при температуре 1050 °С спустя 45 (б), 120 (в), а также 220 мин и охлаждения до комнатной температуры (г)

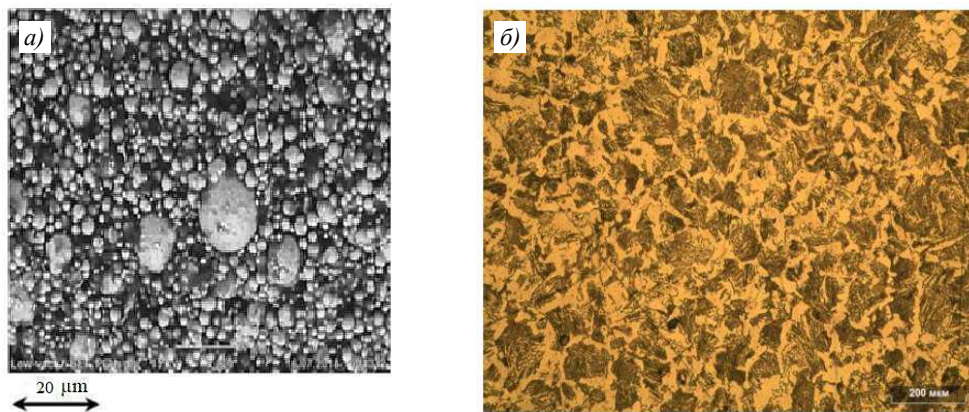


Рис. 10. Микроструктура исходного сырья (фидстока) на этапе подготовки смеси (а) и после спекания «коричневой» детали (б)

Типичная микроструктура исходного сырья (фидстока) на этапе подготовки – смеси из порошковой композиции и полимерного связующего (60% порошка и 40% полимера) – представлена на рис. 10, а, а после спекания «коричневой» детали – на рис. 10, б [16, 17].

Преимущества МІМ-технологии

Одним из основных преимуществ МІМ-технологии в первую очередь является оптимизация конструкции изделия – МІМ-процесс снимает практически все ограничения по сложности формы изготавливаемой детали. Теперь стало доступно то, что было принципиально невозможно реализовать в связи с ограничениями механической обработки. Традиционные литейные технологии, например литье по выплавляемым моделям, в свою очередь не в состоянии были обеспечить аналогичную размерную точность.

Метод МІМ позволяет придавать формируемым деталям любые поверхности – от очень гладких до текстурированных, что открывает доступ практически ко всему спектру покрытий и обработок, в том числе химическому оксидированию и тефлоновому покрытию. Кроме того, доступны такие методы подготовки поверхности, как галтовка, пескоструйная обработка и полировка. Шероховатость поверхностей деталей, изготовленных с применением МІМ-технологии, определяется преимущественно размерами фракций порошка, используемого при изготовлении фидстока. Поверхностям изделий, изготавливаемых методом МІМ, обычно свойственна шероховатость $R_a=2,5$ [7], в то время как для технологий литья такое значение является предельно достижимым.

Ранее считалось, что МІМ-технология экономически и технологически целесообразна при крупносерийном производстве деталей массой до 60–80 г, что объясняется невозможностью без коробления изготавливать большие детали, а также высокой стоимостью всего процесса. В настоящее время с помощью МІМ-технологии стало возможным серийное получение деталей массой ~1 кг с заданными точностью и качеством [18].

Следует также отметить, что в традиционных методах металлообработки до 80% материала может уйти в стружку, а в МІМ-процессе литники после дробления могут повторно использоваться, что позволяет повысить коэффициент использования материала до ~99%. Такая экономия становится еще более значимой при работе с дорогими металлами (например, титаном). При использовании МІМ-технологии снижаются затраты на дорогостоящие фрезы, расходные материалы и обслуживание станков, происходит сокращение технологического цикла производства, минимизируются сроки подготовки производства, включая проектирование и изготовление специализированных пресс-форм.

Образцы точных деталей сложной конфигурации, изготовленных с помощью МІМ-технологии, не требующих механической обработки перед их использованием в изделиях, показаны на рис. 11. Принципиальная новизна новых технических решений – это предварительное создание из порции металла и неметаллического компонента двухфазной твердожидкой среды с высоким содержанием твердой фазы (до 60% (объемн.) и более), сочетающей свойства твердого тела и жидкости и способной в таком состоянии к заполнению формообразующей полости за счет склонности суспензий к размягчению [18].



Рис. 11. Детали, изготовленные с использованием МІМ-технологии

Применение МИМ-технологии для титановых сплавов

Сфера применения титановых сплавов достаточно широка – из них изготавливают баллоны, емкости, оболочки, обшивку, шпангоуты, лонжероны, балки, кронштейны, а также другие детали и узлы авиационной, космической и ракетной техники, что дает возможность значительно снизить массу конструкций и повысить надежность работы изделий [19].

Кроме того, МИМ-технология используется при изготовлении мелких изделий сложной конфигурации [18–24]. Однако в случае применения МИМ-процесса в титановых сплавах условно можно провести следующее разделение – использование сплавов при изготовлении косметических деталей (в данном случае высокие значения механических свойств не важны) и ответственных изделий (они подвержены нагрузкам, что делает повышенные значения механических свойств важными). Для оценки механических свойств материала определяющим является содержание легирующих элементов (α - и β -стабилизаторов), также важно содержание кислорода [25]. Косметические детали, например корпуса часов, изготавливают из чистого титана, а ответственные изделия – из легированных сплавов.

Ранее большая часть разработок работоспособного МИМ-процесса титановых сплавов была затруднена из-за отсутствия необходимых порошковых композиций, слабой защиты титана во время обработки при повышенных температурах и недостаточно оптимальных связующих для такого активного материала [22]. Однако с течением времени некоторые компании, использующие МИМ-технологии, учли особенности работы (хранения и применения) с титановыми сплавами [23, 24, 26, 27].

В настоящее время удовлетворяющие требованиям МИМ-технологии порошки (рис. 12), а также печи для спекания заготовок, необходимые для использования с титановыми сплавами, стали доступны [3, 13], и задача состоит в нахождении связующего, обладающего требуемой адгезией с порошковой фракцией без сцепления со стенками пресс-формы и обеспечивающего химическую инертность. К сожалению, даже некоторые из наиболее известных полимерных связующих, обладающих способностью легко распадаться термически в исходных полимерах (например, полиметилметакрилат, полипропиленкарбонат и поли- α -метилстирол), по-прежнему склонны вносить примеси в спеченные титановые МИМ-детали, потому что деполимеризация связующих происходит практически при тех температурах, при которых начинается захват примесей (~ 260 °С). В случае систем связующих на основе каталитического разложения полиацеталей можно говорить о перспективном применении, но их использование требует значительного капиталовложения и дорогостоящего оборудования для обработки кислотного парообразного катализатора, а также необходимых средств удаления олигомеров формальдегида, которые смешивают с металлическим порошком для образования исходного сырья [28, 29].

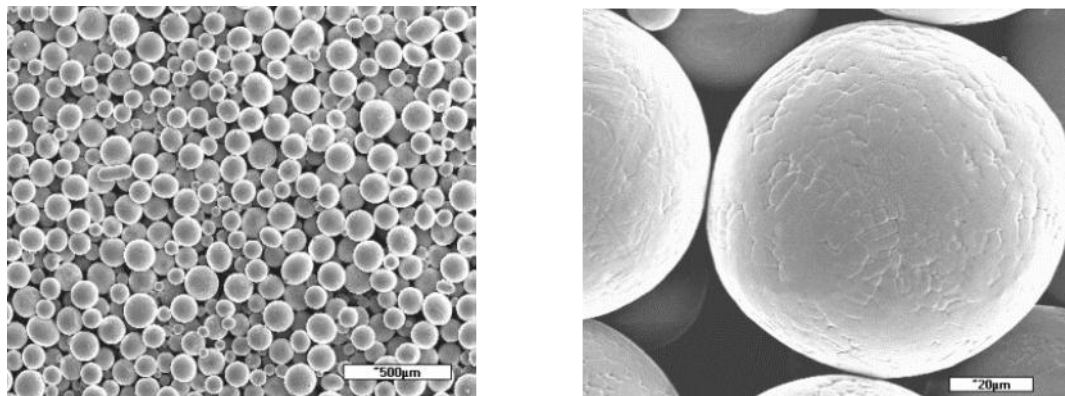


Рис. 12. Микроструктура металлопорошковой композиции из сплава Ti64 (газовая атомизация)

В работе [30] отражено положительное направление в части подбора связующего полимерного вещества для металлопорошковой композиции из сплава Ti64. Многокомпонентная связующая система состоит из парафина, полипропилена, стеарина и карнаубского воска. Представлено влияние средней фракции порошка и ее объемной составляющей в композиционном материале на свойства образцов из сплава Ti64 (см. таблицу). Так, высокие свойства ($\sigma_B=1244$ МПа) при плотности $3,90$ г/см³ показала металлопорошковая композиция 3.

Свойства образцов из сплава Ti64, полученных методом МИМ [30]

Условный номер	Размер фракции порошка, мкм	Содержание порошка, % (объемн.)	Плотность, г/см ³	σ_B , МПа
1	41	50	3,09	1170
2	41	70	1,91	653
3	10	50	3,90	1244
4	10	70	2,70	711

Одним из важнейших вопросов в МИМ-технологии применительно к титановым сплавам является контроль за содержанием в них кислорода и углерода в процессе производства. Внимание акцентируется на определении их количества на этапах удаления связующего. Так, по результатам исследований спеченные образцы (при температуре 1250 °С в течение 1 ч) содержали большее количество кислорода и углерода по сравнению с исходными порошками, что негативно повлияло на механические свойства конечного изделия.

В настоящее время титановые детали, изготавливаемые по МИМ-технологии, имеют ограничения по габаритным размерам и массе (обычно до 100 г) [31]. Ограничивающими факторами также являются воспроизводимость геометрических размеров и химический состав. Большие детали становится труднее изготавливать вследствие влияния усадочных процессов [32]. По мере накопления практического опыта и проведения исследований появляются новые полимерные связующие. Их использование позволит повысить плотность упаковки смесей с порошком из титана. В этом случае усадочные процессы могут быть снижены, что делает проблемы размерных параметров в МИМ-процессе менее значимым фактором [33].

Заключения

Возможность организации крупносерийного производства деталей сложной формы с обеспечением их высокой размерной точности привлекает интерес к МИМ-технологии, преимуществом которой является использование относительно несложного и компактного оборудования, что упрощает организацию участка и делает ее менее дорогостоящей.

Однако особенности процесса, которые приводят к высокой пористости деталей, не позволяют в настоящее время рассматривать МИМ-технологию для получения высоконагруженных деталей, что объясняет ее относительно низкую распространенность при изготовлении изделий авиастроения. При этом перспективы применения МИМ-процессов в других отраслях, например в микроэлектронике, могут быть довольно широкими.

Для эффективного использования МИМ-технологии для изготовления деталей необходимо параллельное решение целого комплекса задач, среди которых можно выделить: получение порошка мелкой фракции, разработку полимерных связующих для фидстоков, выбор технологических параметров процессов и конструирование деталей с геометрической формой, адаптированной под применение МИМ-технологии. Решение указанных задач в комплексе может открыть широкие перспективы для данного технологического подхода.

В части титановых сплавов определяющим фактором применения деталей останется уникальное сочетание их физических и химических свойств. При использовании МИМ-процессов для изготовления деталей из титановых сплавов придется столкнуться с традиционными для порошковых технологий проблемами снижения пористости и сохранения требуемого химического состава, что в первую очередь будет зависеть от свойств применяемого фидстока [34, 35].

В настоящее время использование МИМ-технологии применительно к различным сплавам расширяется – начиная с производства сложнопрофильных корпусных деталей до изготовления ответственных деталей исполнительных механизмов. Гибкость технологических возможностей, которую обеспечивает метод МИМ, может не только повысить экономическую эффективность производства, но и способствовать повышению качества конечной продукции, что предопределяет настоящее и будущее распространение и развитие данной технологии.

Библиографический список

1. Гамидов Г.С., Адеев З.И., Кучув К.А. Особенности системного подхода к оценке точности изготовления деталей двигателей внутреннего сгорания // *Обработка металлов резанием*. 2008. Т. 2. №44. С. 16–18.
2. Чайнов Н.Д., Мягков Л.Л., Москвичев Ю.П. Новые конструкционные материалы – гранульные композиты и эффективность их применения в двигателестроении // *Сборник науч. тр. Междунар. конф. «Двигатель-2010», посвящ. 180-летию МГТУ им. Н. Э. Баумана*. М., 2010. С. 67–70.
3. Тверской М.В., Хилкова А.А., Хилков Д.Э. Исследование особенностей инжекционного литья металлических порошковых смесей // *Политехнический молодежный журнал МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2018. №11 (28). С. 406–407.
4. Ramakrishnan P. Automotive applications of powder metallurgy // *Advances in powder metallurgy*. 2013. No 7. P. 493–519.
5. Семенов Б.И., Семенов А.Б., Муранов А.Н. Переработка и свойства суперсплавов, пригодных для МИМ // *Современные жаропрочные деформируемые никелевые и интерметаллидные сплавы, методы их обработки: сб. материалов конф. (Москва, 13 нояб. 2015 г.)*. М.: ВИАМ, 2015. С. 10–13.
6. Hausnerova V. Powder Injection Molding as an Alternative Processing Method for Automotive Items // *PIM International*. 2011. No. 3. P. 129–146.
7. Семенов А.Б., Муранов А.Н., Куцбах А.А., Семенов Б.И. Инжекционное литье структурированных многофазных материалов // *Вестник РУДН. Сер.: Инженерные исследования*. 2017. Т. 18. №4. С. 407–425.
8. Семенов А.Б., Муранов А.Н., Семенов Б.И. Тiхo- и PИM-технологии в современном двигателестроении // *Грузовик*. 2017. №10. С. 3–6.
9. Публичный аналитический доклад по направлению «Новые производственные технологии» / И.Г. Дежина. М.: Сколковский ин-т науки и технологий, 2015. 210 с.
10. Погодина Е. Литье порошковых смесей // *Пластик. Эффективные ТПА*. 2013. №6 (124). С. 34–36.
11. Пархоменко А.В. Развитие связующих веществ в гранулятах для МИМ-технологии // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки*. 2013. №2. С. 91–98.
12. Starting material for injection molding of metal powder: pat. US 5006164A; filed 26.02.90; publ. 09.04.91.
13. Пескова А.В., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование формирования структуры материала титанового сплава ВТ6, полученного методами аддитивных технологий // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. №1 (58). С. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
14. Коротченко А.Ю., Котомин С.В., Тверской М.В., Хилков Д.Э. Разработка нового состава металлической порошковой смеси для литья под давлением // *Литейное производство*. 2018. №2. С. 23–27.

15. Муранов А.Н. Исследование свободной усадки основных типов полимерно-порошковых смесей, применяемых для изготовления деталей из порошковых аналогов стали 38ХМА (42CrMo4) МИМ-методом // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2019. Т. 25. №1. С. 76–86.
16. Яковлев А.Л., Арисланов А.А., Путырский С.В., Ночовная Н.А. Исследование механических свойств и структуры крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6ч // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. №4 (61). С. 12–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-12-18.
17. Пархоменко А.В. Характеристики МИМ-гранулята на основе порошка карбонильного железа марки НМ и полиформальдегида // *Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания*. 2016. №32. С. 89–93.
18. Thermoplastic masses for preparing metallic mouldings: pat. EP 0465940B1; filed 15.01.92; publ. 17.05.95.
19. Семенов А.Б. Разработка методики математического моделирования процесса литья под давлением полимеров, наполненных металлическими порошками // *Технология металлов*. 2019. №1. С. 9–16.
20. Семенов А.Б., Семенов Б.И. Две парадигмы технологий литья изделий из металлов // *Известия вузов. Машиностроение*. 2017. №5. С. 79–98.
21. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Оспенникова О.Г. и др. Металлопорошковые композиции жаропрочного сплава ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ в технологиях селективного лазерного сплавления, лазерной газопорошковой наплавки и высокоточного литья полимеров, наполненных металлическими порошками // *Известия вузов. Машиностроение*. 2016. №9. С. 62–80.
22. Froes (Sam) F.H. Advances in titanium metal injection molding // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2007. Vol. 46. P. 303–310.
23. German R.M. *Powder Metallurgy Science*. 2nd ed. New Jersey: MPIF Princeton, 1994. Chap. 6. 192 p.
24. Froes (Sam) F.H., Yau Te-Lin, Weidenger H.G. Titanium, Zirconium and Hafnium. Chap. 8. *Materials Science and Technology – Structure and Properties of Nonferrous Alloys* / ed. K.H. Matucha. Weinheim: VCH, 1996. P. 401.
25. Froes (Sam) F.H. Titanium // *Encyclopedia of Materials Science and Engineering*. Oxford: Elsevier, 2000. P. 328–340.
26. Froes (Sam) F.H. Titanium Alloys // *Handbook of Advanced Materials*. Wessel: Wiley Interscience, 2004. P. 271.
27. Froes (Sam) F.H. Titanium Metal Alloys: Handbook of Chemical Industry Economics, Inorganic / ed. J. Ellis. New York: John Wiley and Sons Inc., 2000. P. 44–50.
28. Kang L. *Ceramic Membranes for Separation and Reaction*. London: John Wiley and Sons, 2007. 306 p.
29. Boljanovic V. Powder metallurgy // *Metal Shaping Processes: Casting and Molding, Particulate Processing, Deformation Processes, Metal Removal*. New York: Industrial Press Inc., 2009. P. 325–346.
30. Gülsah E., Bülent A., Özkan Gülsoy H. Injection molding of micro-porous titanium alloy with space holder technique // *Rare Metals*. 2011. No. 30. P. 565–571.
31. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Путырский С.В., Крохина В.А. Титанополимерные слоистые материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №S2. С. 56–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-56-62.
32. Коротченко А.Ю., Ковалевич Е.В., Нуралиев Н.Ф., Куций О.Я. Прибор для исследования свободной литейной усадки сплавов // *Литейное производство*. 2020. №11. С. 16–18.
33. Коротченко А.Ю., Хилков Д.Э., Тверской М.В., Хилкова А.А. Об использовании в литейном производстве аддитивных и гибридных технологий // *Литейное производство*. 2019. №6. С. 26–28.
34. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Медведев П.Н., Павлова Т.В. Исследование двухфазного титанового сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Si–β-стабилизаторы // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. №1 (58). С. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
35. Каблов Е.Н. Доминанта национальной технологической инициативы. Проблемы ускорения развития аддитивных технологий в России // *Металлы Евразии*. 2017. №3. С. 2–6.