

УДК 621.74.043.2

О.И. Гришина<sup>1</sup>, А.А. Шавнев<sup>1</sup>, А.Н. Няфкин<sup>1</sup>**ТИПЫ СВЯЗУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ  
ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОРОШКОВ КАРБИДА КРЕМНИЯ (обзор)**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-22-29

*Представлен обзор иностранной печати по вопросу использования различных типов связующих материалов для литья керамических порошков карбида кремния под давлением с целью дальнейшего получения металлического композиционного материала на основе алюминиевого сплава. Обсуждено влияние различных типов связующих веществ на свойства конечных изделий. Представлены основные сведения по технологии литья порошковых смесей.*

*Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 12.1. «Металлические композиционные материалы (МКМ), армированные частицами и волокнами тугоплавких соединений» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].*

**Ключевые слова:** литье порошков под давлением, металлический композиционный материал, карбид кремния, алюминий, связующее, СИМ-технология.

*This paper presents an overview in foreign press on the use of various types of binders for casting silicon carbide powders under pressure to obtain the metal composite materials on the base of aluminum alloy. We observe the influence of various types of binders on the properties of the final products. Basic information on the technology of casting powder mixtures is presented.*

*Work is executed within implementation of the complex scientific direction 12.1. «The metal composite materials (MCM) reinforced by particles and fibers of high-melting connections» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** molding powders under pressure, a metal composite material, silicon carbide, aluminum, binders, ceramic injection molding.

<sup>1</sup>Федеральное 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

**Введение**

До настоящего времени литье порошковых смесей применялось только к полимерам, особенно к термопластам. Металлы и керамика, а также композиционные материалы на их основе имеют преимущества перед полимерами – более высокие прочность и жесткость, более высокую рабочую температуру, а также отличные электрические, магнитные и тепловые свойства. Инжекционное формование порошковых смесей, известное за рубежом под общим названием РИМ-технология, в настоящее время является технологией изготовления металлических (МИМ-технология – Metal Injection Molding) и керамических (СИМ-технология – Ceramic Injection Molding) изделий, изготавливаемых из мелкодисперсных смесей полимерного связующего с различными наполнителями. Такое формование представляет собой объединение пластического формования с порошковой металлургией и позволяет сочетать сложную геометрическую форму детали с ее высокими механическими свойствами. РИМ-технология позволяет получать изделия сложной

формы с высокой повторяемостью свойств и низкой себестоимостью при массовом производстве.

Сырьем для изготовления деталей с помощью РИМ-технологии являются мелкодисперсные порошки керамики (фарфор), железа, цветных металлов и легирующих элементов (конструкционных, нержавеющей, инструментальных сталей; никелевых сплавов, титана) и других фракций размером от 1 до 20 мкм, смешанных со связующим и специальными смазками. Кроме металлических и керамических порошков в качестве наиболее часто встречающихся следует упомянуть также порошковые оксиды циркония и алюминия, карбиды вольфрама, кобальта и кремния, а также силикаты. Практически все материалы, представленные в форме спекаемого порошка, могут быть смешаны с соответствующим полимерным связующим и переработаны на литьевой машине. В качестве связующего обычно используются термопласты или их смеси с насыщенными углеводородами.

Литье керамических материалов экономически эффективно, когда сложные детали высокой точно-

сти исполнения требуется производить в больших количествах. Строгое соблюдение технологического режима литевого цикла и стабильность процесса позволяют производить высококачественные первичные заготовки из порошковых материалов. Сложнейшие детали с внутренней резьбой, выемками сложной формы и высоким качеством поверхности могут производиться на термопластавтоматах быстро и качественно в ручном или автоматическом режимах [2].

Рост производственных мощностей обуславливает быстрорастущий спрос на силовую электронику. Силовая электроника позволяет сделать потребление электроэнергии более эффективным, экономить электроэнергию, потребляемую большим количеством различного оборудования, такого как промышленное оборудование, транспорт, гибридные и электроприводные транспортные средства. Требования к компонентам изделий силовой электроники, обеспечивающим их надежную работу, таким как основания, корпуса, теплоотводящие и охлаждающие элементы, постоянно растут, поэтому разработчики повышают качество и надежность этих изделий путем совершенствования технологий их получения [1, 3–6].

С точки зрения тепловых процессов нормальное функционирование силовых модулей возможно при условии эффективного отвода тепла. В связи с постоянно растущей концентрацией энергии в электронных системах, высокая теплопроводность и низкий температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) теплоотводящих оснований становятся решающим критерием для проектирования высокомоощных модулей. Основным фактором, обеспечивающим максимальную удельную мощность полупроводниковых приборов, является эффективность передачи тепла от кристалла к теплоносителю, характеризующаяся тепловым сопротивлением – чем ниже тепловое сопротивление, тем лучше отвод тепла [7–9].

Используемые в настоящее время теплоотводящие основания на основе меди и ее сплавов уже не соответствуют постоянно возрастающим требова-

ниям к новым приборам силовой электроники в силу их высокого ТКЛР, высокой плотности и стоимости. Как показывает практика, при пайке металлокерамики (DBC-плат) на основание, ухудшается качество поверхности медного основания, появляются местные напряжения и изгибы [10, 11].

После определенного числа термоциклов, из-за постепенного разрушения припоя, ухудшается тепловой контакт между металлокерамической платой и медным основанием, что влечет за собой увеличение градиента температуры, перегрев и тепловое разрушение полупроводникового элемента.

Проблема устраняется использованием конструкции модуля с применением металлического композиционного материала (МКМ) на основе алюминидового сплава, армированного частицами карбида кремния (Al-SiC), в качестве теплоотводящего основания [12–19]. PIM-технология позволяет получать полуфабрикаты для изготовления МКМ системы Al-SiC. Данный материал обладает уникальными свойствами: высокой теплопроводностью, низким ТКЛР, низкой плотностью, высокой механической прочностью. Уникальная совокупность свойств позволяет минимизировать термические напряжения в конструкции силовых модулей с использованием теплоотводящих оснований их МКМ системы Al-SiC [13–15].

#### Технология литья под давлением

Для переработки порошковых материалов требуется перемешать порошковую основу и полимерное связующее, обеспечив таким образом гомогенизацию смеси, после чего с помощью специального экструдера необходимо получить гранулированный материал. Такая композиция называется «фидсток» (*feedstock* – международное обозначение гранулированной смеси порошка и связующего).

PIM-технология состоит из трех этапов (рис. 1). Сначала *feedstock* загружается в бункер термопластавтомата, где при воздействии температуры происходит плавление полимерного связующего, гранулы превращаются в единую массу. Затем

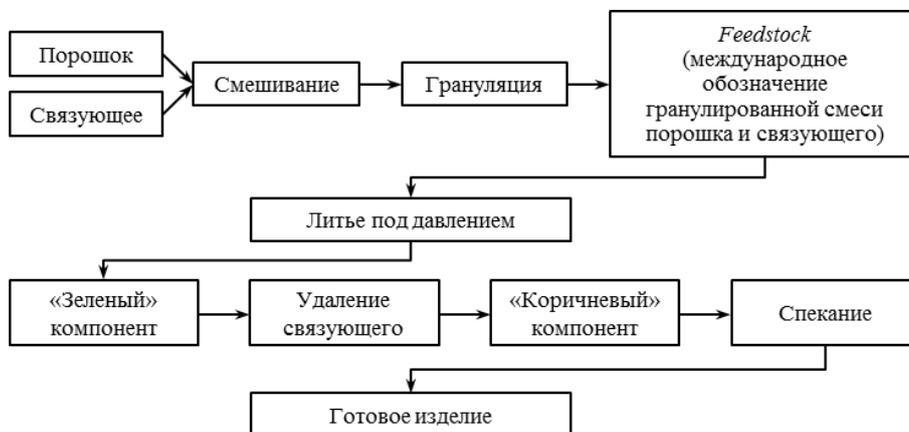


Рис. 1. Этапы PIM-технологии

происходит впрыск под давлением расплавленного *feedstock*, расплав заполняет пресс-форму, где происходит его затвердевание с получением первичной детали, которую называют «зеленой» [1].

Второй этап заключается в удалении из детали полимерного связующего вещества. Иногда «зеленые» заготовки (компоненты) уже полезны для определенных сфер применения, однако в полном РИМ-процессе связующее удаляется с получением «коричневого» компонента (деталь, полученная после удаления связующего). Для удаления связующего существует широкий диапазон методов. Первый – термический способ [20]. Для этого компонент медленно нагревают до разложения связующего. Среди других методов самым популярным является погружение в растворитель для удаления большей части связующего [21, 22]. При этом методе некоторое количество полимера оставляют для удержания частиц порошка для последующей обработки. Оставшееся связующее термически экстрагируется в процессе спекания. Новые типы связующих являются растворимыми в воде, таким образом они могут быть извлечены при погружении в воду [23–25]. Другой популярный метод включает каталитическое термическое разрушение связующего, где большая его часть подвергается действию каталитических паров кислоты [26, 27].

Заключительным этапом РИМ-процесса является спекание в печи, при этом происходит уплотнение материала за счет слияния частиц и устранения пор. Полуфабрикат поступает в специальную высокотемпературную печь спекания с регулируемой атмосферой (вакуум, азот, водород – в зависимости от марки спекаемого материала), где при определенных температурах происходит окончательное спекание его частиц и формирование готовой детали. Размеры конечной детали получаются меньше размеров «зеленой» детали за счет усадки.

Особенности процесса предъявляют определенные требования к исполнению узлов термопластавтомата, которому необходимы:

- специальный бункер – плотность *feedstock* в несколько раз выше плотности обычных пластиков;
- усиленный температурный контроль зоны загрузки;
- шнек специальной геометрической формы, зависящей от особенностей *feedstock*;
- износостойкие шнек и материальный цилиндр, адаптированные для литья абразивных материалов;
- автоматическая система съема изделий (из-за высокой хрупкости «зеленый» компонент не должен выпадать из пресс-формы);
- устройства статистического контроля и специального контроля качества изделий.

Пресс-формы должны иметь высокие показатели износостойкости, каналы большого диаметра и закругленной формы для предотвращения расслоения смеси [2].

Удаление связующего из заготовки изделия является наиболее критическим процессом. При смешивании и литье композиция представляет собой вязкую жидкость. При охлаждении она становится твердой и эластичной. В зависимости от скорости охлаждения при удалении связующего, возникающие остаточные напряжения могут увеличиваться и приводить к образованию дефектов в виде трещин, раковин, вздутий и др. (рис. 2) [28–30].

Прочность «зеленой» заготовки очень важна для поддержания требуемой формы особенно во время удаления связующего, когда материалы могут резко дать усадку под влиянием гравитационной силы. Как правило, потребность в прочности диктует использование мелких частиц с высоким межчастичным трением. Для смеси модуль упругости зависит от состава связующего и твердых частиц.



Рис. 2. Типы дефектов в заготовке изделия, полученной с помощью РИМ-технологии

Адгезия между порошком и связующим важна в зависимости от устойчивости к образованию дефектов, таким образом сырье на основе парафинов (воска) может показать прочность выше, чем сырье на основе полиэтилена. Кроме того, определенные поверхностно-активные вещества (ПАВ) могут улучшить адгезию, прочность и реологические свойства сырья [2].

#### Типы связующих для литья керамических порошков

Связующее может влиять на все стадии производства – начиная с качества смеси для получения гомогенной смеси и до процесса литья, а также влияет на появление дефектных частей и на свойства спеченных частей. Поэтому изучение компонентов связующих, их смешивание и влияние на процесс является особо важным моментом.

По типу связующие делятся на термопласты, полиолефины (смеси с добавлением воска) и прочие (реактопласты, агар и т. д.), а также существуют водорастворимые типы связующих.

Основными требованиями к связующему являются высокая адгезия к порошку, термическая и химическая стабильность, высокая устойчивость в составе «зеленого» компонента, отсутствие адгезии к поверхностям шнека и пресс-формы, возможность простого и полного удаления, низкий процент остатков после удаления из изделия.

Наиболее широко используются связующие на основе термопластов. Они обычно состоят из воска как главного компонента и термопласта как полимерной основы. Добавки вводят для лучшей смазки, для контроля над вязкостью и смачиванием. Удаление связующего обычно проводится

термическим способом, экстракцией растворителем, продувкой или, в редких случаях, фоторазложением [2].

В термопластах часто используют полиэтилен, полистирол, полипропилен и этиленвинилацетат. Несмотря на тот факт, что существует много типов термопластичных связующих, только несколько связующих из них используются в промышленном производстве. Самыми популярными являются связующие на основе воска. Воск выбран в качестве основного компонента ввиду его низкой вязкости, низкой температуры плавления, хорошей смачиваемости и низкой температуры разложения [31]. Это выгодно в процессе смешивания и литья.

Термореактивные смолы с перекрестными связями приводят к формированию физически необратимой трехмерной сети, свойства и форма которой зависят от состава связующего и процесса отверждения. Фенольные и эпоксидные смолы обычно отверждаются при повышенных температурах (между 110 и 180°C) или при смешивании с отвердителем.

В табл. 1 представлены наиболее используемые типы связующих.

Удаление связующего из заготовок проводят термическим разложением или с помощью растворителей. Альтернативная конденсация вулканизация (как правило полиуретанов) обычно включает образование пара как побочного продукта, который является источником дефектов при литье, поэтому только дополнительные реакции вулканизации представляют интерес при проведении РИМ-процесса. Основным преимуществом использования термопластичных связующих является то, что они обеспечивают более высокую проч-

Таблица 1

#### Примеры связующих

| Состав связующего   |
|---|
| <i>Термопластичные связующие</i>  |
| 72% полиэтиленгликоль+24% полиэтилен+4% трикрезил фосфат  |
| 94% поликапролактан+6% стеариновая кислота  |
| 58% полистирол+29% минеральное масло+12% стеариновая кислота  |
| 45% полиамид+25% этилен-бис-лауриламид+30% N,N-диэтил пиперазин   |
| 58% полистирол+30% минеральное масло+12% растительное масло   |
| 44% полистирол+44% минеральное масло+6% полиэтилен+6% стеариновая кислота   |
| 62% парафин+33% полипропилен+5% стеариновая кислота   |
| 80% микрокристаллический воск+20% стеариновая кислота   |
| 74% полистирол+26% бутилолеат   |
| 40% парафин+37% этил(винил)ацетат+сополимер   |
| 79% парафин+10% этил(винил)ацетат+10% полиэтилен высокой плотности+1% стеариновая кислота   |
| 65% полиэтиленгликоль+35% ацетобутират целлюлозы  |
| 60% парафин+10% полипропилен высокой плотности+10% полипропилен+5% жидкий парафин+5% диоктилфталат+5% этилен-пропилен монодиен+5% стеариновая кислота |
| 53% полиэтилен низкой плотности+26% блоксополимер этилен акриловой кислоты+ +21% парафин+5% стеариновая кислота                                       |
| 93% нафталин+6% этил(винил)ацетат+1% стеариновая кислота  |
| <i>Термореактивные связующие</i>  |
| Термореактивная смола на основе метакрилата   |
| 65% эпоксидная смола+25% парафин+10% бутилстеарат   |
| Поликарбосилан+0,5% р-бензохинон+парафин+олеиновая кислота  |
| <i>Гелеобразные связующие</i>   |
| 98,4% вода+1,2% агар+0,4% диспергатор Darvan C  |
| 56,5% вода+25% метилцеллюлоза+12,5% глицерин+6% борная кислота  |

ность «зеленой» заготовки из-за образующейся структуры с поперечными связями [2].

В работе [32] при инъекционном литье порошка карбида кремния для изготовления МКМ на основе алюминиевого сплава в качестве связующего применялись термопластичные связки – полиэтилен низкого давления с добавлением стеариновой кислоты. При этом полученная термопластичная масса имела минимальную концентрацию связующего, необходимую для образования литейной системы, обеспечивая минимальную объемную усадку и максимальную прочность материала заготовки после литья (термопластичного материала). В качестве основы термопластичного связующего использовали парафиновую связку. Парафин обладает низкими температурами плавления (51°C) и кристаллизации (54–55°C), низкой вязкостью (0,73 Па·с – при 70°C), небольшой величиной объемной усадки при охлаждении (10%).

Полученную смесь порошка карбида кремния и связующего подвергали экструзии, охлаждению и дроблению с целью получения сырья для последующего инъекционного формования. После литья на инъекционной машине полученные «зеленые» заготовки подвергали пропитке расплавом алюминия при температуре от 1000 до 1200°C.

На рис. 3 представлена зависимость температуры литья смеси от давления. Область II (давление впрыскивания 60–80 МПа и температура 160–175°C) соответствует получению «зеленой» заготовки без видимых дефектов. С уменьшением давления впрыскивания (область I) вязкость смеси увеличивается, что приводит к образованию дефектов.

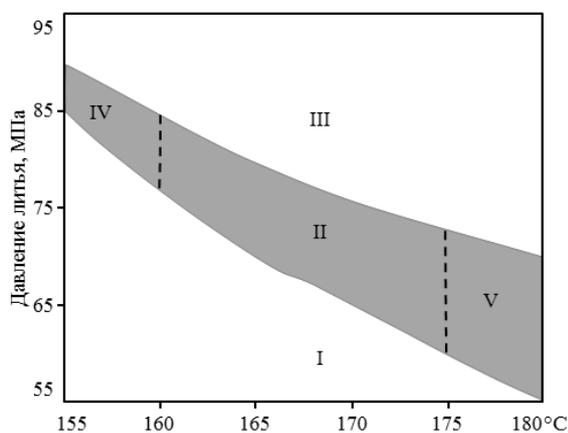


Рис. 3. Зависимость температуры литья от давления

При увеличении давления впрыскивания (область III) происходит вовлечение газа в смесь, что приводит к образованию пор. В областях IV и V дефекты в виде пор не наблюдались, однако в заготовке присутствовали трещины, возникающие вследствие высокого давления впрыскивания смеси и низкой температуры (область IV). При более низкой вязкости смеси вследствие низкого давления впрыскивания и высокой температуры смесь приклеивалась к поверхности пресс-формы (область V). На основании полученных результатов для формирования «зеленой» заготовки выбраны следующие технологические параметры впрыскивания смеси: давление ~75 МПа и температура ~170°C.

В работе [33] для формирования «зеленой» заготовки из порошков SiC с размером частиц 10, 14, 28, 40 и 70 мкм для изготовления МКМ на основе алюминиевого сплава системы Al–12Si в качестве связующего использовали парафин (65% по массе), полиэтилен низкого давления (29% по массе) с добавлением стеариновой кислоты (1% по массе). Формирование «зеленой» заготовки проводили при температуре 150°C и давлении 80 МПа. Удаление связующего проводили в два этапа: растворение в бензине в течение 28 ч, термическое удаление в атмосфере водорода. Композиционный материал на основе алюминиевого сплава получали методом пропитки под давлением при температуре 800°C и давлении 80 МПа.

Для формирования «зеленой» заготовки из порошков карбида кремния в качестве связующего также используют смесь парафина и воска. Так, в работе [34] использовали порошок карбида кремния со средним размером частиц 5 и 28 мкм. В качестве термопластичного связующего применяли смесь парафина и воска при соотношении компонентов: 94% (по массе) парафина+6% (по массе) пчелиного воска. Подготовку термопластичных масс проводили на трехскоростном смесительном устройстве объемом 2 л установки для горячего шликерного литья. Характеристики исследуемых термопластичных масс представлены в табл. 2.

Процесс инъекционного литья при давлении 2–9,5 МПа исследовали на установке для инъекционного литья термопластичных масс, имеющей систему вакуумирования рабочего объема. Эксперименты при давлении 0,5 МПа проводили на установке для шликерного литья. Инъекционное

Таблица 2

Характеристики термопластичных масс на основе карбида кремния при составе шихты 100% (по массе) SiC

| Средний размер частиц порошка, мкм | Содержание связующего, % |           | Вязкость, Па·с (при 65°C) |
|------------------------------------|--------------------------|-----------|---------------------------|
|                                    | по массе                 | по объему |                           |
| 28                                 | 19,3                     | 46,0      | 15                        |
| 5                                  | 21,1                     | 48,9      | 28                        |

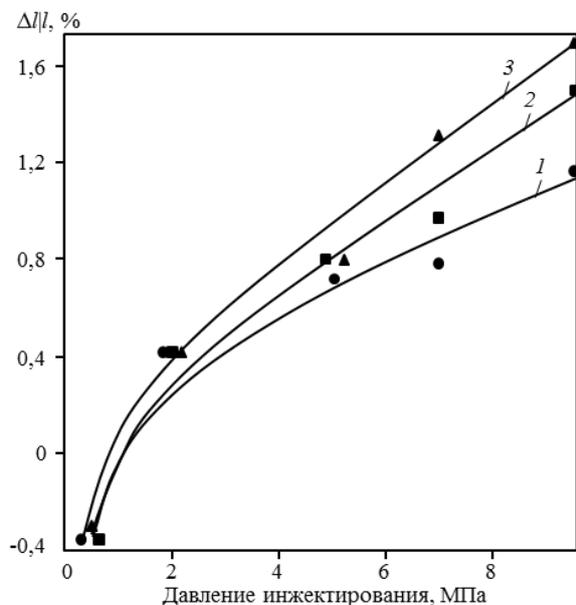


Рис. 4. Зависимость изменения размеров изделий из термопластичной смеси состава 54% SiC (28 мкм) и 46% парафина при охлаждении пресс-формы от давления инжектирования при 68 (1), 79 (2), 82°С (3)

литье осуществляли путем заполнения металлической пресс-формы термопластичной массой, разогретой до заданной температуры, и выдержки ее под давлением в течение времени, необходимого для охлаждения массы в форме. В данной работе использовали формы для получения модельных изделий размером 32×45×6,3 мм (объем 9,1 см<sup>3</sup>) и 6×6×40 мм (объем 1,4 см<sup>3</sup>). Время выдержки под давлением после инжектирования массы в пресс-форму было определено на основании ранее проведенных исследований и составляло 8–10 с.

На рис. 4 и 5 представлены результаты исследования относительного изменения линейных размеров ( $\Delta l/l$ ) модельных изделий из термопластичных материалов на основе порошков SiC (со средним размером частиц 28 и 5 мкм) после инжекционного литья при выдержке под давлением 8–10 с и охлаждения без приложения давления в течение ~10 с. Установлено, что в образцах из материала на основе SiC (28 мкм) происходит увеличение размеров при давлении инжектирования, равном 2–9,5 МПа: на ~1,7% при давлении 9,5 МПа и температуре в рабочем цилиндре 82°С (см. рис. 4). При давлении 0,5 МПа (горячее шликерное литье) в образцах наблюдали усадку на ~0,4%. Такой характер изменения размеров в зависимости от давления инжектирования можно объяснить явлением упругого последействия после снятия приложенного давления. Увеличение объема спрессованного методом холодного прессования изделия наблюдается после снятия давления и при выпрессовке изделия из матрицы пресс-формы. Увеличение объема происходит в резуль-

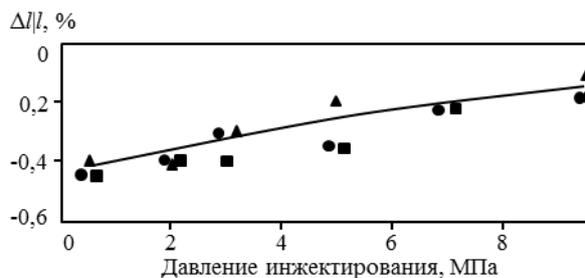


Рис. 5. Зависимость изменения размеров изделий из термопластичной смеси состава 51,1% SiC (5 мкм) и 48,9% парафина при охлаждении пресс-формы от давления инжектирования при 68 (●), 79 (■), 82°С (▲)

тате воздействия внутренних напряжений, возникающих в процессе уплотнения вещества при прессовании. Это явление называют упругим последействием. Очевидно, что при инжекционном литье термопластичных масс на основе керамических порошков также существует упругое последействие. После инжектирования при выдержке под давлением 2–9,5 МПа в рабочей полости пресс-формы происходит отверждение термопластичной массы и формируется заготовка изделия, в материале которого возникают внутренние напряжения. При последующей распрессовке под их воздействием происходит увеличение объема изделия. Этот эффект в наибольшей степени проявляется в термопластичных материалах, содержащих крупнодисперсные порошки, в данном случае – порошок SiC со средним размером частиц 28 мкм.

Установлено, что с увеличением температуры процесса существенно увеличивается эффект упругого последействия. Так, при давлении инжектирования 9,5 МПа с увеличением температуры с 68 до 82°С относительное изменение размеров заготовок увеличивается на ~0,5%. В образцах термопластичного материала на основе порошка SiC со средним размером частиц 5 мкм также увеличиваются размеры с ростом давления – линейная усадка уменьшается с ~0,4% при давлении 0,5 МПа до ~0,1% при давлении 9,5 МПа (рис. 5).

На основании полученных результатов сделано заключение, что с увеличением давления инжектирования, температуры процесса, размеров

частиц порошка в термопластичном материале увеличивается эффект упругого последствия.

### Заключение

Применение РИМ-технологии позволяет оптимизировать конструкцию детали: РИМ-процесс снимает практически все ограничения по сложности формы изготавливаемой детали. Все, что было принципиально невозможно реализовать из-за ограничений механической обработки, теперь стало доступно. Конструкторы получили возмож-

ность ставить при проектировании на первое место функциональные приоритеты, а не возможности традиционных технологических процессов.

РИМ-технология позволяет получать детали с минимальной толщиной сечения от 0,4 до 30 мм с допусками в пределах 0,1 мм на каждые 25 мм линейных размеров детали. Однако при условии подбора особых режимов технологического процесса и применении специальных методов контроля можно значительно улучшить эти показатели, гарантируя при этом их повторяемость.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Погодина Е. Литье порошковых смесей // *Пластикс*. 2013. №6 (124). С. 34–36.
3. Singh Sarabjot, Yuniior B. Tech, Ryssel Heiner. Lifetime of power modules // 7<sup>th</sup> Indo-German winter academy: proceedings. Germany. 2008.
4. Gilleo K. MEMS/MOEMS Packaging Concepts, Designs, Materials and Processes // *Nanoscience and Technology Series*. USA. NY-Chicago: McGraw-Hill. 2005. 239 p.
5. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
6. Тарасов Ю.М., Антипов В.В. Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 5–6.
7. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
8. Манохин А.И., Ениколопов Н.С., Фридляндер И.Н. и др. Композиционные материалы. М.: Наука, 1981. С. 92–98.
9. Occhionero M.A., Adams R.W., Saums D. AlSiC for Optoelectronic Thermal Management and Packaging Designs. 2001. URL: <http://www.alsic.com> (дата обращения: 03.03.2015).
10. Occhionero M.A., Fennessy K.P., Sundberg G.J. AlSiC Baseplates for Power IGBT Modules: Design, Performance and Reliability, *Ceramics Process Systems*. 2003. URL: <http://www.alsic.com> (дата обращения: 03.03.2015).
11. Аксенов А.А. Металлические композиционные материалы, получаемые жидкофазными методами // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 1996. №2. С. 34–46.
12. *Алюминиевые сплавы* / В кн. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди; под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. С. 143–156.
13. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Гращенков Д.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н. Металломатричные композиционные материалы на основе Al–SiC // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 373–380.
14. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Щетанов Б.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н., Вдовин С.М., Нищев К.Н., Чибиркин В.В., Елисеев В.В., Эмих Л.А. Металлические композиционные материалы на основе Al–SiC для силовой электроники // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2012. Т. 18. №3. С. 359–368.
15. Каблов Е.Н., Чибиркин В.В., Вдовин С.М. Изготовление, свойства и применение теплоотводящих оснований из ММК Al–SiC в силовой электронике и преобразовательной технике // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 20–22.
16. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сенник В.Я., Коновалов В.В., Трунин Ю.П., Нестеренко Г.И. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 14–16.
17. Гриневич А.В., Луценко А.Н., Каримова С.А. Расчетные характеристики металлических материалов с учетом влажности // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №7. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.03.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-10-10.
18. Гончаренко Е.С., Трапезников А.В., Огородов Д.В. Литейные алюминиевые сплавы (к 100-летию со дня рождения М.Б. Альтмана) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №4. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.03.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-2-2.
19. Kumai S., King J.E., Knott J.F. Fatigue in SiC-particulate-reinforced aluminum alloy composites // *Mater. Sci. and Eng. A*. 1991. V. 146. P. 317–326.
20. Truncic M., Cihlar J. Thermal debinding of injection moulded ceramics // *J. Eur. Ceram. Soc*. 1997. V. 17. P. 203–209.
21. Li S. et al. A new type of binder for metal injection molding // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. V. 137. P. 70–73.
22. Tsai D.-S., Chen W.-W. Solvent Debinding Kinetics of Alumina Green Bodies by Powder Injection Molding // *Ceramics International*. 1995. V. 21. P. 257–264.
23. Yang W.-W. et al. Solvent debinding mechanism for alumina injection molded compacts with water-soluble

- binders // *Ceramics International*. 2003. V. 29. P. 745–756.
24. Cao M.Y., O'Connor J.W., Chung C.I. A new water soluble solid polymer solution binder for powder injection molding / In: *Powder Injection Molding Symposium*. 1992.
25. Park M.S., Kim J.K., Sangho Ahn H.J.S. Water-soluble binder of cellulose acetate butyrate/poly (ethylene glycol) blend for powder injection molding // *Journal of Materials Science*. 2001. V. 36. P. 5531–5536.
26. Krug S., Evans J.R.G., ter Maat J.H.H. Reaction and Transport Kinetics for Depolymerization within a Porous Body // *AIChE Journal*. 2002. V. 48(7). P. 1533–1541.
27. Starting a New Era in Catalytic Debinding of MIM Components. CFI – Ceramic Forum International. 2006.
28. German R.M. *Powder injection molding* // Princeton, USA: Metal Powd. Industr. Fed. (MPIF). 1990. 521 p.
29. Грибовский П.О. *Керамические твердые схемы*. М.: Энергия, 1971. 448 с.
30. Li Y., Huang B., Qu X. Viscosity and melt rheology of metal injection moulding feedstocks // *Powder Metallurgy*. 1999. V. 42. №1. P. 86–90.
31. Hsu K.C., Lin C.C., Lo G.M. Effect of wax composition on injection moulding of 304L stainless steel powder // *Powder Metallurgy*. 1994. V. 37 (4). P. 272–276.
32. HE XinBo, QU Xuan Hui, REN Shu Bin & KF Cheng Chang. Net-shape forming of composite packages with high thermal conductivity // *Sci. China Ser E-Tech Sci*. Jan. 2009. V. 52. №1. P. 238–242.
33. Chu K. et al. The thermal conductivity of pressure infiltrated SiCp/Al composites with various size distributions: Experimental study and modeling // *Materials and Design*. 2009. V. 30. P. 3497–3503.
34. Ивженко В.В., Новиков Н.В., Сарнавская Г.Ф., Попов В.А., Лошак М.Г., Александрова Л.И. Исследование упругого последствия при инъекционном литье термопластичных масс на основе порошков SiC, AlN, WC и его влияния на механические свойства материала заготовок изделий // *Сверхтвердые материалы*. 2009. №1. С. 49–57.