

УДК 621.763+621.74.04

DOI 10.18698/0536-1044-2017-5-79-98

## Две парадигмы технологий литья изделий из металлов

**А.Б. Семенов, Б.И. Семенов**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

## Two Paradigms of Metal Casting Technologies

**A.B. Semenov, B.I. Semenov**BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: semenov.ab@bk.ru, Semenovbi@bmstu.ru



Литье под давлением наполненных порошками полимеров (PIM) для производства изделий из металла как промышленная технология за рубежом используется с 1980 г., но отсутствует в России. За это время рынок значительно расширился и включает в себя широкий спектр приложений, изменяющих представление конструктора о возможностях литейных технологий. Современные способы литья потребовали применения новой совокупности методов обработки, изготовления, изменения состояния материалов, осуществляемых в процессе производства продукции. Как скоро подобные технологии будут широко востребованы в нашей стране и что мешает их развитию? Накопленный опыт показывает: теоретическая и технологическая подготовка выпускника вуза машиностроительного профиля, организующего стартапы и бизнес-планы в области инъекционного формования из порошковых композиций, не может уступать качественно новому уровню современных литейных технологий обработки металлов и должна строиться с учетом выбираемых для их реализации новых реологических моделей материалов.

**Ключевые слова:** литье под давлением, порошки, конструкционные материалы для PIM, реологические модели, современные технологии, подготовка специалиста.



Powder injection molding (PIM) has been used for manufacturing metal products abroad since 1980 but this technology is absent in Russia. During this time, the market has expanded significantly. It now includes a wide range of applications that change the designer's perception of the capabilities of cast technologies. Modern casting processes require a new combination of processing, manufacturing and state changing methods for the materials involved in the manufacturing process. How soon can these technologies be used in Russia and what is impeding their development? Experience shows that theoretical and process design training of mechanical engineering graduates who are involved in establishing start-up companies and writing business plans in the area of powder injection molding, must not fall below the qualitatively new level of modern metal cast technologies, and should include appropriate rheological models of materials.

**Keywords:** pressure casting, powders, PIM design materials, rheological models, modern technologies, specialist training.

Новая индустриализация страны необходима, и она должна опираться на использование современных материалов и технологий. На заседании

президиума Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России 16 сентября

2014 г. было принято решение о разработке проекта национальной технологической инициативы «Новые производственные технологии».

Основные положения проекта отражены в публичном аналитическом докладе Сколковского института науки и технологии. В качестве новых производственных технологий, потребность в которых для инновационного развития России авторам доклада очевидна, названы аддитивные производства (Additive Manufacturing), инжекционное формование из порошковых композиций (Powder Injection Molding — PIM) и «другие методы, сочетающие в себе преимущества массового производства и, в то же время, гибко настроенные на необходимый в данный момент объем выпуска». Важно понимать, какое место указанные технологии занимают сегодня и должны занять в ближайшее время в общей конструкторско-технологической подготовке специалиста — выпускника вуза машиностроительного профиля, организующего стартапы и бизнес-планы в области инжекционного формования из порошковых композиций. Рассмотрим некоторые современные технологии литья, привычно называемые заготовительными производствами.

Новые способы получения точных фасонных изделий из металлических и керамических порошков в течение последних 30 лет приобрели значительный вес в заготовительных производствах современного машиностроения и стали преобладать в ранее недоступных рыночных секторах [1–4], в том числе в производстве нового оружия, изделий электроники, авиационно-космической и иной техники. Были разработаны и коммерциализованы многие варианты PIM-технологии, в результате чего по всему миру действует значительное число предприятий, изготавливающих этими способами из конструкционных материалов не только заготовки, но и детали. Ниже приведены статистические данные по PIM-производству:

	2010 г.	2012 г.
Доля, %, PIM-компаний, работающих в:		
Северной Америке .....	31	21
Европе .....	28	27
Азии .....	37	49
других частях света .....	4	3

Страны с наибольшей концентрацией PIM-компаний — США, Китай, Германия, Япония.

Страны с крупнейшими PIM-компаниями — Индия, США, Германия, Япония, Китай.

В приведенных данных нет России. Формование фасонных изделий впрыском порошков в пресс-формы для литья под давлением — новое направление в развитии методов порошковой металлургии.

Цель работы — показать, какое место указанные технологии и стандарты на конструкционные материалы для инжекционного литья порошков должны занимать в конструкторско-технологической подготовке специалиста — современного выпускника вуза машиностроительного профиля и к каким потерям может привести отсутствие должного внимания к новым идеям в организации заготовительных производств машиностроительных предприятий.

В табл. 1 представлена краткая информация о структуре и эффективности продаж продукции, производимой в мире современными методами литья.

Таблица 1

**Структура и эффективность продаж продукции, производимой по PIM-технологии**

Параметр	2010 г.	2012 г.
Общий объем продаж, млрд долл. США	1,10	1,45
Общее количество PIM-фирм, шт.	366	445
Общее количество работников, чел.	8 000	13 800
Типичный штат исследовательского (R&D) отдела, чел.	2	–
Типичная прибыль от продаж, %	11	–
Объем продаж, тыс. долл. США, на одну единицу:		
работника	126	239
литейную машину	538	554
производственную печь	980	1 243
Доля фирм, изготавливающих фидстоки для собственных нужд, %	72	72...76
Общее количество, шт.:		
смесительные устройства	380	462
литейные машины	1 750	2 614
печи для спекания	850	1 167
Доля, %, фирм, применяющих следующие виды дебиндинга:		
термический	49	43
растворный	26	24
каталитический	14	21
другой	11	11
Средняя масса детали, г	6	–

Ниже приведен типичный, но непривычный для технолога машиностроительного предприятия состав технологического оборудования и штата сотрудников производственного сектора МИМ-предприятия:

Смесительное устройство, шт. ....	1
Литейные инъекционные машины, шт. ....	4
Установки для удаления связующего, шт. ....	2
Печи для спекания, шт. ....	2
Количество сотрудников, чел. ....	20

По данным, подготовленным Н. Уильямсом — главным редактором журнала PIM International (2014, vol. 8, no. 4), на этот период в Северной Америке детали, выполненные по технологии инъекционного литья металлических порошковых композиций (МИМ — Metal Injection Molding), производили приблизительно 70 компаний. Полный североамериканский МИМ-рынок оценивался в 300...350 млн долл. США, количество работников могло быть и менее 20, и более 300. Ведущие фирмы, применяющие высокоточное порошковое МИМ-литье, по сравнению со многими компаниями, использующими другие технологии обработки металлов, невелики. Наибольший рост МИМ-производства происходит в Азии. Так, в 2015 г. только на материковом Китае (без Тайваня) работало уже 130 предприятий, занимающихся изготовлением МИМ-продукции, годовой объем продаж которых составлял 725 млн долл. США, из них 485 млн долл. США (67 %) пришлось на 5 крупнейших компаний и более 6 млн долл. США — на долю 15 фирм [1].

В 50–60-х годах прошлого столетия отечественные исследователи занимали передовые позиции в заготовительных производствах машиностроения. Так, в монографии П.О. Грибовского [5], изданной в 1956 г., подробно описана технология *горячего литья керамических изделий под давлением* и, в частности, отмечается, что «технология горячего литья обеспечивает возможность изготовления изделий из лю-

бых твердых материалов, начиная от природных минералов, чистых окислов, карбидов, металлов и т. д. и кончая многокомпонентными сложными синтетическими материалами и их сочетаниями» [5, с. 9]). Это указание на возможность осуществления МИМ-литья фасонных изделий не было замечено.

К сожалению, в последующий период российские ученые во многом отстали от зарубежных. Однако особенно этот разрыв стал заметен на рубеже столетий, когда изготовление точных металлических заготовок стало превращаться в производство точных деталей из металлов и сплавов, поступающих на сборку (рис. 1) с минимальными энергетическими затратами.

Упомянутый выше способ литья развился в современную технологию low pressure injection molding processing, чаще используемую для литья изделий из металлов, чем из керамик. Какое замечательное предвидение того, что стало стремительно развиваться спустя 30 лет! К сожалению, изложенные разработки и идеи в нашей стране ни в тот период, ни позже (1970–1990) не были использованы для переработки в промышленном масштабе металлических порошков литьем под давлением.

В настоящее время модернизация экономики и инновационное развитие России невозможны без углубленного изучения и использования в учебном процессе зарубежного опыта организации современных заготовительных производств в машиностроении, к которым относятся процессы литья под давлением полимеров (ПИМ), наполненных металлическими (МИМ) и керамическими (СИМ — Ceramic Injection Molding) порошками. Современный рынок России можно оценить приблизительно в несколько миллиардов рублей в год. В феврале 2014 г. генеральный директор концерна «Калашников» А.Ю. Криворучко заявил [2]: «Мы начнем настраивать МИМ-производство в этом году». На рубеже 2017 г. нет публикаций,



Рис. 1. Резьбовые разъемы из коррозионностойкой стали X18H9T: а — комплект литых деталей; б — сборочная единица

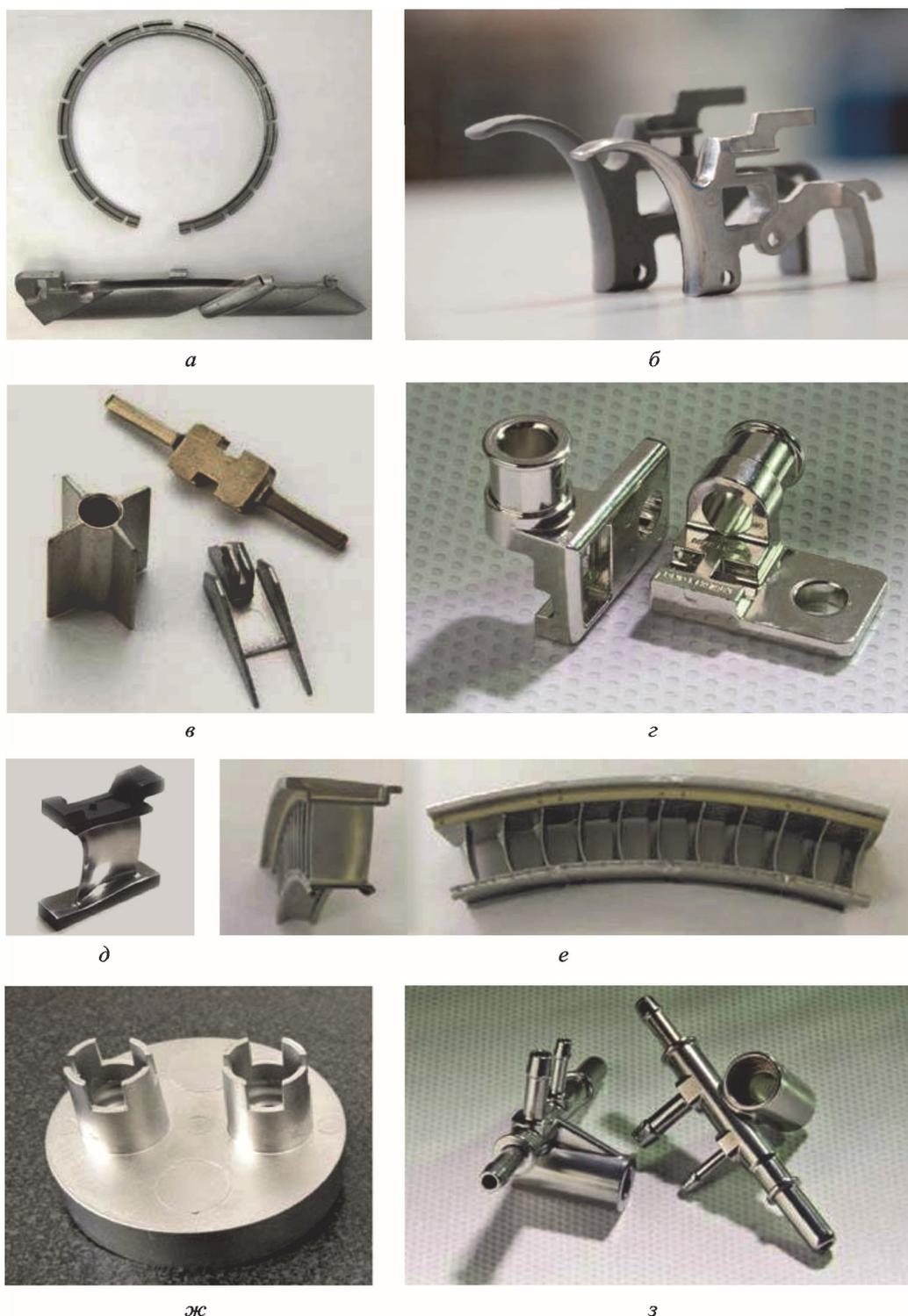


Рис. 2. Изделия, изготовленные МИМ-методом:

*a* — сегментированное кольцо из стали 316L диаметром 100 мм, массой 20 г и элемент крыла ракеты из стали 17-4PH длиной примерно 150 мм, массой 120 г в спеченном виде и 110 г после обработки (Polymer Technologies Inc. (PTI), США); *б* — спусковой механизм из титана в состоянии «зеленой» и спеченной детали, произведенный итальянской компанией Mimest SpA для винтовки AR-15 фирмы Advanced Forming Technology (AFT), США; *в* — детали аэрокосмических изделий из нержавеющей стали: соединитель (сверху), затвор (справа) и стабилизатор (слева) массой соответственно 5, 3 и 4 г (фирма PTI); *г* — стальная муфта аэрокосмического двигателя, изготовленная фирмой AFT для компании Rolls Royce; *д* и *е* — единичная лопасть и блок лопастей компрессора из жаропрочного сплава IN718 (Maetta Sciences, Pratt and Whitney); *ж* — ответвитель из сплава Inconel массой 70 г, диаметром 50 мм, заменивший три детали, которые ранее сваривали после механической обработки; *з* — деталь смесителя топлива дизельного двигателя Lamborghini, изготовленная из нержавеющей стали 17-4PH фирмой Indo-US MIM Tec Pvt. Ltd.

демонстрирующих успехи рынка PIM- и MIM-изделий в России, а отечественный производитель материалов, к сожалению, гордится тем, что оснастку и конструкционные материалы для PIM и MIM заказывает за рубежом [6].

По данным американской MIM-ассоциации (MIMA), в США ежегодный рост MIM-изделий составляет 15...20 % [3]. Крупнейший потребитель такой продукции в Северной Америке — промышленность огнестрельного оружия, на которую приходится более 40 % (по массе) MIM-деталей [7, 8]. По стоимости продаж доля MIM-деталей для огнестрельного оружия также является наибольшей, составляя 25 % и опережая таковые для медицинских изделий и зубных протезов (23 %) и автомобильной индустрии (12 %). Большая часть мелких деталей, таких как элементы безопасности, спусковые механизмы, ударники и даже мощные внутренние детали стрелкового оружия изготавливают с помощью MIM. Экономия на операциях механической обработки и лучшее качество поверхности компенсируют бо-

лее высокие затраты на пресс-формы и оснастку для MIM.

Почти 90 % североамериканских фирм строят работу по одному из стандартов ISO 9000/9001/9002, из них около 25 % компаний ориентированы на соответствие стандарту ISO 14000, некоторые предприятия — на стандарты автомобильной отрасли, но почти 60 % производителей не проявляют никакой инициативы в этом направлении, т. е. продают покупателю не готовую деталь, а точную заготовку. Только некоторые ведущие мировые компании (в том числе Maetta Sciences, Pratt and Whitney, Polymer Technologies Inc. и PCC Advanced Forming Technology) сертифицированы по стандарту AS 9100 B, соответствие которому необходимо производителям деталей для аэрокосмического применения.

Ведущие компании рассматривают сертификацию как отражение своих усилий по дальнейшему продвижению к расширению и приемлемости освоенных MIM-технологий для использования при производстве изделий и деталей из

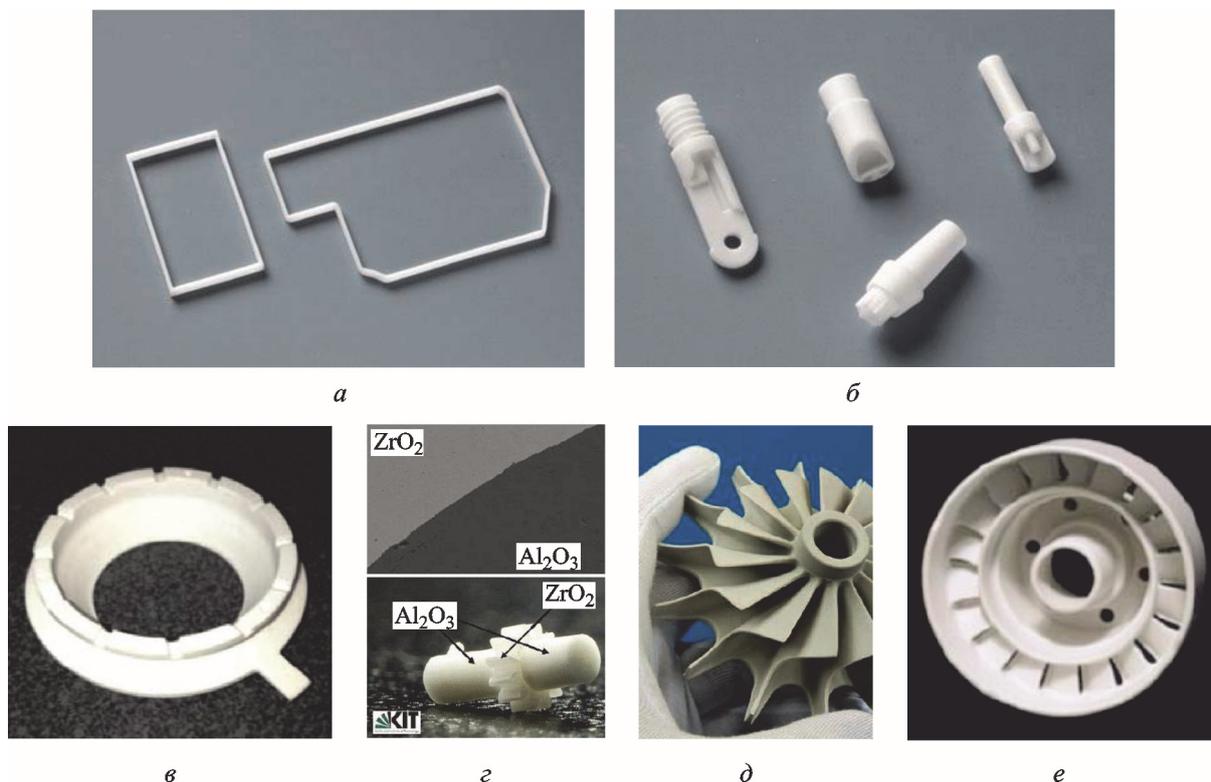


Рис. 3. Изделия, изготовленные CIM-методом:  
 а — «изолирующие кольца» массой менее 1 г, длиной 25 мм (слева) и около 40 мм (справа); б — элементы деталей хирургических приборов из циркона диаметром 0,20...3,81 мм, длиной 6,35...12,7 мм; в — деталь аэрокосмического двигателя диаметром 38 мм из диоксида циркония, отличающегося жаропрочностью и химической стойкостью к авиакеросину; г — микрошестеренка и ось из разнородных керамик; д — ротор турбины из нитрида кремния (Fraunhofer IKTS); е — статор турбины из композиционного материала муллит (43 % по объему) + циркон (57 % по объему) (Oregon State University, США)

новых конструкционных материалов. Так, вице-президент РТИ по производству С. Сисн заявил корреспонденту журнала *PIM International*: «МIM обеспечивает уменьшение массы деталей, увеличение производительности и значительное сокращение затрат по сравнению с конкурирующими технологиями, такими как литье по выплавляемым моделям и механическая обработка. С сертификацией по AS 9100 клиенты из аэрокосмических фирм могут быть уверены в том, что наши MIM-детали и инженерные услуги при условии удовлетворения всех технических требований и спецификаций процесса соответствуют самым жестким стандартам» [4].

На рис. 2 приведены примеры конструкторских решений изделий новой техники и широкого спектра металлических конструкционных материалов, применяемых при их производстве.

Разработанные технологии и навыки работы с металлами уже находят применение на рынках изделий из конструкционных керамик (рис. 3), в том числе при производстве деталей для работы в агрессивных средах, деталей турбин и компрессорных систем, спутников, ракет, огнестрельного оружия, в военных и оборонных приложениях.

Благодаря возможности изготовления изделий сложной формы MIM позволяет выбирать

геометрию, обеспечивающую существенное снижение их массы с допуском по размерам 0,3...0,5 %. Наиболее типичными являются следующие диапазоны массогабаритных характеристик MIM-изделий: масса — от 0,1 до 100 г, длина до 250 мм, толщина стенки — от 0,5 до 6,0 мм. Материалы MIM-деталей допускают широкий спектр пост-обработок: термическую, химическую, механическую, нанесение покрытий (фосфатирование, эмалирование, гальванопокрытия, органические и износостойкие вакуумно-плазменные покрытия), азотирование, борирование и т. д. В настоящее время соревнование между новыми проектами происходит в направлении более крупных размеров деталей.

Новые методы привлекают внимание разработчиков передовой техники в тех отраслях машиностроения, где делается упор на миниатюризацию изделий, использование новых материалов и усложнение конструкции детали (табл. 2).

По статическим данным, MIM все еще находится на ранней стадии развития этого технологически сложного процесса точного формообразования. Современному специалисту необходимо знать, что конструируемые металлические детали могут быть изготовлены и доведены до готового изделия не только традиционными ме-

Таблица 2

Характеристики деталей, изготовленных конкурирующими методами

Характеристика	Инжекционное литье порошковых композиций (MIM)	Порошковая металлургия (Powder metallurgy)	Литье под давлением (Die casting)	Литье по выплавляемым моделям (Investment casting)	Механическая обработка (Machining)
Сложность формы	Высокая	Низкая	Высокая	Удовлетворительная	Высокая
Толщина стенки, мм	0,5...10	1...20	0,8...10	2...20	0,5...100
Шероховатость поверхности Ra, мкм	0,4...2	2...5	5	5	0,2...4
Прочность (%)	Высокая (> 96)	Удовлетворительная (70)	Низкая	Удовлетворительная (> 95)	Высокая (100)
Плотность, %	95...100	< 95	99...100	99...100	99...100
Масса, г	0,01...300	5...2 500	–	1...1 000	1...10 000
Минимальный допуск, %	0,3...0,5	1,0	–	0,5...1,0	< 0,1
Разнообразие материалов	Большое	Среднее	Небольшое	Среднее	Большое
Производительность	Высокая	Высокая	Высокая	Удовлетворительная	Низкая
Себестоимость	Средняя	Низкая	Низкая	Средняя	Высокая

годами литья фасонной заготовки и ее последующей обработкой резанием, но и с использованием концепции литья пластмасс [3, 4, 9]. При этом важно понимать и уже на стадии обучения довести до будущего специалиста, что хотя начальная стоимость переработки материалов для РИМ больше, чем для традиционных методов заготовительных производств, но и затраты на механическую обработку деталей также очень велики. В результате при высоких размерной точности и классе чистоты поверхностей стоимость производства сложных МИМ-изделий обычно примерно в 3 раза меньше, чем у аналогов, изготовленных с применением механической обработки.

В настоящее время литьем под давлением металлических порошков занимаются многие крупные зарубежные фирмы: Bosch, Siemens, Chrysler, Honeywell, Volkswagen, Mercedes-Benz, BMW, Chanel, Apple Computer, Pratt and Whitney, Samsung, Texas Instruments, General Electric, Nokia, Motorola, Rolls Royce, Continental, Stryker, LG, Sony, Philips, Seagate, Toshiba, Ford, General Motors, IBM, Hewlett-Packard, Seiko, Citizen, Swatch и др. [3]. Объем продаж (по стоимости) материалов, используемых для литья, составляет, %: нержавеющие стали — 43, стали — 27, сплавы вольфрама — 8, железоникелевые сплавы — 7 (в основном магнитные сплавы), титановые сплавы — 4, медные сплавы — 3, сплавы на основе кобальта и хрома — 3, инструментальные стали — 2, никелевые жаропрочные сплавы — 2, сплавы для электроники — 1 (Kovar и Invar).

Особо следует отметить высочайшее качество поверхности литых изделий, соответствующее таковому при чистовом точении (рис. 4, табл. 2), и точность размеров (табл. 3) деталей, позволяющей отправлять их на участок сборки без механической обработки [10].

Рассмотрим подробнее технологию РИМ. Новизна, отличающая ее от литья полимеров и традиционных способов литья или формообразования в технологиях порошковой металлургии, заключается в предварительном создании на основе легкоплавкого полимерного связующего и порошка сплава оптимально наполненного технологического композиционного материала [1, 3]. Последний сначала допускает переработку в фасонную («зеленую») деталь литейным методом (рис. 5, а), а затем демонстрирует пригодность к последовательному удалению компонентов полимерного связующего из литой детали без ее

Таблица 3

## Допуски для РИМ-изделий

Параметр	Значение	
	Среднее	Максимальное
Основные размеры, мм (%)	0,1 (0,3)	0,04 (0,05)
Масса, %	0,4	0,1
Диаметр отверстий, %	0,1	0,04
Расстояние между внутренними секциями, %	0,3	0,1
Углы, град	2	0,1
Отклонение по плоскости, %	0,2	0,1
Параллельность, %	0,3	0,2
Цилиндричность, %	0,3	0,3
Прямоугольность, % (град)	0,2 (0,3)	0,1 (0,1)
Шероховатость, мкм	0,3	0,01
Плотность, %	1	0,2

разрушения (рис. 5, б) и при значительной объемной усадке изделия выдерживает спекание пористого тела с сохранением геометрической формы детали (рис. 5, в). Конечная металлическая деталь и ее микроструктура формируются в результате спекания пористой фасонной детали, как правило, уже без приложения избыточного давления.

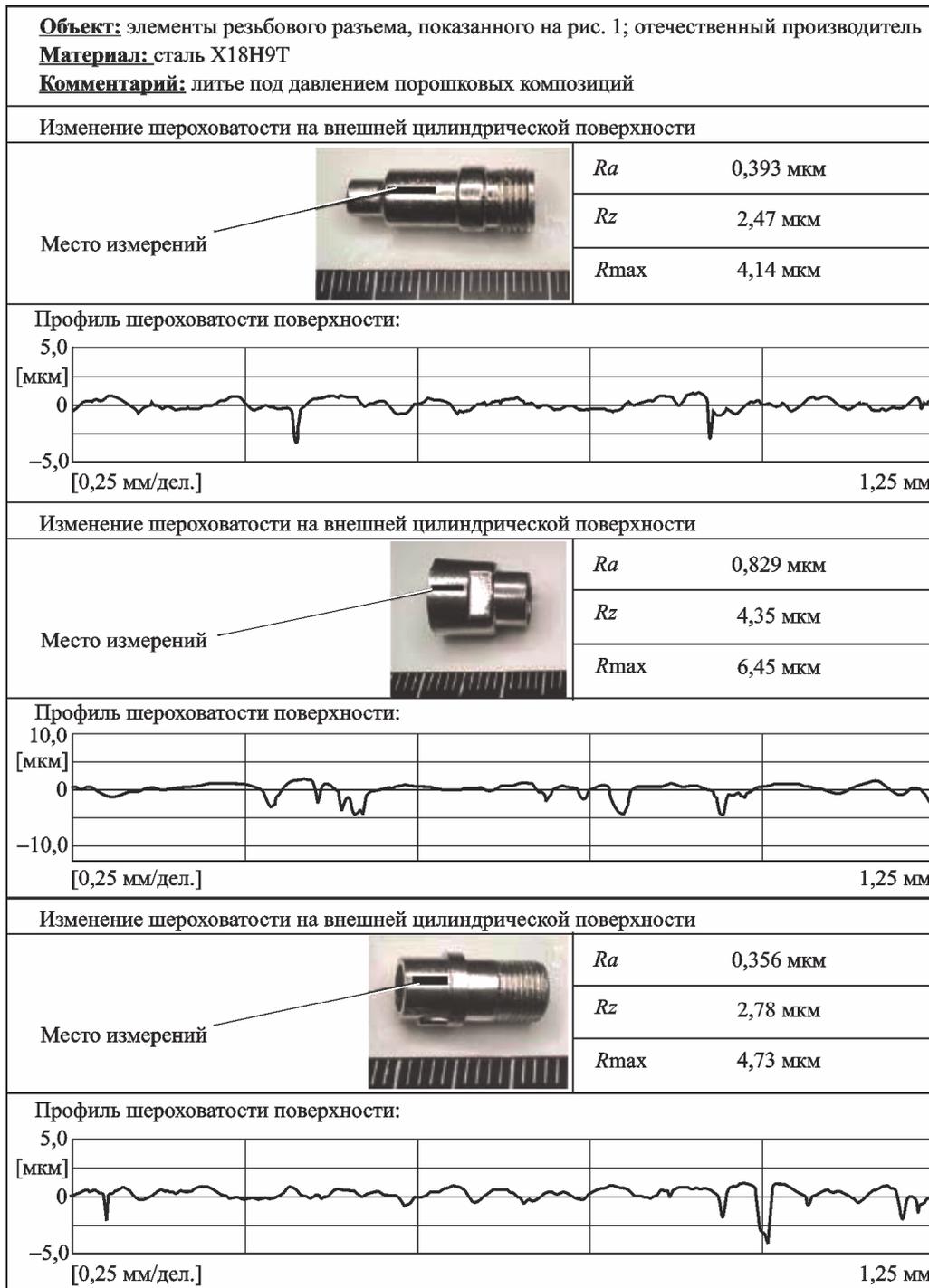
Выбор необходимого порошка и смеси полимеров и изготовление из них композита (фидстока), оптимизируемого для осуществления последующих стадий технологической цепи, — первоочередная задача метода. Чаще всего используют распыленный газом порошок со средней крупностью частиц 10...20 мкм (рис. 6, а). Типичная микроструктура фидстока показана на рис. 6, б. Изготовление фидстока осуществляют специализированные фирмы или сам производитель деталей (см. табл. 1), отвечающие за требуемое качество материала.

Оптимизация состава и выбор режимов смешивания компонентов направлены на достижение максимальной однородности в распределении крупных частиц металлического порошка и предотвращение разделения связующего и наполнителя на стадии литья.

Изделия, изготавливаемые новыми способами, получают или на специализированных машинах литья под давлением (рис. 7), или на прессовом оборудовании.

Уникальность показанной на рис. 7 схемы прессы высокого давления в том, что в одной машине совмещены три обязательных этапа подготовки к операции литья. Фидсток в твердом состоянии поступает в бункер (бункеры), откуда через дозирующий питатель передается

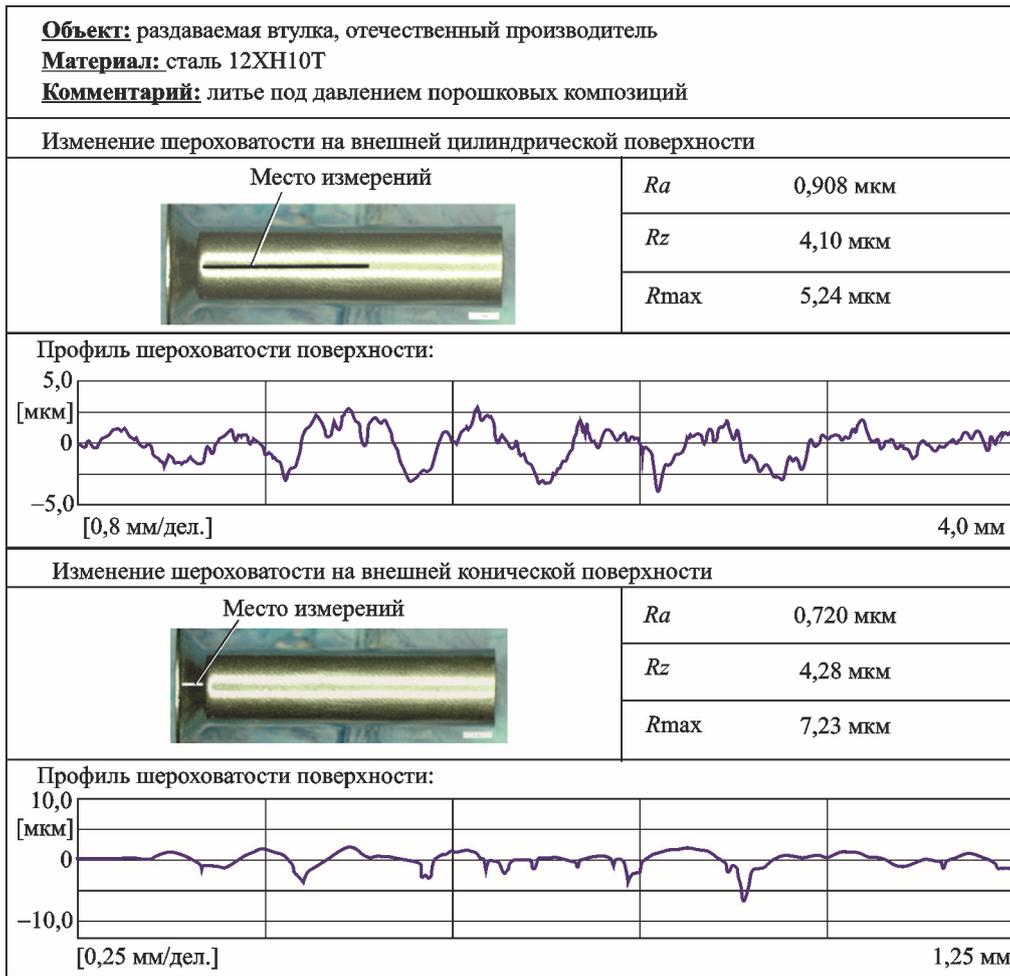
в обогреваемый цилиндр, в котором завершаются (реализуются) первый и второй этапы подготовки суспензии. Для перемешивания компонентов внутри рабочего цилиндра применяют шнек (шнеки), с помощью которого материал транспортируется в направлении сопла.



a

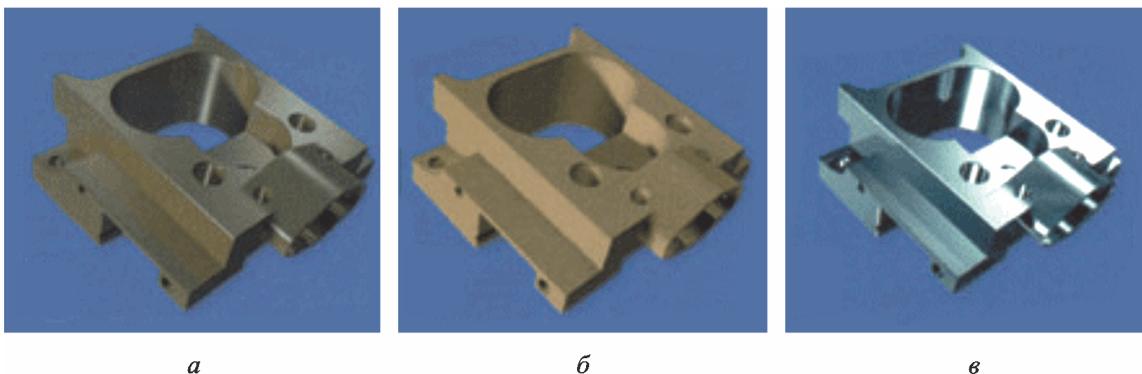
Рис. 4 (начало). Шероховатости МИМ-деталей отечественного производства, измеренные с помощью профилометра MarSurf M 300:

a — элементов резьбового разъема



б

Рис. 4 (окончание). Шероховатости МИМ-деталей отечественного производства, измеренные с помощью профилометра MarSurf M 300:  
 б — раздаваемой втулки



а

б

в

Рис. 5. Стальная деталь, изготовленная компанией BASF AG по МИМ-технологии:  
 а — «зеленая» деталь; б — после удаления связующего («коричневая» деталь); в — после спекания

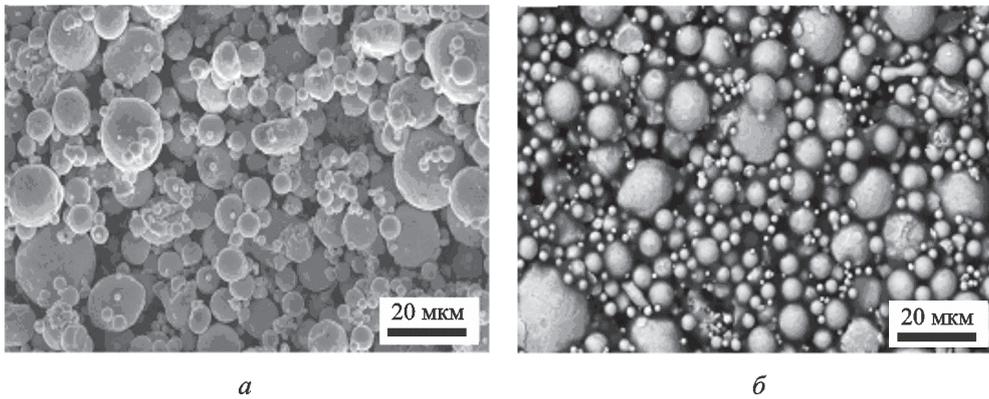


Рис. 6. Микрофотографии SEM [3]:  
 а — порошка Inconel 718 производства фирмы Osprey Sandvik (Великобритания);  
 б — типичной смеси порошок-связующее

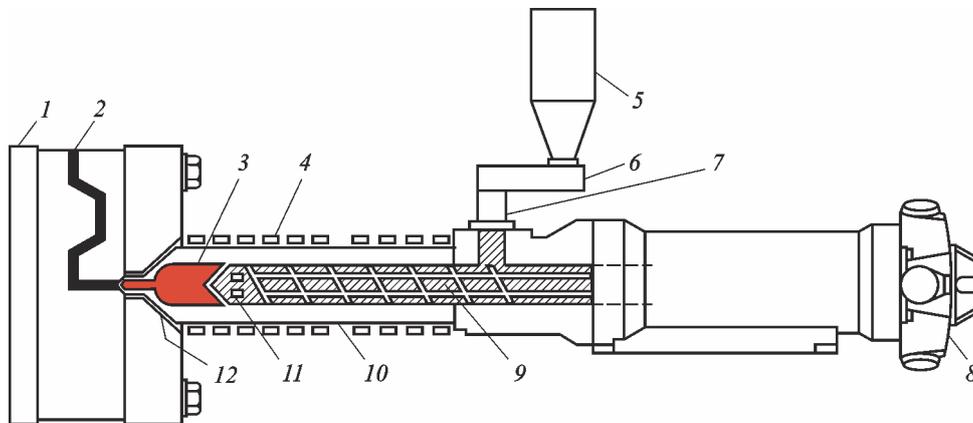


Рис. 7. Принципиальная схема конструкции прессы высокого давления, используемого для тиксомолдинга и PIM:

1 — опора; 2 — форма; 3 — порция суспензии с тиксотропными свойствами (Mg-сплавы,  $T = 560 \dots 630 \text{ }^\circ\text{C}$ ; PIM-суспензии,  $T = 100 \dots 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ); 4 — нагреватели; 5 — бункер исходных материалов (фидстока); 6 — питатель; 7 — аргон (при литье Mg-сплавов); 8 — привод шнека и системы впрыска; 9 — шнек; 10 — обогреваемый цилиндр; 11 — обратный клапан; 12 — сопло

После частичного расплавления образовавшаяся суспензия подвергается интенсивным сдвиговым деформациям в сопле, обеспечивающим приобретение материалом суспензии требуемых тиксотропных свойств до придания ей формы изделия (см. рис. 7, окрашенная в красный цвет порция суспензии).

Формообразование детали (см. рис. 5, а) — третий этап технологической цепи литья «зеленой» детали, осуществляемый в пристыкованной к рабочему цилиндру пресс-форме. Заполнение полости формы проводится поступательным перемещением шнека, используемым для впрыска требуемой порции материала отливки и управления процессами на стадиях заполнения и затвердевания. Этот тип оборудования широко применяют и для тиксолитья (тиксомолдинга) ответственных деталей из

Mg-сплавов, и для литья полимеров, наполненных порошками PIM (MIM, CIM). Следует вновь отметить, что при PIM-процессе плавится только полимерное связующее, объемная доля которого редко превышает 40 %.

Описание литейного этапа процесса приведено на рис. 8. Состояние формуемого металлического материала, не связанное с зарождением и ростом кристаллов, описывается уравнением состояния полимерного связующего, наполненного твердым металлическим порошком ( $pVT$ -диаграмма на рис. 8, а), диаграммой давления в полости формы (рис. 8, б) и профилем температуры пресс-формы (рис. 8, в). Процесс заполнения полости стартует в точке А при высокой скорости впрыска, относительно низком давлении и температуре жидкого фидстока, определяемых молекулярными

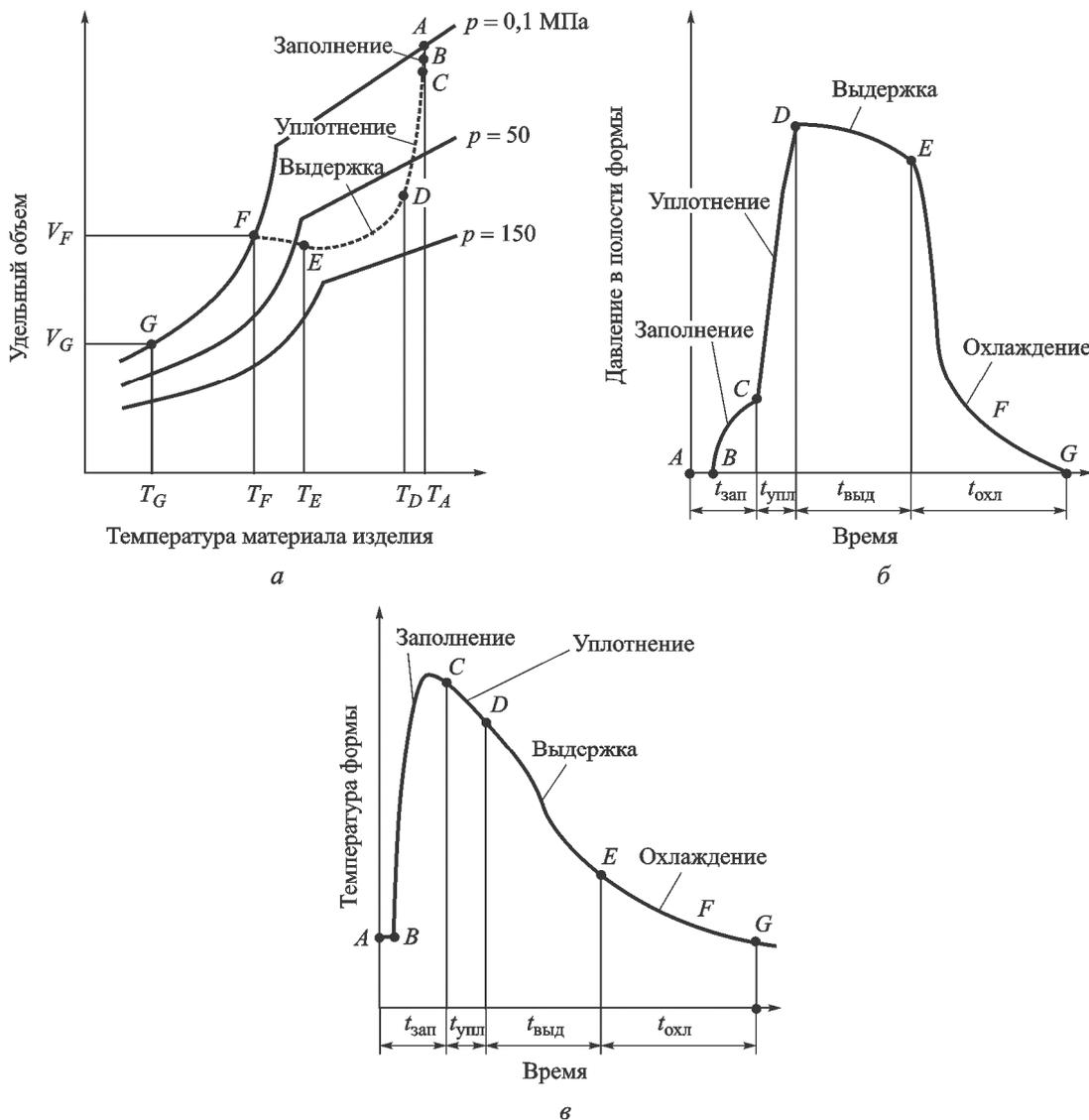


Рис. 8. Зависимости, характеризующие стадию формообразования детали в литейной форме: а —  $pVT$ -диаграмма суспензии; б — изменение давления в полости формы; в — изменение температуры формы при формировании «зеленой» детали;  $t_{\text{зап}}$  — время фазы заполнения формы;  $t_{\text{упл}}$  — время уплотнения формы;  $t_{\text{выд}}$  — время выдержки;  $t_{\text{охл}}$  — время охлаждения

характеристиками связующего, объемной долей, свойствами наполнителя и реологическими свойствами расплавленного фидстока. В полости формы давление начинает повышаться в точке В (здесь композит с расплавленным связующим касается первого датчика давления), после чего до практически полного заполнения полости формы давление непрерывно увеличивается. Однако вследствие реологических свойств расплавленного фидстока этот рост относительно невысок и фаза заполнения полости завершается в точке С без какого-либо сжатия суспензии.

Далее начинается процесс уплотнения «зеленой» детали и давление стремительно возрастает до максимального значения в точке D, где управление давлением впрыска переключается на удержание заданного давления для доуплотнения композиционного материала на достаточно продолжительном участке DE. Этот участок — стадия доуплотнения материала «зеленой» детали, которое осуществляется за счет слабого перетекания жидкой суспензии из литниковой системы, компенсируя усадку связующего, вызываемую быстрым охлаждением пресс-формы и затвердеванием «зеленой» детали. В этой фазе объем фидстока в «зеленой» детали должен быть максимально приближен к объему пресс-формы, а масса детали должна расти.

тет до максимального значения в точке D, где управление давлением впрыска переключается на удержание заданного давления для доуплотнения композиционного материала на достаточно продолжительном участке DE. Этот участок — стадия доуплотнения материала «зеленой» детали, которое осуществляется за счет слабого перетекания жидкой суспензии из литниковой системы, компенсируя усадку связующего, вызываемую быстрым охлаждением пресс-формы и затвердеванием «зеленой» детали. В этой фазе объем фидстока в «зеленой» детали должен быть максимально приближен к объему пресс-формы, а масса детали должна расти.

Компенсация усадки полимера продолжается до тех пор, пока не перемерзнет питатель. Точка *E* на представленных кривых завершает фазу уплотнения, и при продолжающемся охлаждении удельный объем полимерного материала не изменяется (см. рис. 8, *a*, изохорный процесс *EF*). Изохорная фаза формообразования считается особенно важной, так как в этом интервале формируются остаточные напряжения, вызывающие коробление «зеленой» детали. Эта фаза отвечает за размерную точность отливки. Прохождение точки *F* без изменения геометрии «зеленой» детали имеет решающее значение для повторяемости массы и размеров формуемого изделия. После прохождения точки *F* отливку изменить нельзя и усадка при охлаждении до температуры окружающей среды не влияет на деталь.

Таким образом, *D* и *E*, являющиеся важными точками переходных процессов в фидстоке, необходимо контролировать, чтобы оптимизировать протекание фазы уплотнения. Точка *D* является *точкой переключения* со стадии заполнения на уплотнение, и этот момент времени тщательно контролируется.

Своевременный возврат шнека в правильное положение, влияющее на точность следующей порции жидкого фидстока и в значительной степени определяемое его реологическими свойствами, также вносит вклад в качество литого изделия: повторяемость линии *AG* и особенно отрезка *DE* от одного цикла к другому считается решающим фактором качества всего МІМ-процесса.

Специалисты стараются находить причины появления дефектов отливок и способы их

устранения путем сравнения результатов физического и численного моделирования стадии заполнения пресс-формы (штампа) суспензией. Характерные особенности течения концентрированных суспензий, принципиально отличающиеся от течения жидкости Ньютона в традиционном литье, легко прослеживаются на рис. 9. Учет особенностей вязкого течения двухфазных жидкостей, изменяющих свои свойства под воздействием сдвиговых деформаций и теплообмена с формой и требующих особого подхода к управлению процессом, становится базой и частью теоретических основ новых способов литья.

По данным фирмы РТІ, где вся технологическая цепочка, включающая в себя конструирование оснастки, изготовление ее и фидстока, моделирование стадии литья и осуществление всех последующих стадий процесса, реализуется на одном предприятии [4], после того как пресс-форма изготовлена, переход к промышленному производству детали может занимать от 4 до 12 недель в зависимости от проблем подготовки, сложности геометрии и требуемых допусков. Время разработки, как правило, не зависит от выбранного конструктором типа материала детали. Повлиять на этот параметр могут размер и масса детали: чем крупнее деталь, тем больше времени потребуется для дебиндинга (удаления связующего), спекания и термической обработки.

Отсутствие соответствующей научной базы и невысокий уровень инженерной подготовки специалиста могут затянуть начало производства качественной детали на многие месяцы. Для литейщика, ориентированного на произ-

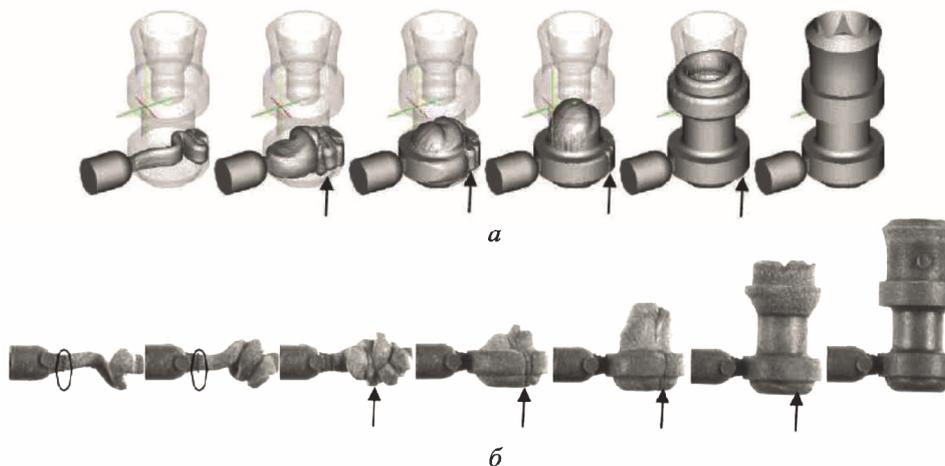


Рис. 9. МІМ-технология [11]:

*a* — моделирование заполнения формы; *b* — результаты прерывания заполнения формы

водство изделий из металлов, конструирование формы с ее системами охлаждения и вентиляции, расчет и моделирование литниково-питающей системы, выбор условий формирования детали особенно значимы и определяются *реологическими свойствами формуемых суспензий*. Напомним, что в момент заполнения литейной формы материал имеет структуру, показанную на рис. 6, б, где жидкостью является только полимерное связующее.

При решении прикладных технологических задач, таких как литье «зеленой» детали, прежде всего следует рассмотреть обратную проблему: как перейти от измеренных реологических свойств материала, определяющих его свойства в «точке», к предсказанию поведения в макроскопическом масштабе. Общую задачу можно сформулировать следующим образом:

- известны (измерены) реологические свойства материала;
- необходимо найти соотношение между силами и скоростями движения при некоторой произвольной геометрии оснастки, в которой осуществляется течение.

Чтобы правильно приступить к решению прикладных динамических задач в новых технологиях, следует выдерживать последовательность решения, представленную на рис. 10. Блок 1 схемы — кривые течения при сдвиге и соотношения между напряжениями и деформациями в переходных режимах сдвига при различных температурах деформирования. Обязательным является определение предела текучести, времени релаксации и констант материала, характеризующих его чувствительность к скорости сдвига.

Блок 2 отражает аппроксимацию полученных экспериментальных данных подходящими уравнениями состояния, заключающуюся в обобщении полученных результатов на случай трехмерных (3D) деформаций.

Блок 3 соответствует важному критическому моменту — проверке предложенной реологической модели в условиях экспериментов, отличных от тех, в которых были получены исходные данные, с тем чтобы проверить, насколько реалистичными оказываются предсказания предложенной модели.

Решение граничных задач, представляющее собой конечную цель моделирования любого реального технологического процесса, основано на формулировке системы уравнений, описывающих этот процесс (блок 4). При этом в

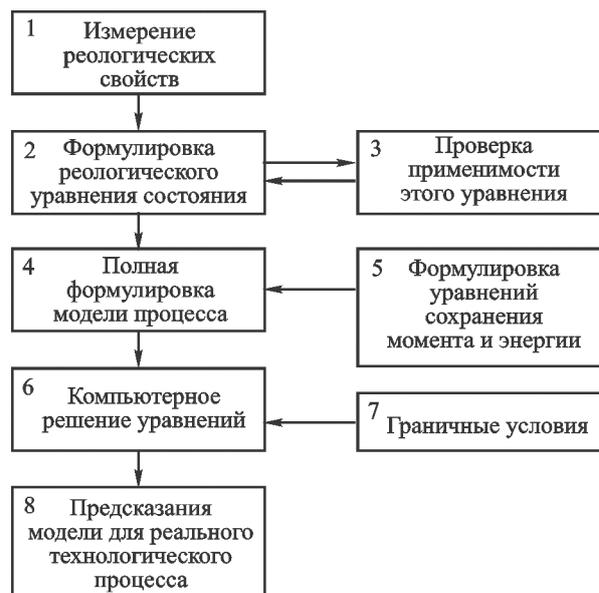


Рис. 10. Принципиальная схема, иллюстрирующая последовательность решения прикладных динамических задач

отличие от традиционных подходов *использовано сопряжение реологического уравнения состояния с уравнениями сохранения количества движения, массы и энергии* (блок 5).

Таким образом, можно сформулировать *полную систему уравнений*, моделирующих течение материала в любых геометрических и тепловых условиях. В этом *принципиальное отличие основ теории литейных процессов в МИМ- и тиксотехнологиях от таковых для традиционных металлургов литейных процессов, где применяют сопряжение уравнений сохранения с законами зарождения и роста кристаллов*.

Для корректно сформулированных граничных условий осуществляется компьютерное решение с использованием современной вычислительной техники и известных расчетных методов. Отечественные литейщики и металлурги широко используют в своей практической деятельности такие методы. В чем же причина столь заметного отставания?

**Две парадигмы технологий литья изделий из металлов.** У российских специалистов сложилось твердое убеждение, что затвердевание сплава в полости формы, где материал создаваемой детали переходит из жидкого состояния в твердое, — единственный и, естественно, основной процесс при формировании отливки из металлов. Суть традиционной технологической

парадигмы, четко сформулированная профессором Г.Ф. Баландиным [12], не меняется в современном изложении теории литейных процессов [13–15]: «Плавка металла и затвердевание отливок в подготовленной к заливке жидким металлом литейной форме являются содержанием технологической парадигмы и основными процессами литейного производства».

По мнению Баландина, теория формирования отливки — инструмент, с помощью которого конструктор может создавать технологичные литые детали, а технолог — управлять процессом, выбирая условия литья и проектируя литниково-питающую систему отливок. В центре внимания указанной теории оказались два аспекта затвердевания: тепловой, так как на этой технологической операции от жидкого металла должно быть отведено количество теплоты, эквивалентное накопленному сплавом при его подготовке к заливке, и проблема управления процессами затвердевания для получения отливок с заданным кристаллическим строением. По словам Баландина, «объекты теории формирования отливки — расплавы литейных сплавов и процессы, происходящие в них во время заливки в форму и последующего затвердевания и используемые для решения инженерных задач повышения выхода годного литья и получения отливок с заданными служебными свойствами».

При любом традиционном способе литья формирование кристаллического строения отливки определяется закономерностями самопроизвольного или гетерогенного зародышеобразования и кинетическими закономерностями кристаллизации, во всех случаях завершающейся формированием дендритной морфологии зерен первично кристаллизующейся фазы.

На протяжении десятилетий перечисленные выше требования к фасонным заготовкам деталей обеспечивались развитием плавильного оборудования и совершенствованием специальных способов литья. Общими признаками последних служат или заливка и кристаллизация металла в специальных формах в условиях естественной гравитации, или физические процессы, с помощью которых оказывается внешнее воздействие на жидкий и кристаллизующийся металл, помещенный в литейную форму.

В рамках традиционной технологической парадигмы для описания литейной гидравлики использовались и используются только модели жидкости Ньютона или Бингама [14]. Предло-

*женная реологическая модель поведения сплава в интервале кристаллизации, известная как модель Баландина–Каширицева, является узкоспециализированной. Она не предназначена для анализа течения и изучения специфических реологических эффектов, которые обязательно проявляются у неньютоновских жидкостей, и поэтому не может стимулировать поиски новых технологических решений, аналогичных РИМ-технологиям.*

Практическое отсутствие в России РИМ-индустрии и опыта новых технологий литья точных деталей из металлов не создало предпосылок для написания соответствующих разделов в учебниках и справочниках для студентов вузов, обучающихся по литейным специальностям и специализациям. Кто же может взять на себя ответственность за освоение РИМ в проекте «Новые производственные технологии»? Для освоения в России литейных технологий нового поколения (РИМ (МИМ, СИМ), тиксоформинг), ориентированных на использование знакомых конструктору отечественных материалов, но в производствах, построенных на реологических моделях тиксотропных жидкостей [16], стала актуальной проблема разработки научных основ этих технологий [3, 7, 17–24]. На наш взгляд, стимулировать такую работу должны конструкторские разработки изделий новой техники, включая оружие и боеприпасы [25], ориентированные на миниатюризацию и использование современных материалов, а для их практической реализации необходимо иметь программу опережающего развития специализированной учебной материально-технической базы в ряде ведущих вузов страны.

Активность лаборатории «Новые способы и технологии литья» МГТУ им. Н.Э. Баумана в приобретении опыта современных технологий литья металлов отражена в публикациях [18–22]. В работах [18, 21] представлена так называемая полная кривая течения, пригодная для описания течения фидстоков, предназначенных для каталитического удаления связующего с учетом перечисленных выше требований. Полученные зависимости используются для разработки отечественного программного продукта.

Зарубежный опыт создания подобного программного продукта отражен в публикациях фирмы Sigma Engineering GmbH [23, 24], которая, будучи подразделением лидера зарубежного мирового рынка в технологии моделирования процессов литья — компании MAGMA

(Германия), пользуется всеми ее разработками ([www.magnasoft.de](http://www.magnasoft.de)). Применяемые в программном пакете SIGMASOFT ([www.sigmasoft.de](http://www.sigmasoft.de)) методы моделирования процесса оптимизируют производственный процесс инъекционного литья пластмасс, так как построены с учетом реологии полимеров, но на базе новой реологической модели тиксотропных жидкостей — модели CrossWLF + Herschel-Bulkley. В пакете SIGMASOFT объединены трехмерная геометрия деталей и литниковая система с полной геометрией формы в сборе и системой регулирования температуры. Вопросы моделирования МИМ активно обсуждаются в журнале PIM International [7].

Ниже перечислены некоторые возможности развития мирового МИМ-рынка и информация по различным аспектам его роста в будущем [3].

- Увеличение производства потребительских товаров способствует широкому применению МИМ в различных переносных устройствах: от мобильных телефонов до портативных компьютеров. МИМ-детали, к которым относятся переключатели, кнопки, петли, шпингалеты и декоративные элементы, малы, сложны и сильно нагружены. Поскольку большая часть сборки таких устройств осуществляется в Азии, производство таких деталей также мигрировало в эту часть света для уменьшения транспортных расходов.

- Внедрение МИМ-технологии в автомобильную промышленность началось с освоения деталей турбокомпрессоров, топливных форсунок, компонентов управления (часов, замков, ручек, рычагов) и толкателей клапанов. Первые МИМ-изделия были изготовлены в США для компаний Buick и Chrysler, но затем лидерство перешло в Японию к фирмам Honda и Toyota, выпускающим детали для турбокомпрессоров и клапанов, поступающих от группы объединенных производителей Nippon Piston Rings. Несколько позже свою нишу на рынке двигателей меньших типоразмеров, но с более высокой производительностью, нашли европейские поставщики. В настоящее время существует много проблем, связанных с производством автомобильных деталей, однако большой объем продаж помогает снизить общие расходы и расширить область их применения. Все это позволяет прогнозировать дальнейшее развитие МИМ-технологии в автомобильном секторе.

- Появление эндоскопических устройств способствовало более глубокому проникнове-

нию МИМ в медицинскую отрасль. Наибольший рост МИМ-изделий наблюдается в производстве хирургического инструмента зажимного типа и роботизированных устройств. При этом в стоматологии по-прежнему велик спрос на брекет-ы, в изготовлении которых на сегодняшний день участвуют несколько фирм. Инструменты новой конструкции и ручной инструмент обеспечили специальные возможности микрохирургическим изделиям. Так, МИМ переходит от своей сильной исторической позиции в брекетах к ручным инструментам и специальным эндодонтическим хирургическим устройствам.

- Первые аэрокосмические детали, созданные с помощью МИМ, появились почти 30 лет назад. В настоящее время начинается новая волна роста применения МИМ, движимая соображениями стоимости и экономии. В этой области проявляют активность около десятка фирм. Как и в медицинской сфере, объем производства часто невелик — до 10 000 шт./год, но при этом стоимость изделия высока.

- Развитие МИМ-деталей для осветительной техники ограничено тугоплавкими металлами и керамиками и тем, что разработки в этой области находятся в руках большой тройки — Sylvania, Philips и General Electric. Жизнеспособность такой продукции вызывает большие сомнения из-за наличия конкурирующих светодиодных (LED) устройств. Разработаны также МИМ-кронштейны из меди, но их стоимость, вероятно, будет велика. При этом огромный интерес потребителей к микро-МИМ может изменить ситуацию.

**ARC Group Worldwide, Inc. концентрирует внимание инженерного сообщества США на революционных технологиях литья [8].** ARCMIM — объединенные МИМ-фирмы, ставшие в 2012 г. подразделением ARC Group Worldwide, Inc., — относительно новое имя среди МИМ-производителей. Advanced Forming Technology, Inc. (AFT Колорадо), FloMet LLC, (обе расположены в США) и AFT Hungary Kft. (AFT Венгрия), являющиеся тремя крупными производителями МИМ-изделий, делают ARCMIM одним из самых больших поставщиков МИМ-изделий в мире [8]. Основные производственные группы производят литьем точные фасонные заготовки, фланцевые изделия, гарнитуру, детали радиоаппаратуры.

Специалисты ARC Group Worldwide полагают, что благодаря непрерывному внедрению ав-



Рис. 11. Общий вид цеха литья под давлением компании AFT Колорадо



Рис. 12. МИМ-детали, подготовленные для дебиндинга и спекания (фирма FloMet)

томатизации, робототехники, искусственного интеллекта, 3D-прототипирования и аддитивных технологий производство в значительной степени снова станет локальным бизнесом в США. Не исключается также дальнейшее расширение группы ARC путем присоединения других фирм. В апреле 2014 г. AFT объявила о приобретении Advance Tooling Concepts, LLC (ATC) и Thixoforming LLC. ATC — ведущая американская компания в области литья под давлением пластмасс со специализацией на медицинской продукции, электронике, потребительских товарах и изделиях оборонной промышленности, а Thixoforming — один из глав-

ных поставщиков деталей из магниевых сплавов. Добавление технологии 3DMT к бизнес-модели фирмы было стратегическим шагом, чтобы обеспечить конкурентоспособные преимущества для клиентской базы ARCMIM. Технологии, возможности и ресурсы 3DMT дают клиентам возможность вывести их изделия на рынок первыми. На рис. 11–13 представлена организация новых литейных производств в некоторых подразделениях ARCMIM.

ARCMIM придает большое значение качеству изделий для космического рынка. Уже производятся втулки, скобы, лопадки компрессоров, роторы, разъемы и другие детали, а недавно изго-



Рис. 13. Печь для спекания компании AFT Венгрия

товленное МИМ-изделие стало неотъемлемой частью ракетной двигательной установки, запущенной в космос. Особое внимание компания уделяет аддитивным технологиям.

## Выводы

1. Приведенная информация позволяет найти новые источники роста отечественной оборонной и гражданской промышленности путем перехода от существующей концепции высокоско-

ростной механической обработки металлургических полуфабрикатов к широкомасштабному производству точных заготовок фасонных деталей из металлов и керамик с помощью современных технологий формообразования.

2. Применение рассмотренных технологий позволит по-новому посмотреть на вопросы технологичности широкого круга деталей, используемых в разных отраслях отечественного машиностроения, а также существенно расширит набор эффективных конструкторско-технологических решений при производстве перспективных образцов техники.

3. Внедрение рассмотренных технологий потребует тесного сотрудничества промышленных предприятий, отраслевых институтов и вузов для совместного решения всего комплекса проблем: от подготовки кадров, обладающих необходимым набором междисциплинарных знаний, до производства как самих металлических и керамических деталей, так и основного технологического оборудования для реализации рассматриваемых технологий.

Представляя читателю информацию, привлекающую внимание к новым точкам роста различных отраслей машиностроения, приглашаем специалистов оценить задачи и рубежи технологической и конструкторской подготовки выпускника вуза машиностроительного профиля в соответствии с современным уровнем развития литейных технологий.

## Литература

- [1] Williams N. *Firearms: US slowdown fails to dampen optimism*. URL: <http://www.pim-international.com/wp-content/uploads/sites/2/2016/04/PIM-International-December-2014-SP.pdf> (дата обращения 15 декабря 2016).
- [2] Williams N. Metal Injection Moulding in the firearms industry: A global perspective. *PIM International*, 2014, vol. 8(4), pp. 31–47.
- [3] *Handbook of metal injection molding*. Ed. Heaney D.F. Woodhead Publishing Limited, 2012. 601 p.
- [4] Polymer Technologies Inc. looks to the aerospace industry for new PIM applications. *PIM International*, 2013, vol. 7(1), pp. 45–51.
- [5] Грибовский П.О. *Горячее литье керамических изделий*. Москва, Госэнергоиздат, 1956. 400 с.
- [6] URL: <http://www.sinter-sp.ru/index.php/ru/kliewtam> (дата обращения 15 марта 2016).
- [7] Whittaker D. PIM at Euro PM2014: Emerging applications, material developments and advances in process modelling. *PIM International*, 2014, vol. 8, no. 4, pp. 61–71.
- [8] Williams N. ARC Group Worldwide, Inc.: A global leader in MIM embraces the Additive Manufacturing revolution. *PIM International*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 47–55.
- [9] Пархоменко А.В., Амосов А.П., Самборук А.Р., Игнатов С.В., Костин Д.В., Шульtimoва А.С. Разработка отечественного порошкового гранулята со связующим на основе полиформальдегида для МИМ-технологии. *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*, 2013, № 4, с. 8–13.

- [10] Куцбах А.А., Семенов Б.И. Импортозамещающая технология изготовления литьем (PIM) тонкостенной стальной раздаваемой втулки для разъемных соединений композитных панелей. *Вооружение, военная техника и боеприпасы. Форум лучших студентов технических вузов России. Сб. науч. ст. Ч. 2.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, с. 176–181.
- [11] Raymond V. *Metal Injection Molding Development: Modeling and Numerical Simulation of Injection with Experimental Validation.* University De Montreal, 2012. 122 p.
- [12] Баландин Г.Ф. *Теория формирования отливки: основы тепловой теории. Затвердевание и охлаждение отливки.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 360 с.
- [13] Пикунов М.В. *Плавка металлов, кристаллизация сплавов, затвердевание отливок.* Москва, МИСиС, 2005. 416 с.
- [14] Чуркин Б.С. *Теория литейных процессов.* Екатеринбург, РГППУ, 2006. 454 с.
- [15] Гини Э.Ч., Зарубин А.М., Рыбкин В.А. *Специальные технологии литья.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 367 с.
- [16] Малкин А.Я., Исаев А.И. *Реология: концепции, методы, приложения.* Санкт-Петербург, Профессия, 2010. 560 с.
- [17] Семенов Б.И., Куштаров К.М. *Производство изделий из металла в твердоточном состоянии. Новые промышленные технологии.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 223 с.
- [18] Муранов А.Н., Семенов А.Б., Семенов Б.И. Неньютоновское течение суспензий, используемых при инъекционном литье металлических изделий сложной геометрии. *Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред. Сб. матер. Всерос. конф.,* Москва, ИПРИМ РАН, 2015, с. 638–639.
- [19] 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). *Аддитивные технологии: настоящее и будущее. Сб. тр. II Междунар. конф., Ч. 4.* Москва, ФГУП ВИАМ, 2016. URL: <http://conf.viam.ru/conf/192/proceedings>.
- [20] Семенов А.Б., Гавриленко А.Э., Семенов Б.И. Литейные технологии нового поколения, их освоение и развитие в России. Ч. 1. У истоков новой технологической парадигмы. *Технология металлов*, 2016, № 4, с. 13–25.
- [21] Семенов А.Б., Муранов А.Н., Семенов Б.И. Литейные технологии нового поколения, их освоение и развитие в России. Ч. 2. Физическая природа и особенности моделей материалов с тиксотропными свойствами. *Технология металлов*, 2016, № 8, с. 8–17.
- [22] Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Оспенникова О.Г., Семенов Б.И., Семенов А.Б., Королев В.А. 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 высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 9, с. 62–80.
- [23] Thornagel M. Injection molding simulation: New Developments offer rewards for the PIM industry. *PIM International*, 2012, vol. 6, no. 1, pp. 65–68.
- [24] Thornagel M. MIM-simulation: A virtual study on phase separation. *Proceedings of EURO PM 2009*, Copenhagen, European Powder Metallurgy Association, 2009, pp. 135–140.
- [25] Williams N. Metal Injection Moulding in the firearms industry: A global perspective. *PIM International*, 2014, vol. 8, no. 4, pp. 31–47.

## References

- [1] Williams N. *Firearms: US slowdown fails to dampen optimism.* Available at: <http://www.pim-international.com/wp-content/uploads/sites/2/2016/04/PIM-International-December-2014-SP.pdf> (accessed 15 December 2016).
- [2] Williams N. Metal Injection Moulding in the firearms industry: A global perspective. *PIM International*, 2014, vol. 8(4), pp. 31–47.
- [3] *Handbook of metal injection molding.* Ed. Heaney D.F. Woodhead Publishing Limited, 2012. 601 p.

- [4] Polymer Technologies Inc. looks to the aerospace industry for new PIM applications. *PIM International*, 2013, vol. 7(1), pp. 45–51.
- [5] Gribovskii P.O. *Goriachee lit'e keramicheskikh izdelii* [Hot casting of ceramic products]. Moscow, Gosenergoizdat publ., 1956. 400 p.
- [6] Available at: <http://www.sinter-sp.ru/index.php/ru/kliewtam> (accessed 15 March 2016).
- [7] Whittaker D. PIM at Euro PM2014: Emerging applications, material developments and advances in process modelling. *PIM International*, 2014, vol. 8, no. 4, pp. 61–71.
- [8] Williams N: ARC Group Worldwide, Inc.: A global leader in MIM embraces the Additive Manufacturing revolution. *PIM International*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 47–55.
- [9] Parkhomenko A.V., Amosov A.P., Samboruk A.R., Ignatov S.V., Kostin D.V., Shul'timova A.S. Razrabotka otechestvennogo poroshkovogo granulata so svyazuiushchim na osnove poliformal'degida dlia MIM-tekhnologii [The development of the domestic powder granules with a binder on the basis of the due for MIM technology]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Poroshkovaia metallurgii i funktsional'nye pokrytiia* [Russian Journal of Non-Ferrous Metals]. 2013, no. 4, pp. 8–13.
- [10] Kutsbakh A.A., Semenov B.I. Importozameshchaisushchaia tekhnologii izgotovleniia lit'em (PIM) tonkostennoi stal'noi razdavaemoi vtulki dlia raz'emnykh soedinenii kompozitnykh panelei [Import-substituting production technology molding (PIM) made of thin-walled steel sleeve for detachable joints of composite panels]. *Vooruzhenie, voennaia tekhnika i boepripasy. Sbornik nauchnykh statei Forum luchshikh studentov tekhnicheskikh vuzov Rossii* [Weapons, military equipment and ammunition. Collection of scientific articles, the Forum, the best students of technical universities of Russia]. Pt. 2. Moscow, Bauman Press, 2015, pp. 176–181
- [11] Raymond V. *Metal Injection Molding Development: Modeling and Numerical Simulation of Injection with Experimental Validation*. University De Montreal, 2012. 122 p.
- [12] Balandin G.F. *Teoriia formirovaniia otlivki: osnovy teplovoi teorii. Zatverdevanie i okhlazhdenie otlivki* [The theory of the formation of casting: the basics of heat theory. Solidification and cooling of castings]. Moscow, Bauman Press, 1998. 360 p.
- [13] Pikunov M.V. *Plavka metallov, kristallizatsiia splavov, zatverdevanie otlivok* [Melting of metals, solidification of alloys, solidification of castings]. Moscow, MISiS publ., 2005. 416 p.
- [14] Churkin B.S. *Teoriia liteinykh protsessov* [The theory of foundry processes]. Ekaterinburg, RGPPU publ., 2006. 454 p.
- [15] Gini E.Ch., Zarubin A.M., Rybkin V.A. *Spetsial'nye tekhnologii lit'ia* [Special molding technology]. Moscow, Bauman Press, 2010. 367 p.
- [16] Malkin A.Ia., Isaev A.I. *Reologii: kontseptsii, metody, prilozheniia* [Rheology: concepts, methods, and applications]. Sankt-Peterburg, Professii publ., 2010. 560 p.
- [17] Semenov B.I., Kushtarov K.M. *Proizvodstvo izdelii iz metalla v tverdozhidkom sostoianii. Novye promyshlennye tekhnologii* [Manufacture of metal products in solid-liquid state. New industrial technologies]. Moscow, Bauman Press, 2010. 223 p.
- [18] Muranov A.N., Semenov A.B., Semenov B.I. Nen'iutonovskoe techenie suspensii, ispol'zuemykh pri inzhektionsnom lit'e metallicheskh izdelii slozhnoi geometrii [Non-Newtonian flow of suspensions used in injection casting of metal products of complex geometry]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsii, slozhnykh i geterogennykh sred. Sbornik materialov Vserossiiskoi konferentsii* [Mechanics of composite materials and structures, complex and heterogeneous environments. The collection of materials of All-Russian conference]. Moscow, IPRIM RAN publ., 2015, pp. 638–639.
- [19] Semenov A.B., Gavrilenko A.E., Semenov B.I. Poroshkovye tekhnologii sinteza slozhnykh fasonnykh detalei iz supersplavov: AM i/ili PIM (zarubezhnyi i otechestvennyi opyt) [Powder synthesis technology of complex shaped parts made of superalloys: AM and/or PIM (foreign and domestic experience)]. *Kruglye stoly, konferentsii, seminary: sbornik trudov 2 mezhdunarodnoi konferentsii «Additivnye tekhnologii: nastoiashchee i budushchee» 16 marta 2016* [Round tables, conferences, workshops: proceedings of the 2 international conference «Additive technology: present and future»]. Pt. 4. Moscow, FGUP VIAM publ., URL: <http://conf.viam.ru/conf/192/proceedings>.
- [20] Semenov A.B., Gavrilenko A.E., Semenov B.I. Liteinye tekhnologii novogo pokoleniia, ikh osvoenie i razvitie v Rossii. Ch. 1. U istokov novoi tekhnologicheskoi paradigm [Casting

- technologies of new generation, their adoption and development in Russia. Part 1. At origins of new technological paradigm]. *Tekhnologiya metallov* [Technologiya Metallov]. 2016, no. 4, pp. 13–25.
- [21] Semenov A.B., Muranov A.N., Semenov B.I. Liteinye tekhnologii novogo pokoleniia, ikh osvoenie i razvitie v Rossii. Ch. 2. Fizicheskaia priroda i osobennosti modeli materialov s tiksotropnymi svoistvami [New generation casting technologies, their mastering and development in Russia. P. 2-1. Physical nature and features of models of materials with thixotropic properties]. *Tekhnologiya metallov* [Technologiya Metallov]. 2016, no. 8, pp. 8–17.
- [22] Kablov E.N., Evgenov A.G., Ospennikova O.G., Semenov B.I., Semenov A.B., Korolev V.A. Metalloporoshkovye kompozitsii zharoprochnogo splava EP648 proizvodstva FGUP «VIAM» GNTs RF v tekhnologiiakh selektivnogo lazernogo splavlennii, lazernoi gazoporoshkovoi naplavki i vysokotochnogo lit'ia polimerov, napolnennykh metallichesкими poroshkami [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]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2016, no. 9, pp. 62–80.
- [23] Thornagel M. Injection molding simulation: New Developments offer rewards for the PIM industry. *PIM International*, 2012, vol. 6, no. 1, pp. 65–68.
- [24] Thornagel M. MIM-simulation: A virtual study on phase separation. *Proceedings of EURO PM 2009*, Copenhagen, European Powder Metallurgy Association, 2009, pp. 135–140.
- [25] Williams N. Metal Injection Moulding in the firearms industry: A global perspective. *PIM International*, 2014, vol. 8, no. 4, pp. 31–47.

Статья поступила в редакцию 06.02.2017

## Информация об авторах

**СЕМЕНОВ Алексей Борисович** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейные технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: semenov.ab@bk.ru).

**СЕМЕНОВ Борис Иванович** (Москва) — доктор технических наук, зам. зав. кафедрой «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: Semenovbi@bmstu.ru).

## Information about the authors

**SEMENOV Aleksey Borisovich** (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Cast Technology Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: semenov.ab@bk.ru).

**SEMENOV Boris Ivanovich** (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Deputy Head, Space-Rocket Composite Design Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: Semenovbi@bmstu.ru).