

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНОЙ УСАДКИ ОСНОВНЫХ ТИПОВ
ПОРШКОВО-ПОЛИМЕРНЫХ СМЕСЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АНАЛОГОВ СТАЛИ
38ХМА (42СRМO4) МІМ-МЕТОДОМ**

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

*ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

В работе рассматривается одна из передовых технологий порошковой металлургии, эффективная для серийного и массового производства как металлических, так и керамических малогабаритных точных деталей со сложной геометрической конфигурацией – технология «Powder Injection Moulding» (PIM), основанная на использовании для литьевого формования под высоким давлением порошково-полимерных смесей (фидстоков). При использовании PIM-технологии, качество конечной спеченной металлической либо керамической детали в последовательных технологических переделах во многом определяется именно качеством первоначального отформованного полуфабриката – отливки из дисперснонаполненного полимерного композиционного материала. Размерная точность формируемого литьем композиционного полуфабриката, в том числе, связана с его некомпенсируемой усадкой при охлаждении и извлечении из пресс-формы, а значение этой усадки, в свою очередь, определяется величиной коэффициента теплового расширения, который для фидстоков в первую очередь зависит от состава и свойств используемого полимерного связующего. В настоящей работе кратко рассмотрены расчетно-теоретические методы оценки теплового расширения порошково-полимерных смесей (фидстоков). Отмечено, что для материалов со сложной структурой и слабо детерминированными свойствами компонентов, таких, например, как фидстоки со связующим в виде смеси полимеров, одним из наиболее достоверных средств изучения эффективных термомеханических характеристик остаются определительные испытания. Для применяемых для изготовления деталей из аналогов стали 38ХМА (42CrMo4) фидстоков с двумя наиболее распространенными типами полимерного связующего в диапазоне температур от –20 до +125°C методом линейной дилатометрии определены температурные зависимости среднего коэффициента линейного теплового расширения. Полученные экспериментальные данные, дополненные точным пикнометрическим измерением плотности исследуемых материалов, позволили выполнить для каждого из них оценочный расчет температурной зависимости величины удельного объема. На основе рассчитанных зависимостей проведена сравнительная оценка значений свободной некомпенсируемой усадки фидстоков сравниваемых типов.

Ключевые слова: МІМ-технология; фидсток; дилатометрия; коэффициент теплового расширения; удельный объем; свободная усадка

**INVESTIGATION OF FREE SHRINKAGE OF THE MAIN TYPES
OF POWDER- POLYMER MIXTURES USED FOR MANUFACTURING
PARTS FROM ANALOGUES OF 38KHMA (42CRMO4) STEEL
BY THE MIM-METHOD**

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

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow state technical university (National Research University)», Moscow, Russia

ABSTRACT

The paper discusses one of the advanced technologies of powder metallurgy, effective for serial and mass production of both metal and ceramic small-sized precision parts with a complex geometric configuration – the technology «Powder Injection Moulding» (PIM), based on the use of powder-polymer mixture (feedstock) for injection molding under high pressure. When using PIM technology, the quality of the final sintered metal or ceramic part in successive technological stages depends on the quality of the initial molded semi-finished product – the casting from the particulate filled polymer composite material. The dimensional accuracy of a molded composite semi-finished product is largely determined by its uncompensated shrinkage upon cooling and extraction from the mold, in turn, the value of this shrinkage is determined by the value of the coefficient of thermal expansion, which for feedstock primarily depends on the composition and properties of the polymer binder used. In this paper, we briefly consider theoretical methods for calculating the thermal expansion of powder-polymer mixtures (feedstocks). It was noted that for materials with a complex structure and weakly deterministic properties of components, such as, for example, feedstocks with a binder in the form of a polymer blends, definitive tests remain one of the most reliable means of studying effective thermomechanical characteristics. For feedstocks used for manufacturing parts made from analogues of 38KHMA (42CrMo4) steel with the two most common types of polymeric binder the temperature dependences of the average coefficient of linear thermal expansion were determined by linear dilatometry in the temperature range from minus 20 to plus 125°C. The obtained experimental data, supplemented by an accurate pycnometric measurement of the density of the materials under study, made it possible to carry out for each of them an estimate calculation of the temperature dependence of the specific volume. As a result, based on the calculated dependencies, a comparative assessment of the values of free non-compensated shrinkage of feedstocks of compared types was made.

Keywords: MIM technology; feedstock; dilatometry; thermal expansion coefficient; specific volume; free shrinkage

ВВЕДЕНИЕ

Для производства малогабаритных точных металлических деталей со сложной геометрической конфигурацией весьма эффективными сегодня стали технологии аддитивного производства (AM – additive manufacturing) и инжекционного литья порошково-полимерных смесей (PIM – powder injection moulding). PIM-технология сочетает производительность «net-shape» репликации свойственной методу литья пластмасс под давлением с универсальностью процесса спекания шихты порошков требуемого состава и, как следствие, она является серьезным конкурентом многим традиционным металлургическим технологиям, включая субтрактивные технологии механообработки. В отличие от аддитивных технологий, PIM-технология перспективна именно для серийного производства точных деталей из широкого спектра конструкционных материалов: металлов, керамик, различных труднообрабатываемых материалов и композитов.

Широко используемая с 40-х годов прошлого столетия для производства керамических изделий, первоначально представленная в России как технология горячего литья под низким давлением твердых материалов [1] (позже получившая название LP PIM – low pressure PIM), на протяжении 50-ти лет не привлекавшая внимания металлургов, в 90-е годы PIM-технология получила развитие в виде

литья под высоким давлением заготовок деталей не только из керамик (СІМ), но и из металлов (МІМ). МІМ-технология инжекционного литья основана на использовании смеси металлического порошка и полимерного термопластичного связующего, называемой «фидстоком», последующем формовании изделия впрыском этой смеси (шликера) с тиксотропными свойствами в полость литейной формы и отверждением шликера под избыточным внешним давлением, извлечении отвержденной отливки (формируется близкая к чертежу «зеленая» деталь из полимерного дисперснонаполненного композиционного материала), удалении полимерного связующего («дебиндинг», при завершении которого из зеленой детали получается пористая порошковая «коричневая» деталь) с последующим спеканием пористой фасонной заготовки, в результате чего получается «готовая» деталь. После спекания готовая деталь, при необходимости, подвергается финишной механической и химико-термической обработке.

Сегодня в РІМ-технологии применяют два основных способа удаления полимерного связующего из композиционного полуфабриката – зеленой детали: каталитический и растворо-термический. Для названных способов дебиндинга используют различное оборудование и различные по составу полимерного связующего типы фидстоков. Существенное влияние на свойства фидстоков (шликеров) оказывает как полимерное связующее, так и дисперсный порошковый наполнитель. Для выбора оптимальных условий переработки фидстоков-шликеров необходимо изучение их реологических, теплофизических, термомеханических и других наиболее значимых свойств, определяющих технологичность формуемых материалов, – вязких неньютоновских структурируемых сред [2-5]. Исследование и сравнительный анализ характеристик фидстоков представляет интерес для технологов, однако информация о результатах таких исследований ограничена.

Цель проведенной работы состояла в исследовании влияния типа используемого связующего на величину свободной усадки формуемого полимерно-порошкового композиционного материала – фидстока.

1. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе для сравнительного исследования были выбраны два промышленных фидстока с наиболее распространёнными типами полимерного связующего. Оба фидстока имеют в своей основе приблизительно 62 об.% порошка хромомолибденовой стали зарубежных марок 42CrMo4 и 4140 (аналоги стали 38ХМА) с практически идентичным гранулометрическим составом (рис.1). Отличие фидстоков заключается в типе полимерной смеси связующего: фидсток МІМ-4140 изготовлен с использованием связующего, предназначенного для растворо-термического способа удаления, а фидсток Catamold 42CrMo4 – со связующим для каталитического способа удаления. Для фидстока МІМ-4140 со связующим растворо-термического типа используется воск-полиолефиновая полимерная смесь, а связующим в фидстоке Catamold 42CrMo4 каталитического типа является полиоксиметилен с малым количеством аддитивов.

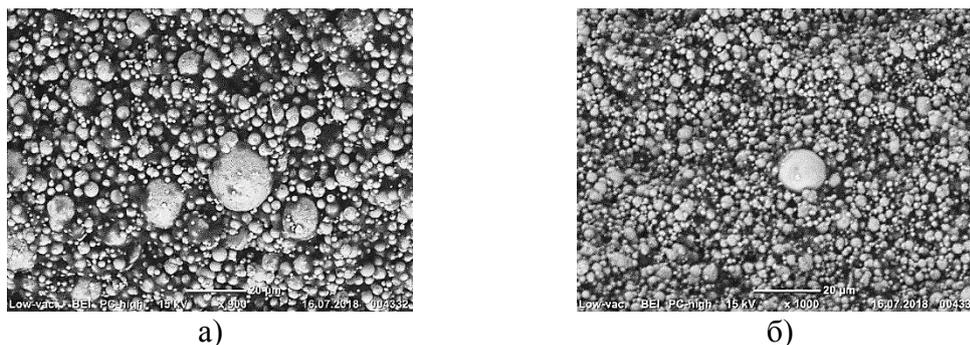


Рис.1. РЭМ-изображения микроструктуры порошково-полимерных смесей: а) – фидстока MIM-4140; б) – фидстока Catamold 42CrMo4.

Температуры фазовых переходов (Таблица 1) компонентов полимерных смесей связующего исследуемых фидстоков MIM-4140 и Catamold 42CrMo4 были определены методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Измерения проводились с темпом нагрева $H_R = 10$ К/мин в атмосфере аргона при скорости продувки измерительной ячейки 50 мл/мин по методике ГОСТ Р 55134-2012 (ИСО 11357-1:2009) на приборе ДСК «Netzsch DSC 204F1». Температуры, указанные в таблице 1 в скобках, определены по методу секущих; остальные температуры – исходя из производной теплового потока по температуре.

Таблица 1.

Температуры плавления компонентов связующего фидстоков.

Тип компонента полимерной смеси связующего фидстока	Воск в фидстоке MIM-4140	Полипропилен в фидстоке MIM-4140	Полиоксиметилен в фидстоке Catamold 42CrMo4
Характеристика			
Температура начала плавления T_{M1} , °С	47 (59)	123 (139)	116 (161)
Температура пика плавления T_{M2} , °С	66	151	166
Температура окончания плавления T_{M3} , °С	(74) 86	(160) 166	(173) 188

2. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ MIM-ФИДСТОКОВ

Основными факторами, влияющими на комплекс термомеханических характеристик фидстока, являются объёмная доля и распределение наполнителя, физико-химические взаимодействия на границах раздела фаз наполнитель-связующее, но главное, – тип используемого полимерного связующего. При расчетном определении эффективных термомеханических характеристик фидстоков, рассматривая их как дисперснонаполненные композиты, для них могут быть даны двусторонние верхние и нижние оценки [6-8]; например, в виде соотношений Хашина-Штрикмана и Фойгта-Рейсса [9-11]. Однако широта спектра возможных значений эффективных макрохарактеристик, определяемых в результате двусторонних оценок, сводит на нет их практическую ценность [11], а единственный путь сужения расчетной «вилки» состоит в конкретизации

геометрии взаимного расположения и формы областей, занимаемых составляющими композит фазами. Такой подход привел к появлению ряда частных аналитических расчетных зависимостей для конечного числа модельных структур, а также к появлению «прямых» вычислительных методов механики композитных сред, основанных на теории самосогласования и осреднения [10,12-14], которые благодаря развитию электронно-вычислительной техники сейчас получили свое практическое применение и реализованы в таких программных пакетах моделирования, как например, MSC.Digimat.

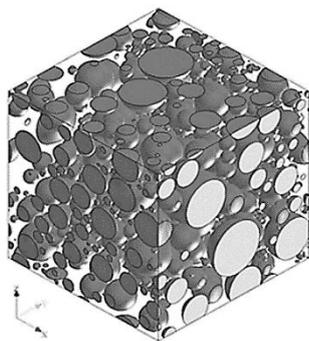


Рис.2. Модель представительного элемента объема фидстока, сгенерированная в программном пакете MSC.Digimat.

Модель представительного элемента объема фидстока (рис.2), полученная в программном пакете MSC.Digimat, позволяет достаточно точно воспроизвести распределение дисперсного наполнителя в реальных материалах, показанных на рис.1. Однако существенным недостатком для расчета является сложность моделирования материала со слабо детерминированной структурой многокомпонентной полимерной матрицы, чья морфология в зависимости от состава, температуры и деформаций может быть существенно различной: от суспензионной внедрения до инверсионной [15,16]. Кроме того, для такого расчета необходимо достаточно точно знать исходные характеристики компонентов композита. При этом, термомеханические характеристики полимеров в зависимости от типа и марки могут отличаться в разы. Одним из наиболее достоверных средств изучения эффективных термомеханических характеристик материалов со сложной структурой и слабо детерминированными свойствами компонентов остаются определительные испытания.

3. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ ММ-ФИДСТОКОВ

Измерение температурной зависимости коэффициента линейного теплового расширения (КЛТР) каждого из исследуемых фидстоков было проведено методом линейной дилатометрии [17] при помощи термомеханического анализатора «ТМА/SDTA 840» фирмы «Mettler Toledo». Измерения проводились в соответствии с методикой и требованиями ГОСТ 32618.2-2014 (ISO 11359-2:1999) при знакопостоянной нагрузке и изменении температуры с темпом 5 К/мин в атмосфере гелия при скорости продувки 70 мл/мин. Полученные температурные зависимости среднего (технического) КЛТР α_L фидстоков показаны на рис.3.

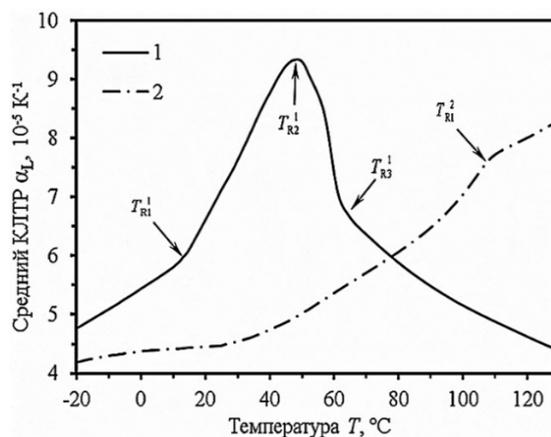


Рис.3. Экспериментальные температурные зависимости среднего КЛТР: 1 – фидстока ММ-4140 с воск-полиолефиновым связующим; 2 – фидстока Catamold 42CrMo4 со связующим на основе полиоксиметилена.

На экспериментальных зависимостях среднего КЛТР исследуемых фидстоков (рис.3) наглядно видны релаксационные процессы, обусловленные плавлением полимерных компонентов связующего. По экспериментальным данным линейной термодилатометрии установлено, что для фидстока ММ-4140 со связующим для растворно-термического способа удаления термомеханическая релаксация, связанная с плавлением воска в составе смеси связующего, наблюдается в диапазоне температур от $T_{R1}^1 = 13^\circ\text{C}$ до $T_{R3}^1 = 67^\circ\text{C}$ при максимуме интенсивности этого процесса при температуре $T_{R2}^1 = 52^\circ\text{C}$. При этом температуры, характеризующие плавление воска (таблица 1: температура начала $T_{M1}^1 = 47^\circ\text{C}$, конца $T_{M2}^1 = 86^\circ\text{C}$ и максимума интенсивности плавления $T_{M2}^1 = 66^\circ\text{C}$), отличны от данных термомеханического анализа. Данный факт, тем не менее, хорошо согласуется с представлениями о соотношении фазовых и физических состояний материалов и соотношении соответствующих температур плавления и деформационного размягчения [17-19]. Для фидстока Catamold 42CrMo4 со связующим каталитического типа в экспериментальном диапазоне температур зафиксировано лишь начало термомеханической релаксации при $T_{R1}^2 = 107^\circ\text{C}$, что связано с началом плавления полиоксиметилена при температуре $T_{M1}^2 = 116^\circ\text{C}$.

Следует подчеркнуть, что по порядку величины ($n \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$) средний КЛТР фидстоков обоих типов относительно велик. Данный факт связан с тем, что тепловое расширение металлов относительно мало и связано с ангармоничностью тепловых колебаний в кристаллической решетке, а тепловое расширение полимеров, напротив значительно, так как в основном определяется величиной свободного объема и изменением равновесных расстояний в молекулярной и надмолекулярной структуре. В результате, – коэффициент теплового расширения полимерно-порошкового композита (фидстока) преимущественно определяется тепловым расширением полимерной матрицы, что приводит к значимому изменению удельного объема и плотности всего фидстока даже при охлаждении горячей композиционной отливки до температуры производственного помещения. Мерой изменения объема материала при изменении температуры является коэффициент объемного термического расширения α_v , который связан с КЛТР

соотношением $\alpha_v \approx 3 \times \alpha_L$. Зависимость плотности и удельного объема твердого изотропного материала с постоянной массой при изменении температуры можно оценочно описать выражением (1), в котором $\rho_F(T_0)$ – плотность фидстока при температуре T_0 , а $v_F(T)$ – удельный объем фидстока.

$$\rho_F(T) \equiv \frac{1}{v_F(T)} \approx \frac{\rho_F(T_0)}{1 + \int_{T_0}^T 3 \cdot \alpha_L(T) dT} \quad (1)$$

В соответствии с методикой и требованиями ГОСТ Р 57844-2017 (ИСО 12154:2014) было проведено измерение плотности фидстоков при помощи пикнометра марки «G-DenPyc 2900» с пределом инструментальной погрешности $\pm 0,02\%$. Экспериментальные температурные зависимости КЛТР фидстоков (рис.3), а также результаты точного измерения их плотности пикнометрическим методом позволили на основе соотношения (1) выполнить для фидстоков, находящихся в отформованной «зеленой» детали в твердом состоянии, оценочный расчет зависимости их плотности и удельного объема от температуры (рис.4а).

Полученные зависимости, показанные на рис.4а, позволили оценить изменение объема материала зеленой детали при охлаждении до температуры производственного помещения $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Результаты такого оценочного расчета, представленные графически на рис.4б, показывают, что при охлаждении уже твердой отформованной композиционной заготовки (зеленой детали) до температуры производственного помещения T_0 , объем её материала уменьшается приблизительно на 1,5%, при этом величина этой свободной некомпенсируемой усадки в изученном диапазоне температур практически одинакова для двух сравниваемых типов фидстока с наиболее распространенными составами полимерного связующего.

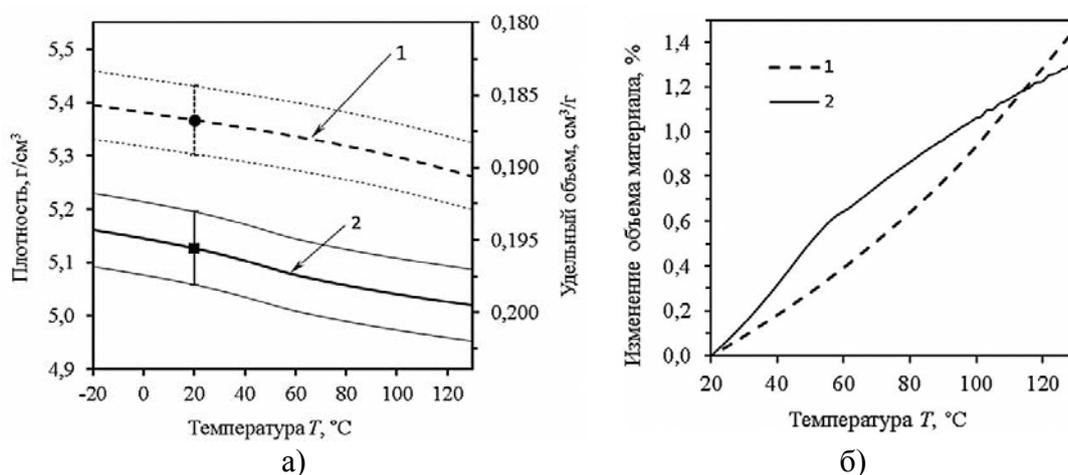


Рис.4. Температурные зависимости плотности (а) и (б) – относительного изменения удельного объема различных типов порошково-полимерных смесей: 1 – фидстока Catamold 42CrMo4; 2 – фидстока MIM-4140. Маркерами показаны результаты пикнометрических измерений плотности с соответствующими доверительными 3σ -интервалами.

Полученное оценочное значение свободной объемной усадки хорошо согласуется с результатами работы [20] и его можно считать предельным

значением некомпенсируемой усадки отливки для рассматриваемых фидстоков при их охлаждении в технологическом процессе до температуры производственного помещения. Величину некомпенсируемой усадки отливки следует учитывать при оценке бюджета погрешностей при производстве прецизионных деталей, обладающих повышенными требованиями к размерной точности [21].

ВЫВОДЫ

В результате исследования фидстоков с двумя различными наиболее распространёнными типами полимерного связующего (предназначенными для каталитического и растворо-термического способа удаления) в диапазоне температур от -20 до $+125^{\circ}\text{C}$ получены температурные зависимости среднего КЛТР и проведена оценка зависимости удельного объема от температуры.

Установлено, что в рассматриваемом диапазоне температур свободная объемная усадка фидстоков составляет приблизительно 1,5% и для двух сравниваемых фидстоков с наиболее распространенными типами (составами) полимерного связующего она практически одинакова. Непосредственно в процессе литья под давлением это приблизительное значение объемной усадки является некомпенсируемым для материала отливки, что связано с тем, что уплотнение и подпитка зеленой детали – отливки завершаются в момент перемерзания литниково-питающей системы при температуре нулевой жидкотекучести шликера. Для фидстока с воск-полиолефиновым связующим температура нулевой жидкотекучести, связанная с существенным повышением динамической вязкости, составляет $\approx 125^{\circ}\text{C}$ [22]. Для материала отливки, температура которого ниже температуры нулевой жидкотекучести в момент перемерзания литниково-питающей системы, некомпенсируемая объемная усадка будет соответственно меньше 1,5% (рис.4б). Это значение свободной объемной усадки при охлаждении до температуры производственного помещения можно считать предельным значением некомпенсируемой усадки отливки из рассматриваемых фидстоков.

Для комплексного сравнения и выбора оптимальных условий переработки различных типов фидстоков, представляется необходимым также изучение их реологических, теплофизических и других наиболее значимых свойств, определяющих технологичность формируемых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Medvedovski E., Peltsman M. *Low pressure injection moulding mass production technology of complex shape advanced ceramic components* // Applied Ceramics. – 2012. – Vol.111. – No.5-6. – Pp.333-344. DOI: 10.1179/1743676112Y.0000000025.
2. Семенов А.Б., Куцбах А.А., Голодец Д.Б., Муранов А.Н., Семенов Б.И. *Численное моделирование процесса литья под давлением при подготовке производства фасонных изделий методом инжекционного литья порошковых шликеров* / II Всеросс. науч.-технич. конф., посвященная юбилеям основателей кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана профессором С.Д. Пономарева, В.Л. Бидермана, К.К. Лихарева, Н.Н. Малинина, В.А. Светлицкого «Механика и математическое моделирование в технике». Сборник трудов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – С.423-426.
3. Тверской М.В., Хилкова А.А., Хилков Д.Э. *Исследование особенностей инжекционного литья металлических порошковых смесей* // Политехнический

- молодежный журнал. – 2018. – №11(28). – 8 с. DOI: 10.18698/2541-8009-2018-11-406.
4. Муранов А.Н., Семенов А.Б., Мараховский П.С., Чуцкова Е.Ю., Семенов Б.И. *Теплофизические свойства полимерно-порошковой смеси для изготовления деталей из стали 42CrMo4 методом инжекционного литья* // Перспективные материалы. – 2018. – №9. – С.24-32. DOI: 10.30791/1028-978X-2018-9-24-32.
 5. Khalil K.A. *Effect of thermo-mechanical properties of PIM feedstock on compacts shape retention during debinding process* // Transactions of nonferrous metals society of China. – 2001. – Vol.11. – No.4. – Pp.521-524.
 6. Kate K.H., Enneti R.K., Park S.-J., German R.M., Atre S.V. *Predicting powder-polymer mixture properties for PIM design* // Critical reviews in solid state and materials sciences. – 2014. – Vol.39. – No.3. – Pp.197-214. DOI: 10.1080/10408436.2013.808986.
 7. Bigg D.M. *Mechanical properties of particulate filled polymers* // Polymer composites. – 1987. – Vol.8. – No.2. – Pp.115-122. DOI: 10.1002/pc.750080208.
 8. Brassell G.W., Wischmann K.B. *Mechanical and thermal expansion properties of a particulate filled polymer* // Journal of materials science. – 1974. – Vol.9. – Pp.307-314. DOI: 10.1007/bf00550956.
 9. Hashin Z., Shtrikman S.A. *A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials* // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 1963. – Vol.11. – No.2. – Pp.127-140. DOI: 10.1016/0022-5096(63)90060-7.
 10. Победря Б.Е. *Механика композиционных материалов*. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. – 336 с.
 11. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. *Полимерные композиционные материалы: Научное издание*. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. – 352 с.
 12. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. *Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов*. – М.: Наука, 1997. – 288 с.
 13. Паньков А.А. *Методы самосогласования механики композитов*. – Пермь: Изд-во Перм. гос. ун-та, 2008. – 253 с.
 14. Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю. *Оценка температурного коэффициента линейного расширения композита с дисперсными анизотропными включениями методом самосогласования* // Механика композитных материалов. – 2016. – Т.52. – №2. – С.209-224.
 15. Липатов Ю.С. *Коллоидная химия полимеров*. – Киев: Наукова думка, 1984. – 344 с.
 16. Кулезнев В.Н. *Смеси и сплавы полимеров*. – СПб: Научные основы и технологии, 2013. – 216 с.
 17. Bair H.E., Akinay A.E., Menczel J.D., Prime R.B., Jaffe M. *Thermomechanical analysis (TMA) and thermodilatometry (TD) / Thermal analysis of polymers. Fundamentals and applications*. – New Jersey: John Wiley, 2009. – Pp.319-385. DOI: 10.1002/9780470423837.ch4.
 18. Brown M.E. *Thermomechanical analysis (TMA) / Introduction to thermal analysis*. – Dordrecht: Springer, 1988. – Pp.63-68. DOI: 10.1007/978-94-009-1219-9_7.
 19. Riga A.T. *Materials characterization by thermomechanical analysis*. – Philadelphia: ASTM, 1991. – 196 p.

20. Greene C.D., Heaney D.F. *The PVT effect on the final sintered dimensions of powder injection molded components* // Materials and Design. – 2007. – Vol.28. – Pp.95-100. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.05.023.
21. Фишер Д.М. *Усадка и коробление отливок из термопластов. Справочник.* – СПб.: Профессия, 2009. – 424 с.
22. Семенов А.Б., Куцбах А.А., Муранов А.Н., Семенов Б.И. *Разработка методики математического моделирования процесса литья под давлением полимеров, наполненных металлическими порошками* // Технология металлов. – 2019. – №1. – С.9-16. DOI: 10.31044/1684-2499-2019-1-0-9-16.

REFERENCES

1. Medvedovski E., Peltsman M. *Low pressure injection moulding mass production technology of complex shape advanced ceramic components*. Applied Ceramics, 2012, Vol.111, No.5-6, Pp.333-344. DOI: 10.1179/1743676112Y.0000000025.
2. Semenov A.B., Kutsbakh A.A., Golodets D.B., Muranov A.N., Semenov B.I. *Chislennoe modelirovanie protsessa lit'ya pod davleniem pri podgotovke proizvodstva fasonnykh izdelij metodom inzhetsionnogo lit'ya poroshkovykh shlikerov [Numerical modeling of the casting process under pressure in the preparation of faction products production by the method of injection casting of powder slickers]*. II Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Mekhanika i matematicheskoe modelirovanie v tekhnike", Sbornik trudov. Moskva, Izd-vo MGTU im. N.Eh. Baumana, 2017, Pp.423-426.
3. Tverskoi M.V., Khilkova A.A., Khilkov D.E. *Issledovanie osobennostej inzhetsionnogo lit'ya metallicheskiikh poroshkovykh smesey [Investigation of the features of injection molding of metal powder mixtures]*. Politekhnikeskij molodezhnyj zhurnal, 2018, No.11(28), 8 p. DOI: 10.18698/2541-8009-2018-11-406.
4. Muranov A.N., Semenov A.B., Marakhovskiy P.S., Chutskova E.Yu., Semenov B.I. *Teplofizicheskie svoystva polimerno-poroshkovej smesi dlya izgotovleniya detalej iz stali 42CrMo4 metodom inzhetsionnogo lit'ya [Thermophysical properties of polymer-powder mixture for manufacturing parts from 42CrMo4 steel by metal injection molding method]*. Perspektivnye materialy, 2018, No.9, Pp.24-32. DOI: 10.30791/1028-978X-2018-9-24-32.
5. Khalil K.A. *Effect of thermo-mechanical properties of PIM feedstock on compacts shape retention during debinding process*. Transactions of nonferrous metals society of China, 2001, Vol.11, No.4, Pp.521-524.
6. Kate K.H., Enneti R.K., Park S.-J., German R.M., Atre S.V. *Predicting powder-polymer mixture properties for PIM design*. Critical reviews in solid state and materials sciences, 2014, Vol.39, No.3, Pp.197-214. DOI: 10.1080/10408436.2013.808986.
7. Bigg D.M. *Mechanical properties of particulate filled polymers*. Polymer composites, 1987, Vol.8, No.2, Pp.115-122. DOI: 10.1002/pc.750080208.
8. Brassell G.W., Wischmann K.B. *Mechanical and thermal expansion properties of a particulate filled polymer*. Journal of materials science, 1974, Vol.9, Pp.307-314.
9. Hashin Z., Shtrikman S.A. *A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1963, Vol.11, No.2, Pp.127-140. DOI: 10.1016/0022-5096(63)90060-7.
10. Pobedrya B.E. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov [Mechanics of composite materials]*. Moskva, Izd-vo Mosk. un-ta, 1984, 375 p.

11. Bazhenov S.L., Berlin A.A., Kul'kov A.A., Oshmyan V.G. *Polimernye kompozitsionnye materialy: Nauchnoe izdanie [Polymer composite materials: Scientific publication]*. Dolgoprudnyj, Izdatel'skij Dom "Intellekt", 2010, 352 p.
12. Vil'deman V.E., Sokolkin Yu.V., Tashkinov A.A. *Mekhanika neuprugogo deformirovaniya i razrusheniya kompozitsionnykh materialov [Mechanics of inelastic deformation and fracture of composite materials]*. Moskva, Nauka, 1997, 288 p.
13. Pan'kov A.A. *Metody samosoglasovaniya mekhaniki kompozitov [Self-consistency methods for composites mechanics]*. Perm', Izd-vo Perm. gos. un-ta, 2008, 253 p.
14. Zarubin V.S., Kuvyrkin G.N., Savel'eva I.Y. *Evaluation of the linear thermal expansion coefficient of a composite with disperse anisotropic inclusions by the self-consistency method*. Mechanics of composite materials, 2016, Vol.52, No.2, Pp.143-154. DOI: 10.1007/s11029-016-9567-2.
15. Lipatov Yu.S. *Kollojdnyaya khimiya polimerov [Colloidal chemistry of polymers]*. Kiev, Naukova dumka, 1984, 344 p.
16. Kuleznev V.N. *Smesi i splavy polimerov [Polymer blends and alloys]*. Sankt-Peterburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2013, 216 p.
17. Bair H.E., Akinay A.E., Menczel J.D., Prime R.B., Jaffe M. *Thermomechanical analysis (TMA) and thermodilatometry (TD)*. In: Thermal analysis of polymers. Fundamentals and applications. New Jersey, John Wiley, 2009, Pp.319-385. DOI: 10.1002/9780470423837.ch4.
18. Brown M.E. *Thermomechanical analysis (TMA)*. In: Introduction to thermal analysis. Dordrecht, Springer, 1988, Pp.63-68. DOI: 10.1007/978-94-009-1219-9_7.
19. Riga A.T. *Materials characterization by thermomechanical analysis*. Philadelphia, ASTM, 1991, 196 p.
20. Greene C.D., Heaney D.F. *The PVT effect on the final sintered dimensions of powder injection molded components*. Materials and Design, 2007, Vol.28, Pp.95-100. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.05.023.
21. Fischer J. *Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage (Plastics Design Library)*. NY, William Andrew Pub., 2003, 263 p.
22. Semenov A.B., Kutsbakh A.A., Muranov A.N., Semenov B.I. *Razrabotka metodiki matematicheskogo modelirovaniya protsessa lit'ya pod davleniem polimerov, napolnennykh metallichesкими poroshkami [Development of methods for mathematical modeling of the process of injection molding polymers filled with metal powders]*. Tekhnologiya metallov, 2019, No.1, Pp.9-16. DOI: 10.31044/1684-2499-2019-1-0-9-16.

Поступила в редакцию 01 ноября 2018 года.

Сведения об авторах:

Муронов Александр Николаевич – инж., Межфакультетская лаборатория «Новые способы и технологии литья», ФГБОУ «МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: MuranovAlecs@mail.ru

Куцбах Анатолий Артурович – инж., Межфакультетская лаборатория «Новые способы и технологии литья», ФГБОУ «МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: akutsbakh@mail.ru

Семенов Алексей Борисович – к.т.н., доц., Кафедра «Литейные технологии», ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет, г. Москва, Россия; e-mail: semenov.ab@bk.ru

Семенов Борис Иванович – д.т.н., проф., Кафедра «Ракетно-космические композитные конструкции», ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: semenovbi@bmstu.ru