

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ В КЕРАМИЧЕСКИЕ ФОРМЫ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МОДЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКТОВ

© 2021 г. **К.В.Никитин<sup>1</sup>, Б.Н. Тукабайов<sup>1</sup>, В.Н. Дьячков<sup>1</sup>, В.И. Никитин<sup>1</sup>,  
В.Б. Деев<sup>2,3</sup>, А.Ю. Баринов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет (СамГТУ), г. Самара, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС», г. Москва, Россия

<sup>3</sup> Wenzhou Jinghe Intelligent Manufacturing Science & Technology Co., Ltd., Wenzhou, China

*Статья поступила в редакцию 05.06.21 г., подписана в печать 17.06.21 г.*

**Аннотация:** Выполнено исследование свободной линейной усадки образцов из филаментов марок PLA, HIPS и ABS, используемых для 3D-печати по FDM-технологии, в диапазонах рабочих температур экструзии ( $\Delta t$ ). Установлено, что при  $\Delta t = 200\div 220$  °С филамент марки PLA характеризуется значениями усадки в интервале 0,2–0,6 %. Филаменты HIPS ( $\Delta t = 220\div 240$  °С) и ABS ( $\Delta t = 240\div 270$  °С) имеют усадку 0,3–0,8 %. Значения линейных усадок необходимо учитывать при проектировании математических моделей будущего литого изделия. Изучено влияние плотности печати ( $d_p$  – степени заполнения внутренней структуры) на величину зольного остатка  $A$  при выжигании образцов, полученных из исследованных филаментов. Показано, что с повышением  $d_p$  (5–15–30 %) возрастает значение  $A$ . Минимальные значения  $A$  (0,19–0,48 %) имеет филамент марки PLA. Сделан вывод о том, что для 3D-печати моделей отливок по FDM-технологии для литья в огнеупорные керамические формы (ОКФ) по совокупности показателей свободной линейной усадки и зольного остатка наиболее технологичен филамент марки PLA. Средствами 3D-печати были изготовлены модельные блоки из филамента марки PLA по FDM-технологии для получения отливок типа «Патрубок» литьем в ОКФ. По модельным блокам были сформированы ОКФ. В процессе выжигания модельных блоков из ОКФ установлено, что при линейном нагреве происходит растрескивание части ОКФ. Это обусловлено избыточным давлением расширяющегося филамента в процессе нагрева до температуры его размягчения, а также давлением газа, образующегося при последующем выжигании филамента. С увеличением скорости нагрева доля треснувших ОКФ возрастала. С целью предотвращения растрескивания разработан ступенчатый режим нагрева ОКФ, совмещенный с их прокалкой. При удалении модельных блоков по ступенчатому режиму растрескивания ОКФ не происходило. Из бронзы марки БрА9ЖЗЛ были получены опытные отливки типа «Патрубок». Качество отливок соответствовало требованиям конструкторской документации.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, филамент, FDM-технология, литье по разовым моделям, свободная линейная усадка, зольный остаток, огнеупорная керамическая форма.

**Никитин К.В.** – докт. техн. наук, проф., декан факультета машиностроения, металлургии и транспорта СамГТУ (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244). E-mail: kvn-6411@mail.ru.

**Тукабайов Б.Н.** – ассистент кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ. E-mail: tubot@mail.ru.

**Дьячков В.Н.** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ. E-mail: dyachkow@list.ru.

**Никитин В.И.** – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ. E-mail: tlp@samgtu.ru.

**Деев В.Б.** – докт. техн. наук, проф., гл. науч. сотр. лаборатории «Ультрамелкозернистые металлические материалы», проф. кафедры «Обработка металлов давлением» НИТУ «МИСиС» (119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 4); гл. эксперт Wenzhou Jinghe Intelligent Manufacturing Science & Technology Co., Ltd. (Ouhai Economic Development Zone, 38 Dongfang South Road, Wenzhou, 325006, Zhejiang, China). E-mail: deev.vb@mail.ru.

**Баринов А.Ю.** – вед. инженер кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ. E-mail: tlp@samgtu.ru.

**Для цитирования:** Никитин К.В., Тукабайов Б.Н., Дьячков В.Н., Никитин В.И., Деев В.Б., Баринов А.Ю. Совершенствование процесса литья в керамические формы за счет применения аддитивных технологий при изготовлении модельных комплектов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021. Т. 27. No. 5. С. 58–66.

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-5-58-66.

## Improving the process of casting into ceramic molds using additive technologies for cluster manufacturing

K.V. Nikitin<sup>1</sup>, B.N. Tukabajov<sup>1</sup>, V.N. D'yachkov<sup>1</sup>, V.I. Nikitin<sup>1</sup>, V.B. Deev<sup>2,3</sup>, A.Yu. Barinov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Samara State Technical University, Samara, Russia

<sup>2</sup> National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia

<sup>3</sup> Wenzhou Jinghe Intelligent Manufacturing Science & Technology Co., Ltd., Wenzhou, China

Received 05.06.2021, accepted for publication 17.06.2021

**Abstract:** The study covers the free linear shrinkage of samples from PLA, HIPS, and ABS filaments used for FDM 3D printing in the ranges of extrusion operating temperatures ( $\Delta t$ ). It was found that the PLA filament features by shrinkage values in the range of 0.2–0.6 % at  $\Delta t = 200\text{--}220$  °C. HIPS filaments ( $\Delta t = 220\text{--}240$  °C) and ABS filaments ( $\Delta t = 240\text{--}270$  °C) have a shrinkage of 0.3–0.8 %. Linear shrinkage values must be taken into account when designing mathematical models of the future cast product. The influence of the print density  $d_p$  (degree of internal structure filling) on the ash residue  $A$  when burning out samples obtained from the studied filaments was investigated. It was shown that the  $A$  value also increases with an increase in  $d_p$  (5–15–30 %). The PLA filament has minimum  $A$  values (0.19–0.48 %). It was concluded that the PLA filament features the highest processability in the FDM 3D printing of casting patterns for casting into refractory ceramic molds (RCM) in terms of the set of free linear shrinkage and ash residue indicators. Clusters were made by FDM 3D printing from the PLA filament to produce «Nozzle» castings by casting into RCMs. Clusters were used to form RCMs. When burning out the clusters from RCMs, it was found that some RCMs cracked under linear heating. This was due to excessive pressure exerted by the expanding filament when heated to its softening temperature, and pressure exerted by gas emitted during the subsequent filament burn-out. The proportion of cracked RCMs increased with an increase in the heating rate. A stepwise mode of RCM heating combined with RCM calcination was developed in order to prevent cracking. There was no RCM cracking when clusters were removed in the stepwise mode. Experimental «Nozzle» castings were obtained from BrA9ZH3L bronze. The casting quality met the design documentation requirements.

**Keywords:** additive technologies, filament, FDM technology, lost-wax casting, free linear shrinkage, ash residue, refractory ceramic mold.

**Nikitin K.V.** — Dr. Sci. (Eng.), prof., dean of the Faculty of mechanical engineering, metallurgy and transport, Samara State Technical University (SSTU) (443100, Russia, Samara, Molodogvardeiskaya str., 244). E-mail: kvn-6411@mail.ru.

**Tukabajov B.N.** — assistant, Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU. E-mail: tubot@mail.ru.

**D'yachkov V.N.** — Cand. Sci. (Eng.), associate prof., Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU. E-mail: dyachkov@list.ru.

**Nikitin V.I.** — Dr. Sci. (Eng.), prof., head of the Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU. E-mail: tlp@samgtu.ru.

**Deev V.B.** — Dr. Sci. (Eng.), prof., chief researcher of the Laboratory «Ultrafine-grained metallic materials», prof. of the Department of metal forming of National University of Science and Technology «MISIS» (119049, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4); chief expert of Wenzhou Jinghe Intelligent Manufacturing Science & Technology Co., Ltd. (Ouhai Economic Development Zone, 38 Dongfang South Road, Wenzhou, 325006, Zhejiang, China). E-mail: deev.vb@mail.ru.

**Barinov A.Yu.** — lead engineer, Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU. E-mail: tlp@samgtu.ru.

**For citation:** Nikitin K.V., Tukabajov B.N., D'yachkov V.N., Nikitin V.I., Deev V.B., Barinov A.Yu. Improving the process of casting into ceramic molds using additive technologies for cluster manufacturing. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2021. Vol. 27. No. 5. P. 58–66 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-5-58-66.

## Введение

Для получения отливок с высокой размерной точностью в мировой практике широко применяется способ литья в огнеупорные керамические формы (ОКФ) [1, 2]. Согласно классическому определению, к нему относится получение отливок в многослойных, оболочковых, неразъемных разовых формах, которые изготавливают по разовым (выплавленным, выжигаемым, растворяемым и т.д.) моделям [3–5].

Литье по выплаваемым (выжигаемым) моделям характеризуется многостадийностью тех-

нологического процесса. Наиболее сложным и трудоемким является этап изготовления моделей, модельной оснастки и комплектов. Качество литых изделий (шероховатость поверхности, геометрическая точность) во многом зависит от качества разовых моделей, которое, в свою очередь, определяется свойствами используемых модельных составов, сложностью конструкции моделей и технологиями их получения.

Наиболее эффективным инструментом для снижения себестоимости подготовки производ-

ства, сокращения сроков изготовления и повышения качества моделей является интеграция технологий аддитивного производства (АП) с традиционными литейными технологиями [6, 7]. Технологии АП за сравнительно короткое время стали самостоятельной цифровой индустрией и все активнее внедряются в различные отрасли промышленности [8–10].

В настоящее время известно достаточно много различных технологий аддитивного производства и материалов для их реализации [11]. Однако для изготовления моделей и модельной оснастки при получении литых изделий литьем по разовым моделям из всего многообразия АП можно выделить три вида технологий: стереолитография (SLA), селективное лазерное сплавление (SLS) и моделирование послойной наплавкой (FDM) [12]. SLS-технология реализуется за счет послойного спекания частиц порошковых материалов под воздействием лазерного источника излучения [11–14]. Изготовление изделий по SLA-технологии заключается в послойном отверждении фоточувствительной смолы под воздействием ультрафиолетового излучения [15]. Моделирование послойной наплавкой (FDM-технология) осуществляется за счет осаждения нити расплавленного материала на подложку с помощью подвижной головки [15, 16]. Геометрия получаемого изделия реализуется в соответствии с математической (цифровой) моделью, созданной с применением CAD/CAE систем [16–18].

К материалам, используемым в АП, и моделям, получаемым средствами АП, предъявляется ряд требований, схожих с традиционными технологиями для изготовления разовых моделей: низкие свободная линейная усадка при затвердевании, коэффициент теплового линейного расширения и процент зольности при удалении моделей из огнеупорных керамических форм. Параметры 3D-печати должны обеспечивать требуемый уровень шероховатости, предъявляемый к конечному литому изделию. Кроме того, должна обеспечиваться оптимальная технологическая прочность моделей, получаемых средствами АП, при минимальных расходе материала и времени 3D-печати [6, 17, 19–22].

В научных публикациях уделяется недостаточно внимания систематизированному подходу в исследованиях по влиянию вида технологий 3D-печати, материалов и параметров 3D-печати на качество моделей и литых изделий, получаемых литьем в огнеупорные керамические формы.

Целью работы являлись исследования<sup>1</sup> свойств полимерных материалов, используемых для реализации FDM-технологий, и влияния параметров 3D-печати на качество моделей и литых изделий, получаемых литьем в огнеупорные керамические формы.

## Материалы и методика экспериментов

В работе использовали полимерные материалы, применяемые в FDM-технологиях аддитивного производства, на основе полилактида, акрилонитрил бутадиен стирола и ударопрочного полистирола (компания «FDPlast», г. Москва) в виде пруткового филамента. Свойства филаментов в состоянии поставки представлены в табл. 1

Свободную линейную усадку ( $\alpha$ , %) при затвердевании филаментов после экструзии из сопла печатающей головки исследовали по следующей методике. На 3D-принтере «Designer XPro» (компания «PICASO 3D», г. Зеленоград) печатали образцы в форме правильного параллелепипеда с заполнением внутренней структуры 100 % (размеры математической модели 10×10×150 мм), варьируя температуру экструзии внутри рабочего диапазона (см. табл. 1). После окончания печати и выдержки в течение 1 ч образцы отделяли от рабочего стола принтера и производили измерение их фактической длины, используя электронный штангенциркуль модели «Qstexpress» (точность прибора 0,01 мм; компания «QSTEXPRESS-09», Китай).

Свободную линейную усадку образцов определяли по уравнению

$$\alpha = [(L_{\text{п}} - L)/L_{\text{п}}] \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $L_{\text{п}}$  = 150 мм — длина математической модели образца;  $L$  — фактическая длина образца, мм.

С целью определения зольного остатка ( $A$ , %) в условиях прямого выжигания моделей из огнеупорной керамической формы разработали тестовый образец (рис. 1), имеющий следующие конструктивные особенности: наличие поверхностей, охватываемых керамической оболочкой и охватывающих ее; наличие радиусов скруглений и острых углов на образце для оценки напряжений в керамической оболочке. Образцы получали

<sup>1</sup> Исследования выполнены в Центре литейных технологий СамГТУ.

Таблица 1. Свойства филаментов для FDM-технологии в состоянии поставки

Table 1. Properties of filaments for FDM technology in as-delivered state

| Марка                              | Рабочий диапазон температуры экструзии, °C | Температура размягчения, °C | Линейная усадка при затвердевании, % | Прочность, МПа |               | Плотность, г/см <sup>3</sup> |
|------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|----------------|---------------|------------------------------|
|                                    |                                            |                             |                                      | на изгиб       | на растяжение |                              |
| PLA (полилактид)                   | 200–220                                    | 50                          | Отсутствует                          | 94,2           | 34,8          | 1,23–1,25                    |
| ABS (акрилонитрил бутадиен стирол) | 240–270                                    | 103                         | 0,4–0,7                              | 65,4           | 29,6          | 1,02–1,08                    |
| HIPS (ударопрочный полистирол)     | 220–235                                    | 96                          | до 0,8                               | 37,6           | 16,4          | ~1,05                        |

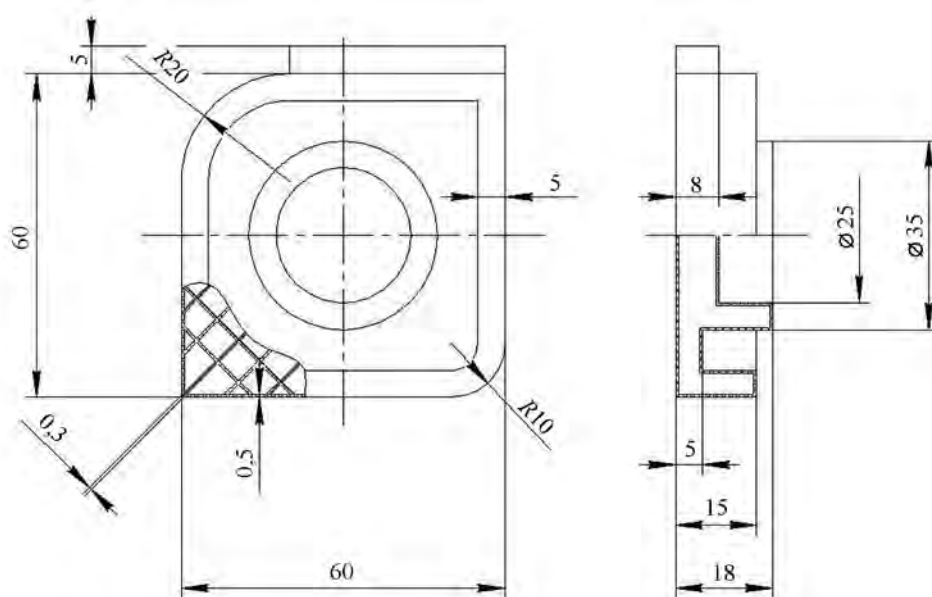


Рис. 1. Конструкция тестового образца, получаемого средствами аддитивного производства, для определения зольного остатка в огнеупорной керамической форме в условиях прямого выжигания

Fig. 1. Design of a test sample obtained by additive production means for determining ash residue in a refractory ceramic mold under direct burn-out conditions

с плотностью печати (степенью заполнения внутренней структуры)  $d_p = 5, 15$  и  $30\%$ .

На моделях, полученных средствами АП, послойно формировали огнеупорную керамическую форму (ОКФ). Для ее изготовления применяли плавный кварц «Экосил-Мелур» (ТУ 5931-002-71435339-2004, РФ), а в качестве связующего — «Сиалит-20С» (ТУ 2145-003-438/1938-97, РФ). При изготовлении ОКФ на модели наносили 5 слоев покрытия с обсыпкой, 6-й слой (закрепляющий) формировали без обсыпки. Размер фракции огнеупорного материала в первом слое составлял 0,2 мм, во втором и последующих — 0,4 мм. Облицовочный (первый) слой сушили 4 ч, последующие слои подвергали сушке в течение 2 ч при комнат-

ной температуре. Выжигание модельных блоков из ОКФ осуществляли в прокалочной муфельной печи модели ПС 51.41.52 (компания «ЮВИН», г. Москва), затем оценивали зольный остаток в форме, количество целых и разрушенных форм.

Отливки получали из бронзы марки БрА9ЖЗЛ (табл. 2).

Для приготовления бронзы марки БрА9ЖЗЛ использовались следующие шихтовые материалы:

- медь первичная М1 в виде прутков (ГОСТ 495-92);
- отходы меди электротехнической (ГОСТ 1639-2009);
- таблетированная лигатура Fe80Ф20;
- алюминий марки АД1 (ГОСТ 4784-97);

Таблица 2. Химический состав сплава БрА9ЖЗЛ (ГОСТ 493-79)

Table 2. Chemical composition of the BrA9ZhZL alloy (GOST 493-79)

| Легирующие элементы, % |         | Примеси, не более, % |      |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------------|---------|----------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Al                     | Fe      | As                   | Sb   | Sn  | Si  | Ni  | Pb  | P   | Mn  | Zn  |
| 8,0–10,5               | 2,0–4,0 | 0,05                 | 0,05 | 0,2 | 0,2 | 1,0 | 0,1 | 0,1 | 0,5 | 1,0 |

— лигатура медь—фосфор марки МФ1, МФ2 (ГОСТ 4515-93);

— возврат собственного производства.

Шлакообразующие материалы включали:

— карбюризатор древесноугольный, ГОСТ 2407-83;

— рафинирующие таблетки «Дегазер».

Приготовление сплава осуществляли на установке индукционной плавильной УИП 16-10-0,01 (компания «РЭЛТЕК», г. Екатеринбург) в графитовом тигле емкостью по меди 30 кг.

## Результаты экспериментов и их обсуждение

### Определение свободной линейной усадки ( $\alpha$ ) и величины зольного остатка ( $A$ ) филаментов разных марок

Влияние температуры экструзии на свободную линейную усадку образцов из филаментов различных марок показано на рис. 2. Видно, что наименьшими значениями  $\alpha$  (0,2–0,6) в рабочем диапазоне температур экструзии характеризуется филамент марки PLA. Филаменты марок HIPS и ABS в своих интервалах  $\Delta t$  обладают значениями  $\alpha = 0,3 \div 0,8$ . Большинство производителей филамента марки PLA отмечают в сопроводительной документации, что данный пластик не обладает усадкой в процессе затвердевания. Значения  $\alpha$  филаментов марок HIPS и ABS в целом укладываются в диапазоны, указываемые производителями. Из практики известно, что более высокие температуры экструзии назначают при печати габаритных моделей. Результаты эксперимента свидетельствуют, что с увеличением температуры экструзии значения  $\alpha$  имеют тенденцию к росту. Это необходимо учитывать при проектировании математической модели литого изделия.

Влияние плотности печати на величину зольного остатка филаментов различных марок представлено на рис. 3. Видно, что минимальным значением  $A$  в диапазоне исследованных плотностей

печати характеризуется филамент марки PLA, максимальным — ABS.

Наличие зольного остатка в огнеупорных керамических формах после выжигания моделей может обуславливать возникновение таких дефектов литого изделия, как неслитина, спай, нарушение геометрии. Во избежание их возникновения на практике используют повышенные температуры выжигания моделей из ОКФ, а также продувку или промывание ОКФ после выжигания моделей. Таким образом, по совокупности значений  $\alpha$  и  $A$  наиболее технологичным для из-

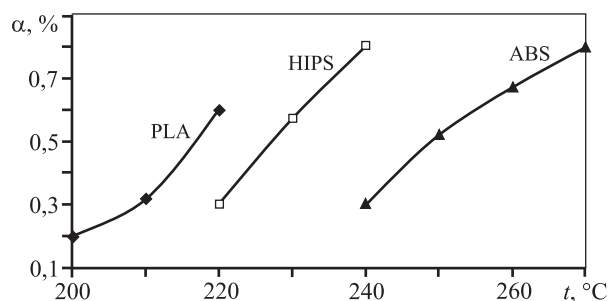


Рис. 2. Влияние температуры экструзии на свободную линейную усадку образцов

Fig. 2. Effect of extrusion temperature on free linear shrinkage of samples

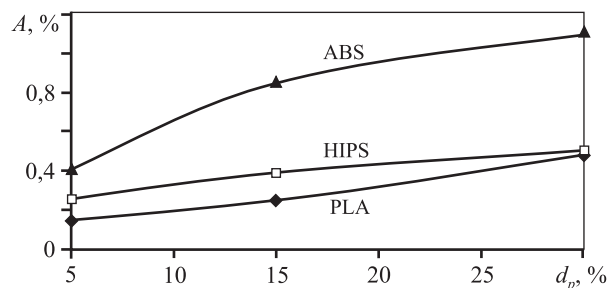


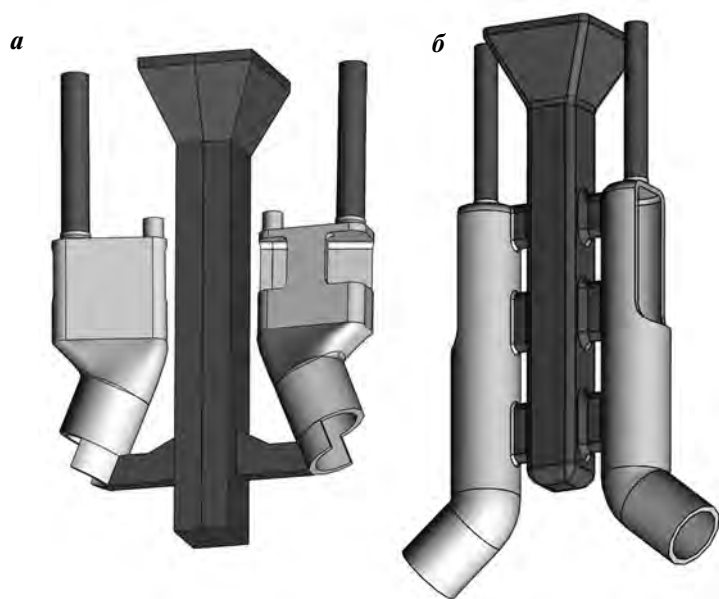
Рис. 3. Влияние плотности печати ( $d_p$ ) на величину зольного остатка ( $A$ ) образцов из филаментов различных марок

Fig. 3. Effect of print density ( $d_p$ ) on ash residue ( $A$ ) values of samples made of different filament grades

готовления выжигаемых моделей является филамент марки PLA.

Далее исследовали влияние технологии выжигания модельных блоков для получения отливок «Патрубок-1» и «Патрубок-2» (табл. 3) на целостность

ОКФ. При проектировании математических моделей учитывали свободные линейные усадки филамента при температуре экструзии 210 °С (0,32 %) и бронзы марки БрА9ЖЗЛ (2,49 %). Математические модели модельных блоков представлены на рис. 4.

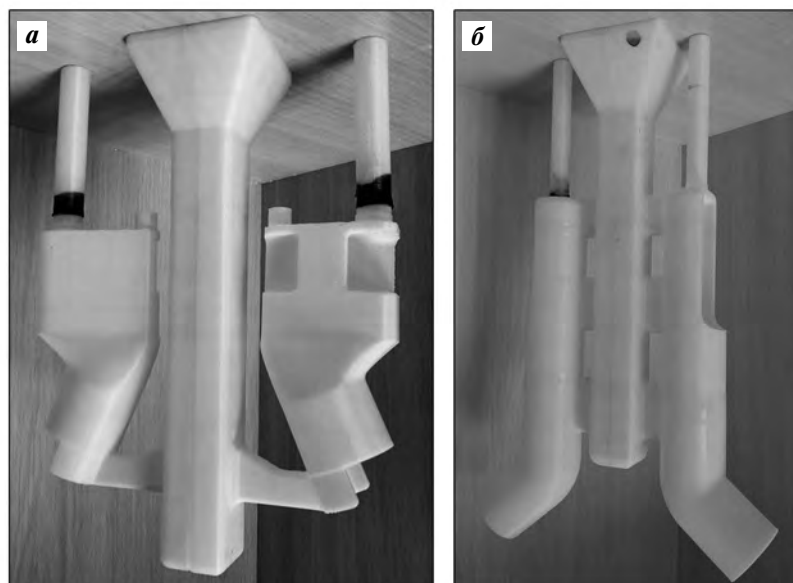


**Рис. 4.** Математические модели модельных блоков

*a* – «Патрубок-1»; *б* – «Патрубок-2»

**Fig. 4.** Mathematic models of clusters

*a* – «Nozzle-1»; *б* – «Nozzle-2»



**Рис. 5.** Готовые модельные блоки

*a* – «Патрубок-1»; *б* – «Патрубок-2»

**Fig. 5.** Finished clusters

*a* – «Nozzle-1»; *б* – «Nozzle-2»

Таблица 3. Технологические особенности моделей отливок и модельных блоков

Table 3. Processing features of casting patterns and clusters

| Наименование отливки | Максимальные габаритные размеры отливок (Д×В×Ш), мм | Количество моделей в модельном блоке, шт. |
|----------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Патрубок-1           | 100×70×35                                           | 2                                         |
| Патрубок-2           | 240×65×40                                           | 2                                         |

Таблица 4. Параметры печати моделей

Table 4. Pattern printing parameters

| Объект печати  | Высота слоя, мм | Плотность печати, % | Тип заполнения |
|----------------|-----------------|---------------------|----------------|
| Модель отливки | 0,2             | 5                   | Зигзаг         |
| Модель ЛПС     | 0,5             | 5                   | Зигзаг         |

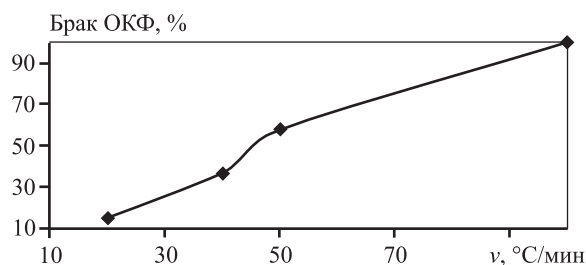


Рис. 6. Влияние скорости нагрева на долю треснувших ОКФ

Fig. 6. Effect of heating rate on the proportion of cracked refractory ceramic molds

Печать моделей отливок и элементов литниково-питающей системы (ЛПС) производили отдельно. Модельные блоки получали склейкой элементов. Параметры печати приведены в табл. 4, готовые модельные блоки — на рис. 5. С целью облегчения выхода продуктов, образующихся при выжигании модельных блоков из ОКФ, в конструкции модельных блоков предусмотрели специальные технологические каналы-венты, располагающиеся на торцах моделей отливок.

В процессе выжигания модельных блоков из ОКФ было установлено следующее. При линейном нагреве происходило растрескивание части

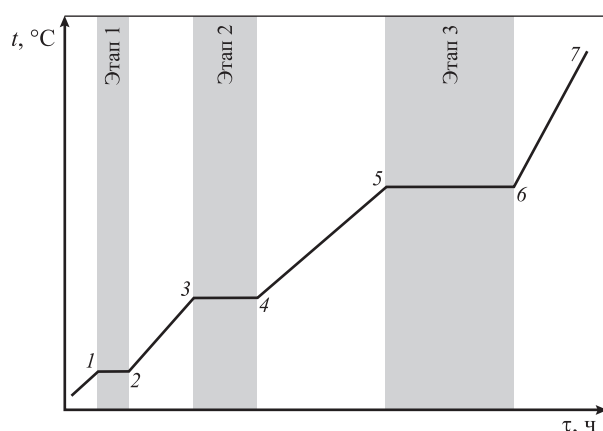


Рис. 7. Схема ступенчатого выжигания модельного блока, совмещенного с прокалкой ОКФ

1–2 – загрузка ОКФ; 2–3 – предварительный нагрев; 3–4 – удаление массовой части модельного блока через расплавление; 5–6 – выжигание остаточной доли модельного блока; 6–7 – нагрев под прокалку ОКФ

Fig. 7. Diagram of stepwise cluster burning-out combined with refractory ceramic mold calcination

1–2 – refractory ceramic mold loading; 2–3 – preheating; 3–4 – removing the mass part of the cluster by melting; 5–6 – burning-out the residual part of the cluster; 6–7 – heating for refractory ceramic mold calcination

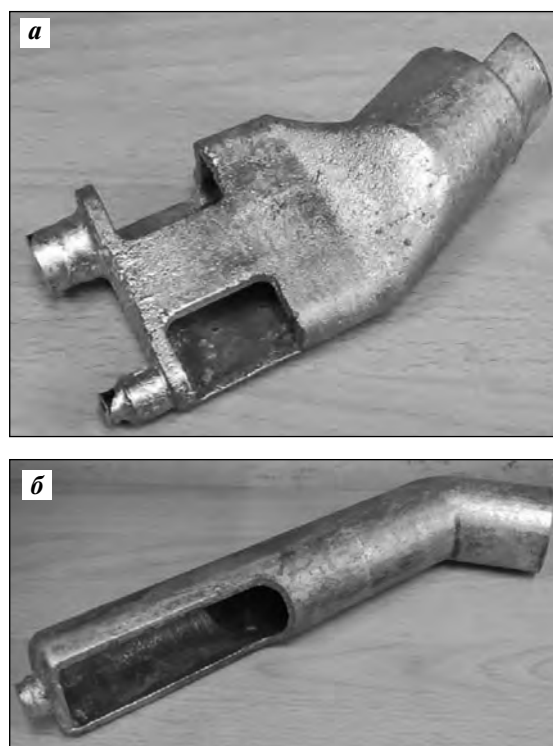


Рис. 8. Опытные отливки из бронзы марки БрА9ЖЗЛ

a – отливка «Патрубок-1»; б – отливка «Патрубок-2»

Fig. 8. BrA9ZhZL bronze test castings

a – «Nozzle-1» casting; б – «Nozzle-2» casting

ОКФ, обусловленное избыточным давлением расширяющегося филамента в процессе нагрева до температуры его размягчения и давлением газа, образующегося при последующем выжигании филамента. Причем с увеличением скорости нагрева доля треснувших ОКФ возрастала (рис. 6).

С целью обеспечения целостности ОКФ разработали ступенчатый режим их нагрева, включающий процессы удаления модельных блоков через их расплавление, газификацию и совмещенный с прокалкой ОКФ. Схема ступенчатого нагрева ОКФ представлена на рис. 7. Прокалка по разработанному ступенчатому режиму обеспечила 100 % целых ОКФ.

Заливку расплава производили в прокаленные ОКФ, имеющие температуру  $850 \pm 50$  °С. Отливки выдерживали в ОКФ в течение 1 ч. На рис. 8 представлены опытные отливки, которые не имели поверхностных дефектов, а их геометрические размеры и шероховатость поверхности соответствовали требованиям конструкторской документации.

## Выводы

На основании выполненных исследований установлено следующее.

1. Исследованные филаменты марок PLA, HIPS и ABS имеют различный уровень свободной линейной усадки ( $\alpha$ ) в диапазонах рабочих температур экструзии. Минимальными значениями  $\alpha = 0,2 \div 0,6$  в интервале рабочих температур экструзии  $\Delta t = 200 \div 220$  °С характеризуется филамент марки PLA. При создании математических моделей необходимо учитывать величину  $\alpha$  для обеспечения геометрической точности будущего литого изделия.

2. Величина зольного остатка ( $A$ ), образующегося в процессе выжигания моделей из ОКФ, зависит от плотности печати ( $d_p$ ). Минимальные значения  $A$  в зависимости от  $d_p$  (5–15–30 %) имеет филамент марки PLA: 0,19–0,25–0,48 соответственно.

3. Для предотвращения растрескивания огнеупорных керамических форм необходимо применять ступенчатый режим выжигания модельных блоков, совмещенный с процессом прокаливания ОКФ. Разработанный ступенчатый режим нивелирует негативное влияние расширяющегося при нагреве филамента и давления газов, образующихся в процессе выжигания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проектной части государственного задания № 0778-2020-0005.

**Acknowledgments:** The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the project part of Government Task No. 0778-2020-0005.

## Литература/References

1. Kumar Nayak R., Venugopal S. Prediction of shrinkage allowance for tool design of aluminium alloy (A356) investment casting. *Mater. Today: Proc.* 2018. Vol. 5. No. 11. P. 24997–25005.
2. Sabau A.S., Viswanathan S. Material properties for predicting wax pattern dimensions in investment casting. *Mater. Sci. Eng. A.* 2003. Vol. 362. No. 1-2. P. 125–134.
3. Ефимов В.А. Специальные способы литья: Справочник. М.: Машиностроение, 1991. *Efimov V.A. Special methods of casting: Handbook. Moscow: Mashinostroyeniye, 1991 (In Russ.).*
4. Иванов В.Н. Литье по выплавляемым моделям: 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1984. *Ivanov V.N. Investment casting. Moscow: Mashinostroyeniye, 1984 (In Russ.).*
5. Пенях С.И. Требования к модельным составам отливок ответственного назначения. *Металлы и литье Украины.* 2010. No. 11. С. 10–16. *Ropyakh S.I. Requirements for modeling composition of castings for critical applications. Metally i lit'e Ukrainy.* 2010. No. 11. P. 10–16 (In Russ.).
6. Altaf K., Rani A.M.A., Woldemichael D.E., Lemma T.A., Zhi C. Application of additive manufacturing/3D printing technologies and investment casting for rototype development of polycrystalline diamond compact (PDC) drill bit body. *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* 2016. Vol. 11. No. 10. P. 6514–6518.
7. Vidyarthee G., Gupta N. New development in investment casting process: A review. *Int. J. Sci. Eng. Res.* 2017. Vol. 8. Iss. 12. P. 529–540.
8. Bourell D.L., Beaman J.J., Wohlers T., Frazier W., Kuhn H., Seifi M. History of additive manufacturing. In: *Additive Manufacturing Processes.* ASM International, 2020. Vol. 24. P. 1–8.
9. Hopkinson N., Hague R.J.M., Dickens P.M. Rapid manufacturing an industrial revolution for the digital age. N.Y.: J. Wiley & Sons, Ltd. 2006.
10. Attaran M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons.* 2017. Vol. 60. Iss. 5. P. 677–688.
11. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of ma-



- materials, methods, applications and challenges. *Compos. B: Eng.* 2018. Vol. 143. No. 15. P. 172—196.
12. Choudhari C.M., Patil V.D. Product development and its comparative analysis by SLA, SLS and FDM rapid prototyping processes. In: *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* Vol. 149. Art. 012009 (IconAMMA-2016, Bangalore, India, 14—16 July 2016).
13. Kruth Jean-Pierre, Wang X., Laoui Tahar, Froyen L. Lasers and materials in selective laser sintering. *Int. Product Proc. Develop.* 2002. No. 1. P. 175—198.
14. Hyub Lee, Chin Huat Joel Lim, Mun Ji Low, Young-Jin Kim. Lasers in additive manufacturing: A review. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Tech.* 2017. No. 4. P. 307—322.
15. Guo N., Leu Ming C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Front. Mech. Eng.* 2013. No. 3. P. 215—243.
16. Dudek P. FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements. *Arch. Metall. Mater.* 2013. Vol. 58. Iss. 4. P. 1415—1418.
17. Cheah C.M., Chua C.K., Lee C.W., Feng C., Totong K. Rapid prototyping and tooling techniques: A review of applications for rapid investment casting. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2005. Vol. 25. No. 3—4. P. 308—320.
18. Bikas H., Stavropoulos P., Chrysosolouris G. Additive manufacturing methods and modeling approaches: A critical review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. Vol. 83. P. 389—405.
19. Khurram Altaf, Ahmad Majdi Abdul Rani, Dereje E. Wolde-michael, Tamiru A. Lemmal, Chou Zhi Jian, Muhd Helmie Figri. Application of additive manufacturing/3D printing technologies and investment casting for prototype development of polycrystalline diamond compact (PDC) drill bit body. *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* 2016. Vol. 11. No. 10. P. 6514—6518.
20. Bricín D., Votava F., Kubátová D., Kříž A. Influence of the quality of models made by additive technologies on the quality of castings cast by investment casting. In: *Intelligent manufacturing & automation: Proc. 31st Intern. DAAAM Virtual Symp. (Vienna, Austria, 21—24 Oct. 2020)*. Vienna: DAAAM International, 2020. Art. 0467.
21. Han D.P., Gu X., Pan B.T., Feng W.G., Wang M.H. Rapid casting of casing based on rapid prototyping technology. *Foundry.* 2013. No. 62. P. 658—660, 665.
22. Pattnaik S., Kumar Jha P., Karunakar D.B. A review of rapid prototyping integrated investment casting processes. *Proc. Inst. Mech. Eng. Pt. L: J. Mater. Design Appl.* 2013. Vol. 228. No. 4. P. 249—277.