



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-4-407-425

УДК 621.763+621.74.04

## ИНЖЕКЦИОННОЕ ЛИТЬЕ СТРУКТУРИРОВАННЫХ МНОГОФАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Б. Семенов, А.Н. Муранов, А.А. Куцбах, Б.И. Семенов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)  
ул. 2-я Бауманская, 5/1, Москва, Россия, 105005

Современное и перспективное машиностроение требует использования новой совокупности методов обработки, изготовления, изменения состояния материалов, осуществляемых в процессе производства продукции. В частности, уровень современных и перспективных заготовительных производств во многом связан с развитием инжекционного литья структурированных многофазных материалов — порошковых и гранульных технологий нового поколения. В настоящей статье рассмотрены такие широко востребованные зарубежной промышленностью современные технологии инжекционного литья структурированных многофазных материалов, как технология инжекционного литья полимерно-порошковых смесей (*PIM*) и технология тиксоформинга. Дано описание специфических реологических эффектов, определивших принципиальную возможность появления и практического применения названных технологий, рассмотрены отдельные наиболее значимые физико-математические модели реологического поведения структурированных многофазных материалов. Показаны эффективность внедрения и высокий потенциал развития на территории Российской Федерации технологии *PIM* для массового производства малогабаритных фасонных деталей. Отмечена необходимость развития образовательных программ и стандартов, включающих в себя специальные дисциплины и спецкурсы, направленные на подготовку технических специалистов не только в области широко используемых в настоящее время технологий, но и таких перспективных технологий как технология *PIM* и технология тиксоформинга.

**Ключевые слова:** порошки, гранулы, многофазные материалы, структурирование, инжекционное литье, реология, моделирование

Повышение требований к уровню физико-механических свойств материалов, к их стабильности при работе в экстремальных условиях нередко заставляет создавать конструкционные материалы под конструируемые изделия, проводя взаимосвязанные конструкторские и материаловедческие исследования. В результате, как альтернатива традиционным технологиям, стремительно развиваются и совершенствуются методы порошковой и гранульной металлургии, осуществляется гранулирование и сфероидизация частиц твердой фазы “in-situ” на стадии подготовки сплава, предвещающей стадию литья, а на этой основе происходит создание и освоение новых технологий — технологий *инжекционного литья структурированных многофазных материалов*, получивших название *Thixo-* и *PIM (MIM, CIM)* технологии и содержащих в своем названии термины “slurry on demand,

powder, casting, molding”, характеризующие принадлежность этих технологий и к порошковой металлургии, и к литейному производству.

Сохраняя приверженность к тысячелетней традиции производства фасонных изделий из металлов литьем, литейщики непрерывно совершенствуют методы формообразования. Однако традиционно организованные литейные процессы порождают сопутствующие проблемы качества отливки, вызываемые одновременным (сопряженным) протеканием процесса кристаллизации сплава и процесса формирования изделия в литейной форме. На протяжении последней четверти века становится все более очевидным, что омоложение отрасли требует не только использования новых приемов (методов литья): необходимы изменения в системе взглядов на принципы, т.е. на идеологию литья. Суть новой формирующейся идеологии, — процесс кристаллизации металла и процесс формообразования изделия могут и должны быть частично или полностью разделены, а *формообразующую полость нужно заполнять структурированным многофазным материалом*. Новые технологии объединяет ранее неизвестный у металлов, но определяющий способность к «легкому» течению структурированных многофазных материалов «**эффект тиксотропии**», породивший технологии, сегодня объединяемые термином «**тиксоформинг**». Однако до настоящего времени этот термин даже не фигурирует в отечественных учебниках по свойствам сплавов, написанных для литейщиков.

При тиксоформинге процессы кристаллизации металла и формирования отливки частично разделены в пространстве и времени: в литейную форму поступает металл, уже закристаллизованный примерно на 50%. В промышленности тиксотехнологии получили наибольшее развитие в последнюю четверть прошлого столетия в зарубежном автомобилестроении, что выразилось в замене многих чугунных деталей легкового автомобиля изделиями из алюминиевых сплавов. В России в 2006 году (по экспертной оценке) из алюминиевых сплавов было произведено только 340 тыс. т фасонных отливок, из которых 45% — литьем под давлением (ЛПД). Однако около 70% машин ЛПД — это устаревшее оборудование, проработавшее к тому времени более 20-ти лет. По мнению специалистов для развития литья цветных сплавов необходимо пересмотреть позицию конструкторов, создать новые ГОСТы, совершенствовать технологию получения первичных материалов.

В *MIM* технологии перерабатываемый литьем материал — это порошковый шликер, в котором доля закристаллизованного вне литейной формы металла доведена до 100%. Метод пригоден для производства изделий сложных форм как в больших, так и в небольших объемах из почти всех типов материалов, включая металлы, интерметаллические соединения и композиты. На рисунке 1 демонстрируется **возможность такого формования изделий — литья сложнейших деталей**, геометрия которых соответствует желанию конструктора, **из порошков любых промышленных конструкционных материалов**. Литейщики России, а может быть и кузнецы, занимающиеся порошковыми технологиями должны, наконец, приступить к реализации второй парадигмы литья изделий из металлов, имеющей глубокие корни в нашей стране. Первое изобретение П. Грибовского и авторское свидетельство на эту тему, датированное 1948 годом, привязано ко всем классам

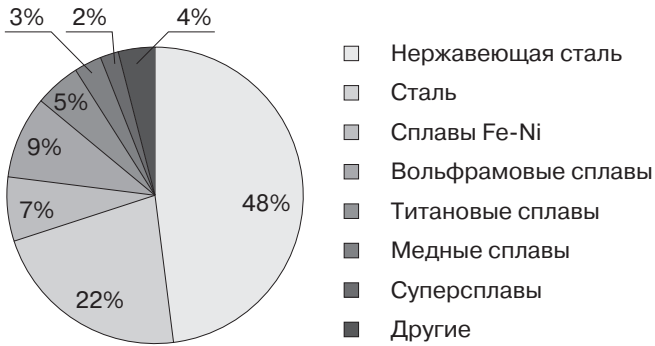
инженерных материалов, включая металлы и композиты, но в нашей стране до настоящего времени оно применено только к керамикам. Интерес к *PIM* деталям проявился в связи с развитием авиационно-космической техники и оружия, там, где увеличение количества литых деталей в составе изделия сдерживалось низким уровнем технологии изготовления отливок. Однако очень быстро *MIM* и *СIM* технологии заняли особую нишу, связанную с миниатюризацией и повышением сложности проектируемых конструктором деталей. За рубежом детали, изготовленные по *MIM* технологии, находят применение в таких отраслях промышленности, как автомобилестроение, химия, аэрокосмическая промышленность, компьютерная техника, биомедицина и вооружения [1–9].

Выбор материалов для деталей машин и приборов определяется эксплуатационными, технологическими и экономическими требованиями. Конструкторские разработки изделий новой техники, которые нередко должны работать в экстремальных условиях, предъявляют повышенные требования к материалам. Одновременно с повышением уровня требований к физико-механическим свойствам материалов конструкционного назначения разработчики изделий расширяют функциональные нагрузки изделий, нередко прибегая к использованию импортных материалов и технологий. Большинство предприятий сегодня закупают и используют лишь аналоги зарубежного производства, включая оборудование и материалы для 3D печати.

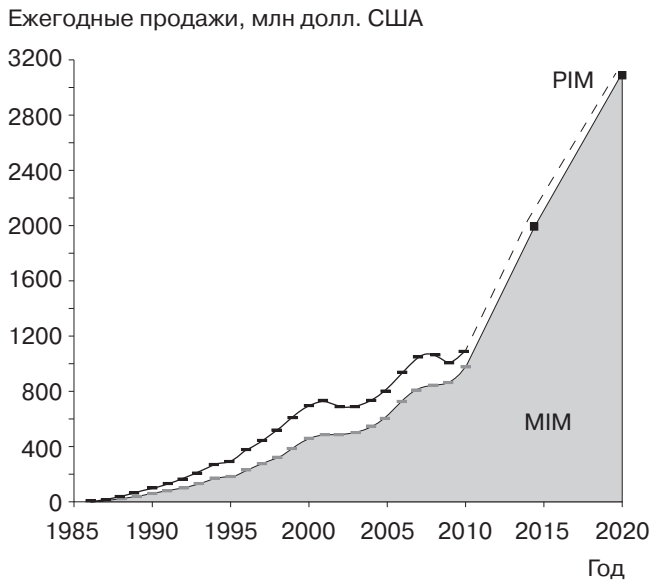
Порошковая металлургия нередко позволяет уменьшать потери металла в десятки раз, а возможность широкого варьирования составами порошковых сплавов позволяет получать специфические свойства, которые недостижимы при использовании традиционных способов изготовления изделий. Современное развитие методов традиционной порошковой металлургии (*ПМ*) выразилось не только в рождении порошковой технологии селективного лазерного сплавления (*SLM*), но еще ранее — технологии инъекционного литья металлических порошковых материалов (*MIM*), что на сегодняшний день международными организациями и техническими комитетами по стандартизации в *ИСО* в области *ПМ* рассматривается как появление отдельной отрасли *ПМ*, получившей обобщающее название технологии инъекционного литья порошков (*PIM*) (см. рис. 1). Как видно из приведенной на рисунке диаграммы, современные *MIM* технологии охватывают все классы традиционных конструкционных материалов, но основная часть ( $48 + 22 + 7 = 77\%$ ) материалов — это традиционные для литейных производств страны сплавы на основе железа. Актуальной становится проблема о месте *Thixo*- и *PIM* технологий в современных заготовительных производствах отечественных машиностроительных предприятий, вступающих в конкурентную борьбу в рамках глобализации мировой экономики и *ВТО*.

По оценкам зарубежных специалистов основные преимущества принципиально нового направления в технологиях порошковой металлургии состоят в сокращении времени производства деталей из порошков, снижении отходов материала и потребления энергии, затраченных при их производстве. Структура производства машиностроительных деталей конструкционного назначения, принципиально отличного от традиционного, и стремительный рост мирового объема *PIM* продаж (всего 9 млн долл. США в 1986 г.) хорошо видны из подго-

товленной по литературным данным информации, представленной на рисунке 1 и в таблице 1.



а



б



в

**Рис. 1.** а — доли использования различных сплавов в MIM индустрии; б — зависимость объема продаж MIM (нижняя кривая) как доля объема PIM продаж; в — изделия из различных материалов, изготовленные с использованием PIM (MIM)

**[Fig. 1.** а — Proportion of usage of various alloys in MIM industry; б — Graph of MIM market sales (lower curve) as a fraction of PIM sales; в — Products from various materials manufactured using PIM (MIM)]

В современной *MIM* фирме отсутствует плавильное отделение, не осуществляются процессы плавки металлов, но есть литейное отделение, состоящее из машин литья под давлением. Для формования металлических порошков инъекционным литьем определяющим этапом становится стадия производства, отвечающая за процессы получения нового литейного материала, названного в таблице 1 *фидстоком*. *MIM*-фидсток представляет собой композиционный материал из металлических порошков требуемого химического состава (около 60% по объему и до 90% и более по массе) и легкоплавкого полимерного связующего. Технологические свойства фидстока устанавливают пригодность такого материала для литья, для последующего полного удаления связующей смеси без разрушения формовки (литой фасонной заготовки), — процесса, названного в таблице 1 *дебиндингом*, и для превращения пористого изделия в монолитное спеканием порошка. Установлено, и это обстоятельство отражено в таблице 1, что в наиболее ответственных случаях фирма-изготовитель деталей организует производство необходимых фидстоков внутри предприятия. Новые технологии потребовали нового уровня интеллектуальной подготовки у производителя и нового уровня техники контроля процессов, осуществляемых при подготовке литейного материала, на машинах литья под давлением и в специализированных печах дебиндинга и спекания.

Примеры точных *MIM* деталей сложной конфигурации, не требующих механической обработки перед их использованием в изделиях, показаны на рисунках 2 и 3. Принципиальная новизна новых технических решений — это предварительное создание из порции металла и неметаллического компонента *двухфазной твердоджидкой среды с высокой долей твердой фазы* (до 60 об.% и более), сочетающей свойства твердого тела и жидкости и *способной* в таком состоянии *к заполнению формообразующей полости за счет склонности суспензий к размягчению и проявлению эффекта тиксотропии*.

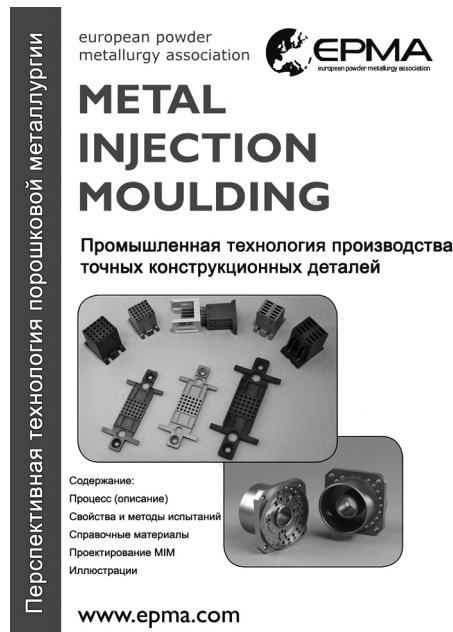
Таблица 1

**Количественные и качественные характеристики PIM**  
[Quantitative and qualitative characteristics of PIM]

Характеристика	2010 г.	2012 г.
Общий объем PIM продаж, млрд долл. США	1,10	1,45
Общее количество PIM фирм	366	445
Общее количество работников	8 000	13 800
Продажи на одного работающего, долл. США	126 000	239 000
Продажи на одну литейную машину, долл. США	538 000	554 000
Продажи на одну производственную печь, долл. США	980 000	1 243
Доля фирм, изготавливающих фидстоки для себя, %	72	72–76
Доля фирм, использующих термический дебиндинг, %	49	43
Доля фирм, использующих растворный дебиндинг, %	26	24
Доля фирм, использующих каталитический дебиндинг, %	14	21
Доля фирм, использующих другие виды дебиндинга, %	11	11
Средняя масса детали, г	6	40



**Рис. 2.** MIM детали сложной конфигурации, не требующие механической обработки  
[Fig. 2. Complex-shaped MIM parts that do not require machining]



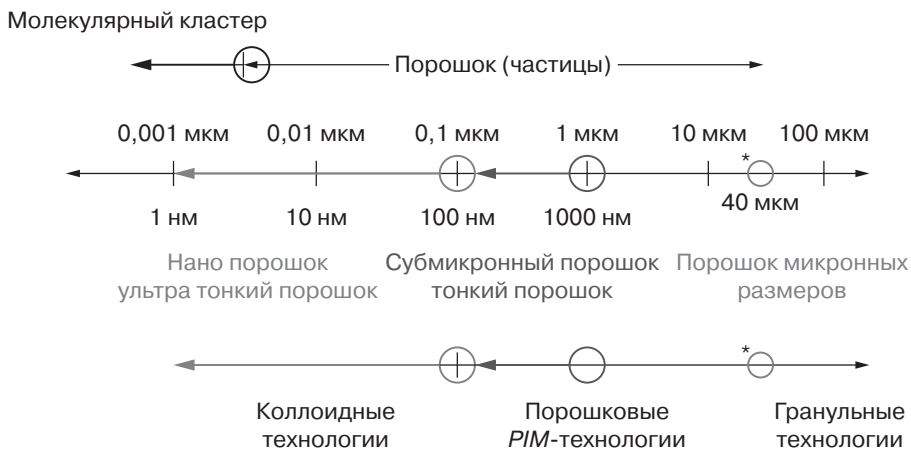
**Рис. 3.** Титульный лист пособия по MIM технологии производства точных деталей  
[Fig. 3. Title page of the manual on MIM technology of manufacturing precision parts]

По определению, даваемому международным стандартом ИСО 3252:1999 и соответствующему действующему в России стандарту ГОСТу 17359—82, такая среда, являющаяся устойчивой текучей вязкой суспензией порошка, распределенного в жидкости, называется шликером. Значительные исследования, проведенные в СССР еще в 40-е годы прошлого столетия в области горячего литья под давлением шликеров, содержащих керамические порошки, не привлекли внимания ни практиков, ни теоретиков в области литья металлических материалов.

Развитие новых технологий — предмет заботы правительственных и неправительственных организаций, объединяющих специалистов соответствующей отрасли. Например, в рамках Европейской Ассоциации Порошковой Металлургии (ЕРМА) с начала 2000-х в Европе создана и активно работает группа EuroMIM, которая охватывает более 70 компаний со всей Европы. Задачи группы следующие: оценка потенциала и возможностей *MIM*, продвижение *MIM* к конечным пользователям, обеспечение единой европейской позиции во внешнем мире. Один из продуктов деятельности группы, справочное пособие по *MIM* технологии, титульный лист которого в редакции авторов представлен на рисунке 3. Подобные работы в России до настоящего времени не публиковались и, по-видимому, не проводились.

Изучение мирового опыта современных производств показывает, что создание эффективных технологий формообразования фасонных деталей из структурированных многофазных материалов невозможно без развития новых направлений в теории литья, которые в теоретическом плане опираются на физико-химическую динамику дисперсных систем. Физико-химическая динамика, — это получивший развитие на стыке тысячелетий раздел физической химии дисперсных систем, изучающий механизмы образования и разрыва межмолекулярных связей в контактах между частицами и образуемыми ими структурами в динамических условиях. Изучение динамики контактных взаимодействий, кинетики и стадийности структурообразования в дисперсных системах в динамических условиях в присутствии добавок поверхностно-активных веществ, обоснование и разработка методов достижения максимальной текучести новых литейных материалов при устранении расслоений и разрывов сплошности, — вот главные научные проблемы в технологиях инъекционного литья структурированных многофазных материалов.

Современные порошковые технологии начинаются с классификации порошков по размерам (рис. 4), где *PIM* технологии занимают свою заметную нишу: чаще всего используемые керамические порошки (*CIM*) занимают диапазон размеров 0,1—2,0 мкм, а металлические (*MIM*) 1—40 мкм.



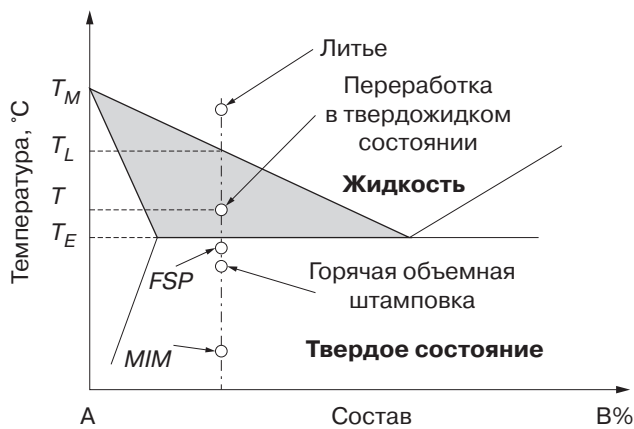
**Рис. 4.** Классификация порошков и технологий в зависимости от размеров порошков  
**[Fig. 4.** Classification of powders and technologies based on the particle size of powders]

Оценки эффективности уже коммерциализованных производств и возникновение большого количества специализированных зарубежных фирм показывают, что сегодня модернизация экономики и ресурсосберегающее инновационное развитие России требуют углубленного изучения зарубежного опыта организации в машиностроении современных заготовительных производств, ориентированных на литейные порошковые и гранульные технологии. В новых способах формовки изделий литьем из структурированных многофазных материалов, совершенно очевидно для специалиста, проявляется подобие в используемых теоретических моделях формирования отливки [1–9]. Это позволяет рассмотреть тиксо- и *PIM* технологии с единых позиций, что в итоге способствует более глубокому пониманию результатов проводимых исследований и их более широкому использованию для решения прикладных задач. Но это также означает, что для освоения отечественным машиностроением новых эффективных технологий заготовительных производств, использующих современные специальные способы литья фидстоков и тиксозаготовок, должна быть предложена и новая база, — *научные основы технологий литья структурированных многофазных материалов*, отсутствующие в действующих учебниках [10–13].

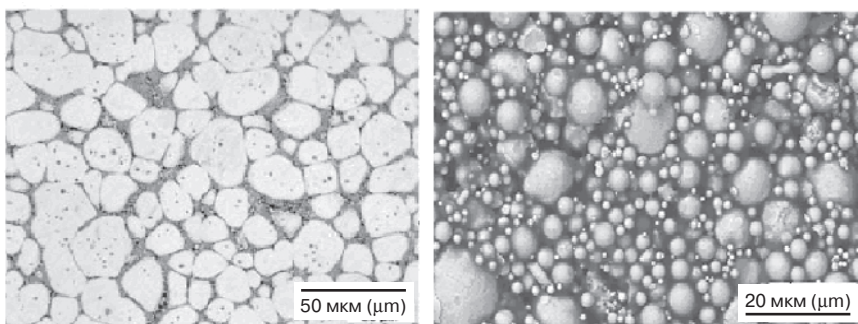
Однако в России до настоящего времени нет и ни одного промышленного предприятия с полным циклом *PIM* (*MIM*) производства. Трудно оценить экономическую эффективность организации подобного производства в России, если для его осуществления материалы и технологическое оборудование привозятся из-за рубежа, технологическая оснастка конструируется за рубежом, материалы сертифицируются по зарубежным стандартам. Нужна подготовка национальных кадров. Сегодня нет ни одной зарубежной или российской фирмы, производящей фидстоки в России, а великолепные и пригодные для производства 77% фидстоков (см. рис. 1) порошки отечественного карбонильного железа вывозятся за рубеж лишь в виде конечного продукта, без переработки в продукты с более высокой добавленной стоимостью [14]. Постоянное повышение служебных характеристик материалов связано с неизменно растущим уровнем требований к конкурентоспособным изделиям новой техники, определяющим качество и надежность деталей машиностроительных конструкций. Современные конструкторско-технологические решения, направленные на получение оптимальных пространственных конфигураций деталей, на существенное сокращение количества сборочных единиц, на совмещение многих функций в одной детали и миниатюризацию изделий, ведут к максимальному уменьшению количества механических или сварных соединений в узле или агрегате, но требуют повышения надежности и стабильности технологического обеспечения установленных требований конструкторской документации в части механических свойств, размерной точности и качества поверхности заготовок, химического состава применяемых материалов и т.п. Сказанное делает актуальной проблему быстреего освоения «дома» тиксоформинга и *PIMa*, — технологий нового поколения, которые должны строиться на реологических моделях структурированных тиксотропных жидкостей, предпочтительно должны ориентироваться на использование специализированных материалов отечественного производства и опираться в этом на *базу национальных и международных стандартов*.



В рамках развития механики диссипативных систем строится изучение, тиксоформирования (тиксоформинга), фрикционной перемешивающей обработки металлов в отливках и *PIM*. В МГТУ им. Н.Э. Баумана эти исследования проводятся с начала 2000-х годов, а для изучения названных технологий с общих позиций реологии в 2015 году создана специализированная межфакультетская лаборатория [15–22]. Потребность в обеспечении требуемой текучести при минимальном количестве в материале тепловой энергии заставила технологов сконцентрировать внимание на управлении вязкостью используемых систем материалов особыми приемами, на создании таких условий течения, которые приемлемы для реализации в машиностроительных технологиях, заменяя этими приемами выбор температуры заливки и напор столба жидкости. Такими приемами стала подготовка из традиционных сплавов специальных материалов, — **тиксозаготовок и фидстоков**, — структурированных многофазных материалов, размягчающихся в суспензированном состоянии под воздействием сдвиговых деформаций (рис. 5).



а



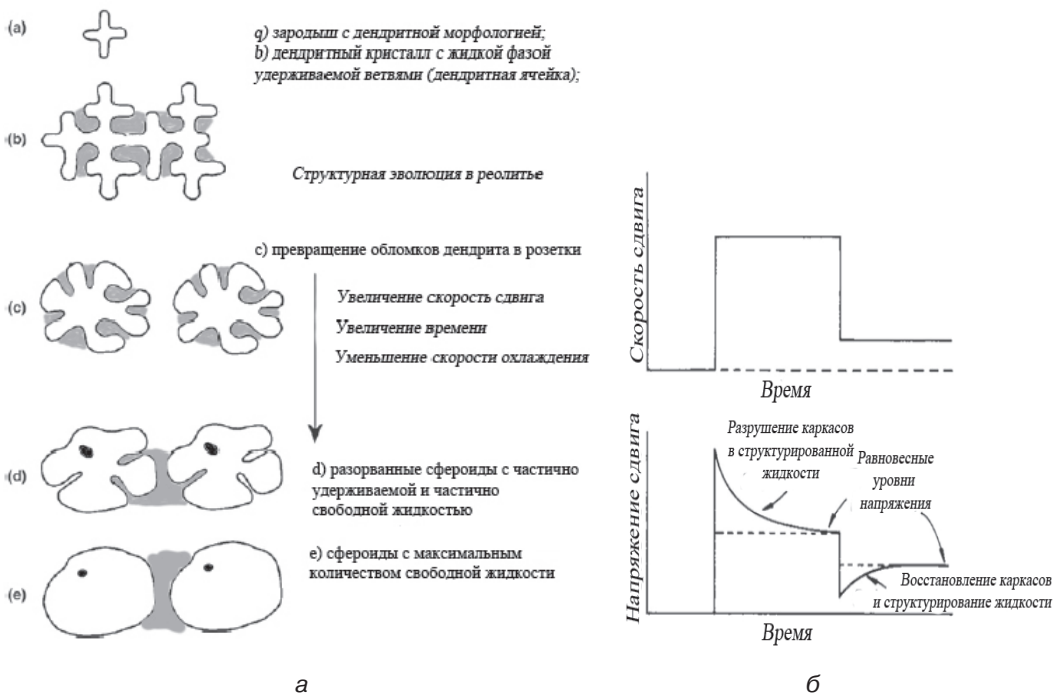
Глобулярная структура металла в твердожидком состоянии

Структура металла, приготовленного для MIM процесса

б

**Рис. 5.** а — применимость различных технологий в зависимости от состояния материала; б — микроструктуры тиксозаготовки и фидстока, подготовленных для литья  
**[Fig. 5.** а — Applicability of different technologies depending on material condition; б — Microstructures of thixotropic material and feedstock prepared for casting]

Эффект тиксотропии — это обратимое изменение вязкости структурируемой твердой жидкой среды, проявляющееся при постоянной температуре среды в продолжительном изменении напряжения сдвига при скачкообразном изменении скорости сдвига в материале, текущем в литейной форме. Управление вязкостью фидстока требует ограничения объемного наполнения полимерного связующего критической объемной долей порошка. Подготовка к проявлению эффекта тиксотропии в тиксозаготовках, заключающаяся в освобождении из дендрита части захваченной жидкости при сфероидизации обломков дендрита, и механизм проявления эффекта тиксотропии в структурированной жидкости, схематично иллюстрируемый на рисунке 6, с позиций реологии делает тиксо- и *PIM* технологии подобными.

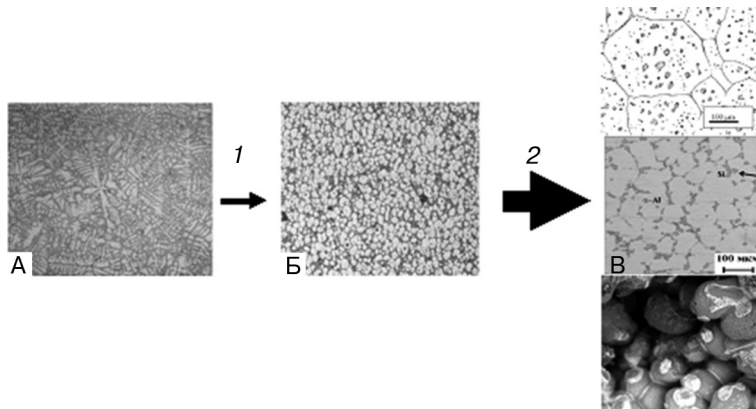


**Рис. 6.** Подготовка к проявлению и механизм проявления тиксотропных свойств в твердой жидких металлах: а — освобождение из дендрита части захваченной жидкости; б — изменение напряжения сдвига при скачкообразном изменении скорости сдвига

[Fig. 6. Thixotropic behavior initializing steps and the mechanism of its action in solid-liquid metals: а — Release of a part of captured liquid from dendrite; б — Change in shear stress as a result of stepped change in shearing rate]

Некоторые возможные результаты управляющих воздействий на микроструктуру материала на различных этапах тиксоформинга показаны на рисунке 7. Физика подобных явлений в традиционном материаловедении и методы организации подобных процессов в теориях литейных процессов, ориентированных на производство изделий из металлических сплавов, в отечественных публикациях [10–13] не рассматривались. Но это означает, что для эффективного освоения современных литейных технологий должна быть построена *новая научная база: управ-*

ление течением и затвердеванием при литье под давлением тиксотропных жидкостей в теоретическом плане должно опираться на физико-химическую динамику дисперсных систем [23].



**Рис. 7.** Структурированный вне литейной формы твердожидкий металл и микроструктура отливки после литья под давлением:

А — структура материала до перемешивающей обработки; Б — структура суспензии с тиксо свойствами; В — структура материала тиксоштампованной детали (вверху при избытке свободной жидкости; внизу — при недостатке); 1 — перемешивающая обработка и сфероидизация розеток; 2 — литье под давлением

[Fig. 7. Structured outside the mold solid-liquid metal and microstructure of casting after injection molding:

А — the structure of the material before mixing; Б — suspension structure with Thixo-properties; В — structure of the thixotropic part's material (at the top with — an excess of free liquid, at the bottom — with an insufficient content); 1 — mixing processing and spheroidization of dendrites; 2 — injection molding]

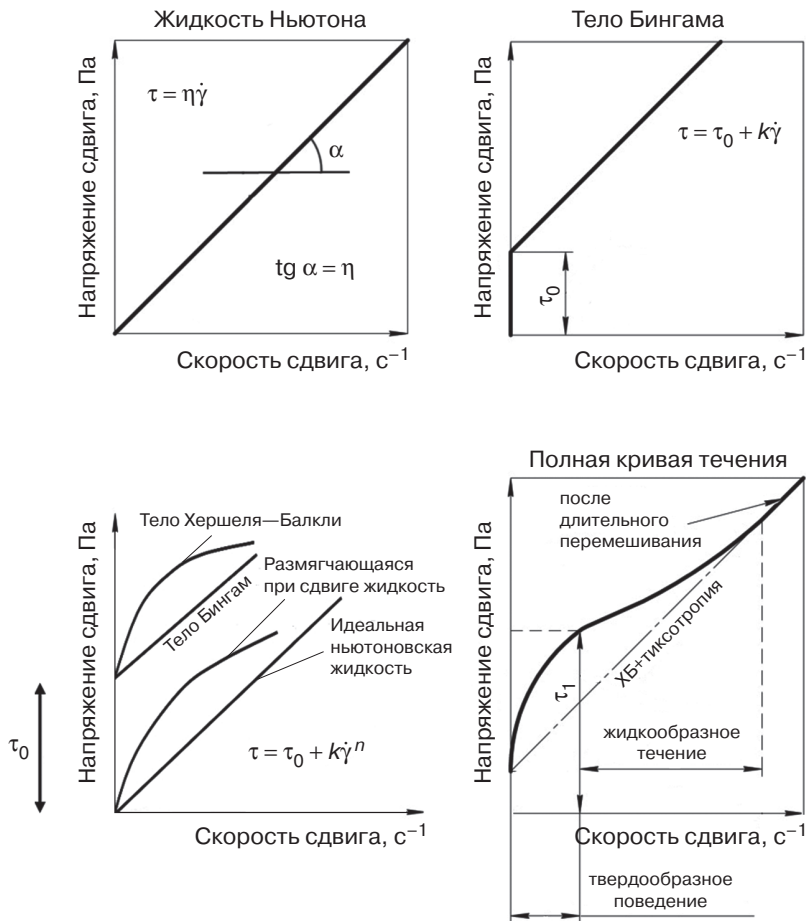
Описание (или моделирование) динамического поведения различных материалов включает рассмотрение их реакции при течении в технологической оснастке не только с традиционных позиций тепло- и массообмена, но и с позиций реологии, используя различные модели течения твердожидкой среды (рис. 8). В представленных на рисунке аналитических зависимостях  $n$  — показатель чувствительности к скорости сдвига,  $\tau_0$  — предел текучести деформируемой среды. При  $n = 1$  и  $\tau_0 = 0$  получаем модель жидкости Ньютона. При  $n < 1$  и  $\tau_0 \neq 0$  имеем модель жидкости Хершеля–Балкли, размягчающейся при сдвиге. Влияние длительного перемешивания твердожидкого металла с дендритной структурой приводит к необходимости построения полной кривой течения (по Ребиндеру), — модели твердожидкой среды, способной в зависимости от условий к твердообразному и жидкообразному поведению. Эксперименты показывают, что течение твердожидкого металла при тиксоформинге и жидкоподвижного фидстока в МИМ существенно отличается от поведения жидкого металла (жидкости Ньютона) при его заливке в литейную форму любым традиционным методом, но обладает значительной общностью с поведением неньютоновских жидкостей (например, полимеров).

Научную основу литья полимеров составляют такие известные в механике диссипативных систем реологические явления, как:

— фазовые и релаксационные переходы, вызванные деформированием при сдвиге;

- проявление твердообразных свойств у жидкостей; благодаря этому вещество сохраняет приданную ему форму в покое, но, преодолев при достаточно высоких нагрузках динамический предел текучести, может течь;
- память к предистории деформирования;
- эффекты повышения либо понижения вязкости в зависимости от скорости деформирования как следствие структурных превращений в материале (эффект реопексии и тиксотропии);
- локальное отверждение (переход из текучего в твердообразное состояние), способствующее стабилизации жидких струй в различных положениях, и др.

Реологические измерения предоставляют значения характеристик свойств материала при взаимодействии с окружающей средой, а фундаментальные реологические концепции предсказывают, каким образом понимать результаты этих исследований и как их использовать для решения прикладных задач.

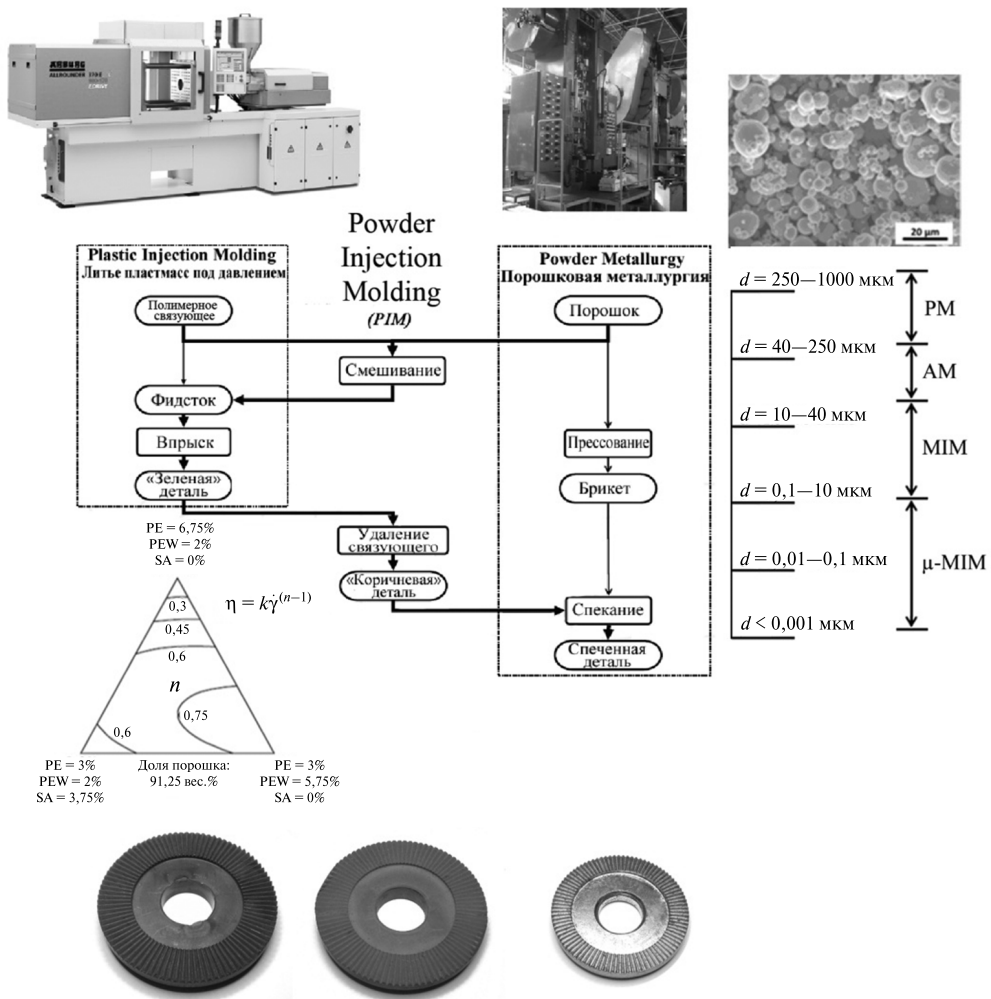


**Рис. 8.** Различные реологические модели течения жидких сред  
**[Fig. 8.** Various rheological flow models]

Как и для полимеров, для расчета технологических режимов и математического моделирования рассматриваемых процессов формообразования изделий из металлов *недостаточно законов сохранения массы, импульса и энергии. В матема-*

тическую модель должны быть добавлены одно или несколько уравнений состояния, которые описывают свойства твердожидких металлов и металл-полимерных композиций в условиях сдвига, подобно тому, как это делается при литье полимерных материалов.

Специфические реологические эффекты, которые не существуют при течении ньютоновских жидкостей, но присутствуют, оказавшись очень полезными в новых способах литья фасонных изделий из металлов, в значительной степени изменили облик технологической оснастки и литейного оборудования и, одновременно, требования к обслуживающему персоналу. Объем знаний инженерно-технических работников должен быть расширен до понимания ими возможности решать задачи заполнения расплавом литейной формы при минимальном количестве в материале тепловой энергии и управлять затвердеванием суспензий без их расслоения и разрывов сплошности.



**Рис. 9.** Процедуры и этапы создания и переработки в фасонное изделие структурируемых многофазных материалов методом инъекционного литья порошковых материалов (MIM)

[Fig. 9. Procedures and stages of creation and processing of structured multiphase materials into shaped parts by powder injection molding (MIM)]

Российские исследователи, занимавшие передовые позиции в заготовительных производствах машиностроения в 50-х — 60-х годах прошлого столетия, во многом отстали в последующий период. Особенно заметно это отставание проявилось на рубеже столетий. Сегодня модернизация экономики и инновационное развитие России не возможны без углубленного изучения зарубежного опыта организации современных заготовительных производств в машиностроении. Но необходим и особо важен собственный опыт организации полного цикла производств изделий из структурируемых многофазных материалов, появление производств, организация которых должна начинаться с подбора состава и изготовления фидстока — порошка полимерной смеси с требуемой вязкостью и чувствительностью к скорости сдвига, последующего моделирования технологии литья и изготовления фасонной «зеленой» детали (рис. 9). Метод удаления связующего и процедуры спекания в *PIM* технологии также предопределены выбором состава связующей полимерной смеси. В научном плане усилия лаборатории направлены на проведение совместной деятельности МГТУ им. Н.Э. Баумана с научно-производственными организациями, такими как ОАО «АХК ВНИИМЕТ-МАШ» [24], ОАО «НИАТ» [8; 20; 21], ФГУП ВИАМ [19], ОАО «Композит», ОАО «НПО “Прибор”», ООО «РИФМЕТ ПРО», НПП «Прибор» [16; 17] и др., и с академической наукой [25]. Значимость решаемых задач, интерес ведущих реологов страны из Института нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук к описываемой научной проблеме подтверждены получением гранта Президентской программы исследовательских проектов по теме «Создание новых многокомпонентных полимерных композиций и их переработка в материалы на основе структурно-реологического подхода». Участие в этих исследованиях специалистов лаборатории МГТУ им. Н.Э. Баумана должно послужить серьезным стимулом быстрого развития в стране новой отрасли порошковой металлургии в заготовительных производствах современного машиностроения, получившей обобщающее название технологии инъекционного литья порошков, и в целом, *инжекционного литья структурированных многофазных материалов.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Powder injection moulding international [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pim-international.com> (дата обращения: 11.10.2017).
- [2] *Грибовский П.О.* Горячее литье керамических изделий. М.: Госэнергоиздат, 1956. 400 с.
- [3] *Williams N.* Metal Injection Moulding in the firearms industry: a global perspective // PIM International. 2014. Vol. 8(4). P. 31–47.
- [4] *Семенов А.Б., Муранов А.Н., Семенов Б.И.* Thixo- и PIM технологии в современном двигателестроении // Грузовик. 2017. № 10. С. 3–6.
- [5] Handbook of metal injection molding / ed. by D.F. Heaney. Woodhead Publishing Limited, 2012. 601 pp.
- [6] Polymer Technologies Inc. looks to the aerospace industry for new PIM applications // PIM International. 2013. Vol. 7(1). P. 45–51.
- [7] *Пархоменко А.В., Амосов А.П., Самборук А.Р., Игнатов С.В., Костин Д.В., Шульцимова А.С.* Разработка отечественного порошкового гранулята со связующим на основе полиформальдегида для мим-технологии // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2013. (4). С. 8–13. DOI: 10.17073/1997-308X-2013-4-8-13.

- [8] Куцбах А.А., Семенов Б.И. Импортзамещающая технология изготовления литьем (PIM) тонкостенной стальной раздаваемой втулки для разъемных соединений композитных панелей // Вооружение, военная техника и боеприпасы. Форум лучших студентов технических вузов России, X международная выставка «Вооружение, военная техника и боеприпасы». (Russia Arms Expo 2015), 10 сентября 2015 года, г. Нижний Тагил. Сб. ст. Ч. 2. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. С. 176—181.
- [9] Raymond V. Metal injection molding development: modeling and numerical simulation of injection with experimental validation. Diss. Ecole Polytechnique de Montreal, 2012. 136 pp.
- [10] Баландин Г.Ф. Теория формирования отливки: основы тепловой теории. Затвердевание и охлаждение отливки: учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 360 с.
- [11] Пикунов М.В. Плавка металлов, кристаллизация сплавов, затвердевание отливок: учеб. пособие для вузов. М.: МИСиС, 2005. 416 с.
- [12] Чуркин Б.С. Теория литейных процессов: учебник / под ред. Э.Б. Гофмана. Екатеринбург, 2006. 454 с.
- [13] Гини Э.Ч. Специальные технологии литья: учеб. для вузов / Э.Ч. Гини, А.М. Зарубин, В.А. Рыбкин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 367 с.
- [14] Coleman A.J., Murray K. [et al]. Effect of Particle Size Distribution on Processing and Properties of Metal Injection Moulded 4140 and 4340 // Sandvik Osprey Ltd.: Technical papers. URL: [http://smt.sandvik.com/globalassets/global/downloads/products\\_downloads/metal\\_powders/technical\\_papers/effect-of-particle-size-distribution-on-processing-and-properties-of-mim-4140-and-4340.pdf](http://smt.sandvik.com/globalassets/global/downloads/products_downloads/metal_powders/technical_papers/effect-of-particle-size-distribution-on-processing-and-properties-of-mim-4140-and-4340.pdf) (дата обращения: 12.09.2017).
- [15] Муранов А.Н., Семенов А.Б., Семенов Б.И. Неньютоновское течение суспензий, используемых при инъекционном литье металлических изделий сложной формы // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: сб. тр. Всеросс. науч. конф. с межд. участием, к 95-летию со дня рождения академика И.Ф. Образцова. Москва, 15—17 декабря 2015 г. М.: ФГБУН «ИПРИМ» РАН, 2015. С. 638—639.
- [16] Семенов А.Б., Гавриленко А.Э., Семенов Б.И. Порошковые технологии синтеза сложных фасонных деталей из суперсплавов: АМ и/или PIM (зарубежный и отечественный опыт) [Электронный ресурс] // ФГУП ВИАМ ГНЦ РФ. Круглые столы, конференции, семинары: сб. тр. II межд. Конф. «Аддитивные технологии: настоящее и будущее». Ч. 4. Москва, 16 марта 2016. URL: <http://conf.viam.ru/conf/192/proceedings> (дата обращения: 11.10.2017).
- [17] Литейные технологии нового поколения, их освоение и развитие в России. Ч. 2-2. Физическая природа и особенности моделей материалов с тиксотропными свойствами / А.Б. Семенов, А.Н. Муранов, Б.И. Семенов // Технология металлов. 2016. № 9. С. 7—18.
- [18] Литейные технологии нового поколения, их освоение и развитие в России. Ч. 2-1. Физическая природа и особенности моделей материалов с тиксотропными свойствами / А.Б. Семенов, А.Н. Муранов, Б.И. Семенов // Технология металлов. 2016. № 8. С. 8—17.
- [19] 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 / Е.Н. Каблов, А.Г. Евгенов, О.Г. Оспенникова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 9. С. 62—80.
- [20] Новые задачи и рубежи в технологической подготовке выпускника вуза машиностроительного профиля. Ч. 1 / А.Б. Семёнов, А.П. Корневич, А.А. Куцбах [и др.] // Технология металлов. 2017. № 3. С. 42—48.
- [21] Новые задачи и рубежи в технологической подготовке выпускника вуза машиностроительного профиля. Ч. 2 / А.Б. Семёнов, А.П. Корневич, А.А. Куцбах [и др.] // Технология металлов. 2017. № 5. С. 38—48.
- [22] Семенов А.Б., Семенов Б.И. Две парадигмы технологий литья изделий из металлов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 5. С. 79—98.

- [23] *Малкин А.Я., Исаев А.И.* Реология: концепции, методы, приложения. СПб.: Изд. Профессия, 2010. 560 с.
- [24] *Семенов Б.И., Куштаров К.М.* Производство изделий из металла в твердоточном состоянии. Новые промышленные технологии: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 223 с.
- [25] Российский научный фонд [сайт] 2017. URL: <http://www.rscf.ru> (дата обращения: 11.09.2017).

© Семенов А.Б., Муранов А.Н., Куцбах А.А., Семенов Б.И., 2017

#### **История статьи:**

Дата поступления в редакцию: 27 августа 2017

Дата принятия к печати: 27 сентября 2017

#### **Для цитирования:**

**Семенов А.Б., Муранов А.Н., Куцбах А.А., Семенов Б.И.** Инжекционное литье структурированных многофазных материалов // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 4. С. 407–425. doi: 10.22363/2312-8143-2017-18-4-407-425

#### **Сведения об авторах:**

*Семенов Алексей Борисович*, кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-5 «Литейные технологии» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. *Область научных интересов:* литейные сплавы; специальные способы литья; тиксоформинг; технология инжекционного литья полимерно-порошковых смесей под высоким давлением. *Контактная информация:* E-mail: [semenov.ab@bk.ru](mailto:semenov.ab@bk.ru)

*Муранов Александр Николаевич*, аспирант кафедры СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. *Область научных интересов:* технология, механика и физико-химия композиционных материалов; технология инжекционного литья полимерно-порошковых смесей под высоким давлением. *Контактная информация:* E-mail: [muranovalecs@mail.ru](mailto:muranovalecs@mail.ru)

*Куцбах Анатолий Артурович*, магистрант кафедры СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. *Область научных интересов:* компьютерное имитационное моделирование; композиционные материалы; технология инжекционного литья полимерно-порошковых смесей под высоким давлением. *Контактная информация:* E-mail: [akutsbakh@mail.ru](mailto:akutsbakh@mail.ru)

*Семенов Борис Иванович*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. *Область научных интересов:* механика и технология металломатричных композиционных материалов; материаловедение; тиксоформинг; технология инжекционного литья полимерно-порошковых смесей под высоким давлением. *Контактная информация:* E-mail: [semenovbi@bmstu.ru](mailto:semenovbi@bmstu.ru)



## INJECTION MOLDING OF STRUCTURED MULTIPHASE MATERIALS

A.B. Semenov, A.N. Muranov, A.A. Kutsbakh, B.I. Semenov

Bauman Moscow State Technical University  
(National research university of technology)  
2-nd Baumanskaya str., 5/1, Moscow, Russia, 105005

Contemporary and future-oriented mechanical engineering requires the use of a new set of methods for processing, manufacturing, changing the state of materials implemented in the production process. In particular, the level of modern and prospective blank part production industries is largely related to the development of injection molding of structured multiphase materials — powder and granule technologies of a new generation. In this article, such widely used by foreign industry modern injection molding technologies of structured multiphase materials as the powder injection molding (PIM) technology and the thixoforming technology, are considered. A description of specific rheological effects that determined the fundamental possibility of the appearance and practical application of these technologies is given, and some of the most relevant physico-mathematical models of rheological behavior of structured multiphase materials are considered. In addition, the article demonstrates the efficiency of implementation and high potential for development of powder injection molding technology (PIM) for mass production of small-sized shaped parts in Russian Federation. The need for the development of educational programs and standards, including special disciplines and courses aimed at training technical professionals not only in the field of present commonly used technologies, but also such promising technologies as powder injection molding (PIM) and thixoforming, was noted as well.

**Key words:** powders, granules, multiphase materials, structuring, injection molding, rheology, modeling

### REFERENCES

- [1] Powder injection moulding international [Internet]. URL: <http://www.pim-international.com> (access date: 11.10.2017).
- [2] Gribovskij P.O. Goryachee lit'e keramicheskikh izdelij [Hot-casting of ceramic parts]. M.: Goshenergoizdat, 1956. 400 pp. (in Russ.)
- [3] Williams N. Metal Injection Moulding in the firearms industry: a global perspective. PIM International. 2014. Vol. 8(4). P. 31–47.
- [4] Semenov A.B., Muranov A.N., Semenov B.I. Semenov. Thixo- i PIM tekhnologii v sovremennom dvigatelestroenii [Thixo and PIM Technologies in Modern Engine-building]. Gruzovik [Truck: Transportation Complex and Special Technique]. 2017. Vol. 10. P. 3–6. (in Russ.).
- [5] Handbook of metal injection molding / ed. by D.F. Heaney. Woodhead Publishing Limited, 2012. 601 pp.
- [6] Polymer Technologies Inc. looks to the aerospace industry for new PIM applications. PIM International. 2013. Vol. 7(1). P. 45–51.
- [7] Parkhomenko A.V., Amosov A.P., Samboruk A.R., Ignatov S.V., Kostin D.V. Development of domestic powdered granulated material with polyformaldehyde based binder for MIM-process. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya*. 2013. No. 4. P. 8–13. DOI: 10.17073/1997-308X-2013-4-8-13. (in Russ.).
- [8] Kutsbakh A.A., Semenov B.I. Importozameshchayushchaya tekhnologiya izgotovleniya lit'em (PIM) tonkostennoj stal'noj razdavaemoj vtulki dlya raz'emnyh soedinenij kompozitnyh panelej [Import-substituting PIM technology for manufacturing thin-walled steel bush bearings for detachable joints of composite panels]. Vooruzhenie, voennaya tekhnika i boeprirasy. Forum luchshih studentov tekhnicheskikh vuzov Rossii, X mezhdunarodnaya vystavka «Vooruzhenie,

- voennaya tekhnika i boepripasy». (Russia Arms Expo 2015), 10 september 2015, Nizhnij Tagil. Proceed. Part 2. Moscow: Bauman MSTU, 2015. P. 176–181. (in Russ.)
- [9] Raymond V. Metal injection molding development: modeling and numerical simulation of injection with experimental validation. Diss. Ecole Polytechnique de Montreal, 2012. 136 pp.
- [10] Balandin G.F. Teoriya formirovaniya otlivki: Osnovy teplovoj teorii. Zatverdevanie i ohlazhdenie otlivki: Uchebnik dlya vuzov [Casting theory: Fundamentals of the theory of heat. Crystallization and cooling of casting: Textbook for univversities]. Moscow: Bauman MSTU, 1998. 360 p. (in Russ.)
- [11] Pikunov M.V. Plavka metallov, kristallizatsiya splavov, zatverdevanie otlivok: Uchebnoe posobie dlya vuzov [Metal melting, alloy crystallization, casting solidification: Textbook for univversities]. Moscow: MISiS, 2005. 416 p. (in Russ.)
- [12] Churkin B.S. Teoriya litejnyh processov: Uchebnik [Casting processes theory: Textbook]. Ed. by Eh.B. Gofman. Ekaterinburg, 2006. 454 pp. (in Russ.)
- [13] Gini Eh.Ch. Special'nye tekhnologii lit'ya: Uchebnik dlya vuzov [Special casting techniques: Textbook for univversities]. Eh.Ch. Gini, A.M. Zarubin [et al]. Moscow: Bauman MSTU, 2010. 367 pp. (in Russ.)
- [14] Coleman A.J., Murray K. [et al]. Effect of Particle Size Distribution on Processing and Properties of Metal Injection Moulded 4140 and 4340. Sandvik Osprey Ltd.: Technical papers. URL: [http://smt.sandvik.com/globalassets/global/downloads/products\\_downloads/metal\\_powers/technical\\_papers/effect-of-particle-size-distribution-on-processing-and-properties-of-mim-4140-and-4340.pdf](http://smt.sandvik.com/globalassets/global/downloads/products_downloads/metal_powers/technical_papers/effect-of-particle-size-distribution-on-processing-and-properties-of-mim-4140-and-4340.pdf) (circulation date: 12.09.2017).
- [15] Muranov A.N., Semenov A.B., Semenov B.I. Nen'yutonovskoe techenie suspenzij, ispol'zuemyh pri inzhekcionnom lit'e metallicheskih izdelij slozhnoj formy [Newtonian flow of suspensions used in injection moulding of complex-shaped metal parts]. Mekhanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij, slozhnyh i geterogennyh sred: sbornik trudov Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, k 95-letiyu so dnya rozhdeniya akademika I.F. Obrazcova. Moscow, 15–17 December 2015. M.: FSBAS «IPRIM» RAS, 2015. P. 638–639. (in Russ.)
- [16] Semenov A.B., Gavrilenko A.Eh., Semenov B.I. Poroshkovye tekhnologii sinteza slozhnyh fasonnyh detalej iz supersplavov: AM i/ili PIM (zarubezhnyj i otechestvennyj opyt) [Powder technologies for fusion of complex-shaped parts from super-alloys: AM and/or PIM (foreign and domestic practical experience)] [Electronic resource]. FSUE «VIAM» SSC RF. Proceedings of II-nd International conference «Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee». Part 4. Moscow. 16 March 2016. URL: <http://conf.viam.ru/conf/192/proceedings>. (in Russ.)
- [17] New generation casting technologies, their mastering and development in Russia. P.2-2. Physical nature and features of models of materials with thixotropic properties / A.B. Semenov, A.N. Muranov, B.I. Semenov. Tekhnologiya metallov. 2016. № 9. P. 7–18. (in Russ.)
- [18] New generation casting technologies, their mastering and development in Russia. P.2-1. Physical nature and features of models of materials with thixotropic properties / A.B. Semenov, A.N. Muranov, B.I. Semenov. Tekhnologiya metallov. 2016. № 8. С. 8–17. (in Russ.)
- [19] Metal Power Compositions for the EP648 Heat Resistant Alloy Manufactured by All-Russian Research Institute for Aircraft Materials VIAM for Selective Laser Melting, Laser Metal Deposition and Metal Injection Molding Technologies / E.N. Kablov, A.G. Evgenov, O.G. Ospennikova [et al.]. Izvestiya Vuzov. Mashinostroenie. 2016. № 9. P. 62–80. (in Russ.)
- [20] New tasks and objectives in engineering education of graduating student of machine-building specialization university. Part 1 / A.B. Semenov, A.P. Kornevich, A.A. Kutsbakh [et al.]. Tekhnologiya metallov. 2017. № 3. P. 42–48. (in Russ.)
- [21] New tasks and objectives in engineering education of graduating student of machine-building specialization university. Part 2 / A.B. Semenov, A.P. Kornevich, A.A. Kutsbakh [et al.]. Tekhnologiya metallov. 2017. № 5. P. 38–48. (in Russ.)
- [22] Semenov A.B., Semenov B.I. Two paradigms of metal casting technologies. Izvestiya Vuzov. Mashinostroenie. 2017. № 5. P. 79–98. (in Russ.)

- [23] Malkin A.Ya., Isaev A.I. *Reologiya: koncepcii, metody, prilozheniya* [Rheology: concepts, methods, applications]. SPb.: Izd. Professiya, 2010. 560 pp. (in Russ.)
- [24] Semenov B.I., Kushtarov K.M. *Proizvodstvo izdelij iz metalla v tverdozhidkom sostoyanii. Novye promyshlennye tekhnologii: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Manufacturing of metal parts in solid-liquid state. New industrial technologies: Textbook for unviversities]. Moscow: Bauman MSTU, 2010. 223 pp. (in Russ.)
- [25] Russian Scientific Foundation [Internet]. URL: <http://www.rscf.ru> (access date: 11.10.2017).

**Article history:**

Received: 27 August 2017

Accepted: 27 September 2017

**For citation:**

**Semenov A.B., Muranov A.N., Kutsbakh A.A., Semenov B.I. (2017) Injection molding of structured multiphase materials. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(4), 407–425. doi: 10.22363/2312-8143-2017-18-4-407-425**

**Bio Note:**

*Alexey B. Semenov*, Cand. Tech. Sci., Senior lecturer of the department MT-5 “Casting technologies” at Bauman MSTU. *Research interests*: foundry alloys; special methods of casting; thixoforming; powder injection molding technology. *Contact information*: E-mail: [semenov.ab@bk.ru](mailto:semenov.ab@bk.ru)

*Alexander N. Muranov*, post-graduate student of the department SM-13 “Rocket-space composite structures” at Bauman MSTU. *Research interests*: technology, mechanics and physical chemistry of composite materials; powder injection molding technology. *Contact information*: E-mail: [muranovalecs@mail.ru](mailto:muranovalecs@mail.ru)

*Anatoly A. Kutsbakh*, master student of the department SM-13 “Rocket-space composite structures” at Bauman MSTU. *Research interests*: computer simulation; composite materials; powder injection molding technology. *Contact information*: E-mail: [akutsbakh@mail.ru](mailto:akutsbakh@mail.ru)

*Boris I. Semenov*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the department SM-13 “Rocket-space composite structures” at Bauman MSTU. *Research interests*: mechanics and technology of metal matrix composite materials; material science; thixoforming; powder injection molding technology. *Contact information*: E-mail: [semenovbi@bmstu.ru](mailto:semenovbi@bmstu.ru)