



УДК 621.77.04
DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-139-144

Поступила 09.08.2018
Received 09.08.2018

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭКСТРУЗИОННОЙ 3D-ПЕЧАТИ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

*Н. К. ТОЛОЧКО, А. А. АНДРУШЕВИЧ, П. Н. ВАСИЛЕВСКИЙ, П. С. ЧУГАЕВ, Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 99/2.
E-mail: n.tolochko@hotmail.com, andru49@mail.ru*

Выполнен краткий обзор аддитивных технологий, используемых для изготовления литейной формообразующей оснастки. Рассмотрены особенности применения технологии экструзионной 3D-печати для изготовления литейной формообразующей оснастки в сравнении с другими аддитивными технологиями. Экспериментально продемонстрированы возможности изготавливать литейные формы в литейную формообразующую оснастку из глинистых вязко-текучих материалов с применением технологии экструзионной 3D-печати.

Ключевые слова. Аддитивная технология, MJS-технология, литейная формообразующая оснастка.

Для цитирования. Толочко, Н. К. Применение технологии экструзионной 3D-печати в литейном производстве / Н. К. Толочко, А. А. Андрушевич, П. Н. Василевский, П. С. Чугаев // *Литье и металлургия*. 2018. № 4. С. 139–144.
DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-139-144.

APPLICATION OF 3D-PRINTING EXTRUSION TECHNOLOGY IN FOUNDRY PRODUCTION

N. K. TOLOCHKO, A. A. ANDRUSHEVICH, P. N. VASILEVSKY, P. S. CHUGAEV, Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, 99/2, Nezavisimosti Ave. E-mail: n.tolochko@hotmail.com, andru49@mail.ru

A brief review of the additive technologies used for producing the foundry forming tooling is carried out. The peculiarities of using extrusion 3D-printing technology for producing the foundry forming tooling in comparison with other additive technologies are considered. The possibilities to produce the foundry forming tooling from clay viscous-flowing materials using extrusion 3D-printing technology are demonstrated experimentally.

Keywords. Additive technology, MJS-technology, foundry forming tooling.

For citation. Tolochko N. K., Andrushevich A. A., Vasilevsky P. N., Chugaev P. S. Application of 3D-printing extrusion technology in foundry production. *Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 4, pp.139–144. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-139-144.

Для получения деталей методами литья требуется специально создавать литейную формообразующую оснастку. Однако стоимость такой оснастки, создаваемой с использованием традиционных технологий, как правило, во много раз превышает стоимость изготавливаемых с ее помощью изделий. Для снижения стоимости, ускорения и, по возможности, автоматизации процесса ее получения перспективно применять аддитивные технологии, или, как их еще называют, технологии 3D-печати [1, 2]. Их применение особенно эффективно в опытном производстве, когда требуется часто вносить изменения в конструкцию деталей и соответственно постоянно корректировать оснастку для изготовления опытных образцов.

Известны разнообразные виды аддитивных технологий, которые различаются особенностями процессов построения 3D-изделий, а также особенностями конструкции и функционирования технологического оборудования (3D-принтеров).

Для изготовления литейной формообразующей оснастки применяются в основном следующие виды аддитивных технологий [1, 3]:

- Stereolithography Apparatus (SLA) – слои жидкой фотополимерной смолы последовательно наносятся друг на друга, каждый вновь нанесенный слой селективно затвердевает под действием луча ультрафиолетового лазера;

- Digital Light Processing (DLP) – процесс осуществляется по аналогии с SLA, отличие состоит в том, что фотополимерная смола затвердевает под действием потока ультрафиолетового излучения, сформированного проектором;
- Three Dimensional Printing (3DP) – порошок строительного материала наносится послойно на платформу, на каждый слой с помощью струйной головки селективно каплями подается связующее, которое связывает (склеивает) частицы порошка между собой и предыдущими слоями;
- Multi-Jet Modeling (MJM) – жидкая фотополимерная смола или нагретый до полужидкого состояния воск подается каплями через многоструйную печатающую головку непосредственно в место построения изделия, где строительный материал затвердевает под действием ультрафиолетового излучения или в результате охлаждения;
- Fused Deposition Modeling (FDM) – волокно из термопластичного полимера, нагретое до полужидкого состояния, подается послойно непосредственно в место построения изделия, где нанесенные слои соединяются между собой и затвердевают в результате охлаждения;
- Selective Laser Sintering (SLS) – порошок строительного материала наносится послойно на платформу, каждый вновь нанесенный слой селективно спекается под действием луча лазера;
- Direct Metal Tooling (DMT) – металлический порошок подается непосредственно в место построения изделия и подвергается лазерной послойной наплавке;
- Laminated Object Manufacturing (LOM) – выкройки из листового материала, полученные путем лазерного контурного раскроя, пакетируются и соединяются между собой с помощью адгезива (или другим способом).

В литейном производстве аддитивные технологии применяются для создания литейных моделей, в том числе мастер-моделей и удаляемых (выплавляемых или выжигаемых) моделей, на основе которых затем получают литейные формы с помощью традиционных технологий, а также для прямого создания литейных форм.

Ниже рассмотрены некоторые типичные примеры изготовления литейной формообразующей оснастки с помощью аддитивных технологий.

Мастер-модели изготавливают из фотополимеров по SLA-технологии [1, 4, 5], а также из термопластичных полимеров типа ABS, PLA и т. п. по FDM-технологии [5] и из фотополимеров или литейного воска по MJM-технологии [6]. Такие мастер-модели используются преимущественно для последующего создания силиконовых форм, которые, в свою очередь, служат для литья пластмасс, в частности, для получения выплавляемых моделей. Кроме того, с помощью таких мастер-моделей получают песчаные и гипсовые формы для литья металлов [7].

Выплавляемые модели изготавливают из литейного воска с фотополимерным связующим по MJM-технологии [1], а также из ПВХ-пленок по LOM-технологии [8], выжигаемые модели – из фотополимеров по SLA-технологии, из полистирола – по SLS-технологии, из полиметилметакрилата – по Ink-Jet-технологии (разновидность 3DP) [1, 4, 8].

В практическом отношении особый интерес представляет применение аддитивных технологий для прямого изготовления литейных форм без использования специально создаваемой модельной оснастки, что в целом ведет к упрощению производства литых изделий, снижению его длительности и стоимости. Так, литейные формы непосредственно изготавливают по SLS-технологии из литейного (силикатного или циркониевого) песка, плакированного полимером, играющим роль связующего [9], а также по Ink-Jet-технологии, когда связующее вещество подается каплями на последовательно наносимые слои песка или гипса [10, 11]. Такие формы применяются для получения литых изделий из алюминиевых и магниевых сплавов, стали [11].

Аддитивные технологии позволяют непосредственно создавать металлическую литейную оснастку. Пример тому – деятельность компании InssTek (Южная Корея), которая производит по DMT-технологии пресс-формы из стали и никель-молибденовых сплавов, служащие для литья алюминиевых головок блоков цилиндров двигателя [12]. Используя DMT-технологию, за счет варьирования состава осаждаемых металлических порошков можно получать пресс-формы, в которых рабочая поверхность выполнена из инструментальной стали, а конформные каналы охлаждения – из меди, причем сталь плавно переходит в медь [3]. Такие пресс-формы обеспечивают существенное сокращение времени охлаждения деталей при литье.

С помощью аддитивных технологий непосредственно изготавливают пластиковые пресс-формы для инжекционного литья пластиков [13]. Пресс-формы получают из температуростойких пластиков с добавками керамического порошка по технологии Moving Light (разновидность DLP). С помощью таких пресс-форм получают отливки из полипропилена, полиэтилена, полистирола, полиамида, АБС-пластика и т. п. Для изготовления деталей из термопластичных полимеров с низкой температурой плавления мож-

но использовать литейные формы, создаваемые из тонких слоев металла или специальных сортов бумаги по LOM-технологии [14].

Изготовление литейной формообразующей оснастки с помощью рассмотренных выше видов аддитивных технологий, несмотря на их достоинства, до сих пор не получило широкого распространения. Одна из главных причин – довольно высокая стоимость 3D-принтеров, с помощью которых эти технологии реализуются. Как правило, она исчисляется десятками, а нередко и сотнями тысяч долларов США. Пожалуй, исключение составляет FDM-технология, для реализации которой используются 3D-принтеры, имеющие сравнительно низкую стоимость, не превышающую нескольких тысяч долларов США. Однако в этой технологии применяется ограниченный спектр материалов, а именно: несколько видов термопластичных полимеров, создаваемых в форме волокон.

В связи с этим представляет особый интерес изучение возможностей изготовления литейных форм с помощью технологии экструзионной 3D-печати вязкотекучими материалами. Впервые эта технология под названием Multiphase Jet Solidification (MJS) была разработана в 1994 г. в Германии сотрудниками двух институтов – Fraunhofer Institute for Manufacturing and Automation (IPA) и Fraunhofer Institute for Applied Materials Research (IFAM) [15–17]. MJS-технология аналогична FDM-технологии, отличие состоит в том, что в место построения изделия подается не расплавленное полимерное волокно, а пастообразная смесь металлического порошка и связующего (в соотношении приблизительно 1:1), которая выдавливается через подогреваемый экструдер. Напечатанная 3D-заготовка подвергается спеканию, сначала предварительному, а затем окончательному, в результате чего получается готовое изделие с высокой плотностью, равной 95–98% плотности компактного материала. При этом в зависимости от состава порошковых компонентов и связующего линейная усадка при спекании составляет 10–16%. Возможен иной подход к повышению плотности изделия – путем инфильтрации заготовки расплавленным металлом после ее предварительного спекания. Инфильтрат должен иметь более низкую температуру плавления, чем пористое тело заготовки, и не вступать с ним в реакции. Благодаря инфильтрации усадка существенно уменьшается и, кроме того, увеличивается прочность изделия.

В последние годы технология экструзионной 3D-печати получила распространение в пищевой индустрии, где путем экструзии пищевых паст, теста, расплавленного шоколада и других вязкотекучих продуктов готовят 3D-образцы кулинарных изделий разнообразной конфигурации [18]. Для этого применяются специально выпускаемые многочисленными фирмами 3D-принтеры, снабженные поршневыми или шнековыми экструдерами. Эти 3D-принтеры довольно дешевы, они имеют стоимость, приблизительно такую же, как и 3D-принтеры, используемые в FDM-технологии.

Сравнительно недавно наметилось новое направление в развитии технологии экструзионной 3D-печати – изготовление изделий из глины, в частности, изделий художественной и бытовой керамики [19, 20], а также литейных форм для литья металлов [21, 22].

С целью изучения возможностей создания литейных форм на основе глины с помощью технологии экструзионной 3D-печати были выполнены предварительные эксперименты по экструдированию с использованием поршневого пластикового экструдера с диаметром сопла 2 мм. В разных экспериментах экструдированию подвергали материалы на основе порошка глины (ТУ 5745-001-0148977766-2011), а также смеси порошка глины с кварцевым песком. В порошки глины или песчано-глинистых смесей добавляли воду, доводя получаемые в ходе перемешивания пастообразные массы до консистенции, при которой обеспечивались, с одной стороны, хорошие экструзионные свойства (достаточно свободное выдавливание через сопло экструдера), а с другой – возможность послойного построения изделий (отсутствие растекания наращиваемых друг на друга слоев экструдированного материала).

Содержание компонентов (насыпной объем порошков и объем воды), а также зернистость порошков (размеры частиц после ситового просеивания) в материалах, экструдированных в разных экспериментах, приведены в таблице.

Содержание (C) компонентов и зернистость (D) порошков в материалах, экструдированных в разных экспериментах

Номер эксперимента	Глина		Песок		Вода С, мл
	С, мл	D, мм	С, мл	D, мм	
1	20	1–0,4	–	–	9
2	12	1–0,4	12	0,4–0,08	7
3	12	1–0,4	12	1–0,4	7

В экспериментах 1 (глина) и 2 (смесь глины с мелкозернистым песком) испытываемые материалы достаточно свободно выдавливали через сопло экструдера и послойно укладывали без растекания, что позволяло создавать многослойные 3D-изделия заданной формы. В эксперименте 1 для достижения требуемой консистенции материала требовалось большее относительное содержание воды, чем в эксперименте 2, что обусловлено более сильным поглощением воды глиной по сравнению с песком.

В эксперименте 3 (смесь глины с крупнозернистым песком) сначала выдавливали небольшую порцию материала, после чего дальнейшее экструдирование прекращали – под поршнем образовывалась «пробка» материала, обогащенная песком. Это можно объяснить забиванием входа в сопло скоплением наиболее крупных частиц песка, а также преимущественным выдавливанием воды (в том числе воды с глиной) с учетом того, что песок обладает высокой водопроницаемостью в отличие от глины. Очевидно, что подобные проблемы с экструдированием будут возникать и в тех случаях, когда содержание песка независимо от его зернистости будет чрезмерно большим.

Для того чтобы 3D-изделия, полученные в экспериментах 1 и 2, можно было использовать в качестве литейных форм, их необходимо подвергать сушке. В процессе сушки формовок на основе глины происходит их усадка, что является нежелательным явлением, которое следует учитывать на практике. Известно, что воздушная усадка формовок на основе глины тем меньше, чем больше в них содержание песка и чем меньше их исходная влажность [23, 24].

Для сравнительной оценки воздушной линейной усадки материалов, использовавшихся в экспериментах 1 и 2, были проведены испытания этих материалов согласно ГОСТ 21216-2014 «Сырье глинистое. Методы испытаний», в ходе которых образцы в виде плиток размерами 50×50×5 мм сушили на воздухе в течение 3 сут при температуре 20–25 °С. Усадку определяли по изменению расстояния между метками, нанесенными на поверхность свежесформованных образцов, после их сушки. Испытания показали, что усадка образцов из песчано-глинистой смеси составляла около 6%, что приблизительно в 1,5 раза меньше, чем усадка образцов из глины.

Кардинальным решением проблемы усадки литейных форм и стержней из глины или песчано-глинистых смесей является их глубокое охлаждение сразу же после формирования, в результате чего содержащаяся в них вода замерзает, прочно связывая частицы глины или глины и песка. При этом литейные формы и стержни сохраняют свои первоначальные размеры и конфигурацию и, кроме того, приобретают повышенную прочность. Обычно литейные формы и стержни охлаждают с помощью жидкого азота. В замороженные литейные формы заливают расплавленный металл. Практика криогенного литья показывает, что таким способом можно получать металлические отливки с высокой размерной точностью [25–28]. Кроме того, высокая прочность замороженных форм позволяет использовать их в виде тонкостенных оболочек.

Технологию криогенного литья особенно эффективно применять в сочетании с технологией экструзионной 3D-печати, а именно, создавать на 3D-принтере литейные формы с размещенными в них стержнями из глины или песчано-глинистых смесей и затем упрочнять их замораживанием. При этом, учитывая технические возможности 3D-печати, можно обеспечивать высокую геометрическую сложность литейных форм и стержней и, как следствие, получать сложно-фасонные металлические отливки, характеризующиеся наличием разнообразных полостей. Однако в таких случаях возникает проблема удаления стержней из образованных в отливках полостей, например, когда полости выполнены в виде извилистых каналов или когда входные отверстия полостей по размерам меньше самих полостей. Возможным решением этой проблемы является удаление стержней из полостей путем вымывания.

Для сравнительной оценки эффективности вымывания находящихся в полостях материалов, использовавшихся в экспериментах 1 и 2, были проведены испытания этих материалов, в ходе которых их образцы в виде пластин размерами 23×10×4 мм запечатывали в пластилиновые контейнеры, имитировавшие отливки, оставляя открытой одну торцовую поверхность. Эту поверхность ориентировали вверх и направляли на нее свободно истекающую водную струю, которая имела объемную скорость истечения 1,2 мл/с и температуру 21 °С. Расстояние от места истечения струи до обрабатываемой ею поверхности образца составляло 120 мм (12 см). Испытания показали, что образцы из песчано-глинистой смеси полностью (т. е. на глубину 23 мм) вымывались водой за 9,5 мин, а образцы из глины за это же время вымывались лишь частично – на глубину около 5,5 мм. Таким образом, скорость вымывания образцов из песчано-глинистой смеси приблизительно в 4 раза выше скорости вымывания образцов из глины. Это может быть обусловлено менее плотной структурой песчано-глинистой смеси по сравнению со структурой глины, вследствие чего песчано-глинистая смесь пропитывается водой легче, чем глина.

Из приготовленных материалов, использовавшихся в экспериментах 1 и 2, изготавливали литейные формы в виде стаканов диаметром 20 мм и высотой 30 мм с толщиной стенок 2 мм, которые подвергали сушке. После чего заливали в них расплав алюминиевого сплава АК12 (ГОСТ 1583-93) при температуре 720–730 °С, получая отливки соответствующей конфигурации.

Проведенные эксперименты подтверждают эффективность применения технологии экструзионной 3D-печати для прямого изготовления литейных форм как из глины, так и из песчано-глинистых смесей. Глина обладает лучшими экструзионными свойствами, чем песчано-глинистые смеси, поэтому ее можно беспрепятственно экструдировать через тонкие сопла, обеспечивая, тем самым, повышенную точность 3D-печати. В свою очередь, песчано-глинистые смеси по сравнению с глиной дают меньшую усадку при сушке и более легко вымываются из полостей отливок. Указанные особенности этих материалов следует учитывать при их подготовке к экструзионной 3D-печати. В частности, в случае использования песчано-глинистых смесей следует уделять особое внимание их концентрационному и дисперсному составу.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зленко М. А.** Аддитивные технологии в машиностроении / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
2. **Колесников Л. А., Манжула Г. П., Шелег В. К., Якимович А. М.** Состояние и перспективы развития технологий быстрого прототипирования в промышленности. Ч. 1 // Наука и техника. 2013. № 5. С. 3–9.
3. **Колесников Л. А., Манжула Г. П., Шелег В. К., Якимович А. М.** Состояние и перспективы развития технологий быстрого прототипирования в промышленности. Ч. 2 // Наука и техника. 2013. № 6. С. 8–16.
4. **Валетов В. А.** Аддитивные технологии (состояние и перспективы): учеб. пособ. СПб.: Ун-т ИТМО, 2015. 63 с.
5. **Печать мастер-модели FDM или SLA для изготовления обратных силиконовых форм** // [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: <https://klona.ua/blog/3d-pechat-i-prototipirovanie/pechat-master-modeli-fdm-ili-sla-dlya-izgotovlenie-obratnyh-silikonovyh-form>.
6. **Технология многоструйного моделирования (MJM)** // [Электронный ресурс]. 2018. Режим доступа: http://3dtoday.ru/wiki/MJM_print/.
7. **Мастер-модели** // [Электронный ресурс]. 2018. Режим доступа: <http://3dspirit.ru/usage/master-models>.
8. **Баурова Н. И.** Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб. пособ. / Н. И. Баурова, В. А. Зорин. М.: МАДИ, 2016. 264 с.
9. **3D-принтеры для литейного производства (SLS / BJ)** // [Электронный ресурс]. 2018. Режим доступа: <http://неоветус.рф/catalog/3d-printery-dlya-liteynogo-proizvodstva-sls-bj/>.
10. **Песок как материал для 3D-печати** // [Электронный ресурс]. 2018. Режим доступа: http://3d.globatek.ru/3d_printing_materials/sand/.
11. **Куриный В. В., Свиридов А. В.** Возможность применения методов быстрого прототипирования в литейном производстве // Уч. зап. Комсомольск-на-Амуре гос. техн. ун-та. 2011. № IV-1. С. 86–89.
12. **Зубков А.** Аддитивные технологии 3D-печати и 3D-сканирование // [Электронный ресурс]. 2018. Режим доступа: <http://www.dipaul.ru>.
13. **Аспидова А., Папуша И.** Печать по новой технологии MOVINGLIGHT // Control Engineering Россия. 2017. № 4. С. 56–60.
14. **Грабченко А. И.** [и др.]. Интегрированные генеративные технологии: учеб. пособие; под ред. А. И. Грабченко. Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. 416 с.
15. **Geiger M., Greul M., Sindel M., Steger W.** Multiphase Jet Solidification – a new process towards metal prototypes and a new data interface // Solid Freeform Fabrication Symposium, Univ. of Texas, Austin, TX, 1994. P. 9–16.
16. **Greul M.** (2016) Innovative Economic Process for the Rapid Prototyping of Near Net Shape Metal and Ceramic Parts, Materials Technology. 1996. № 11:4. P. 140–142.
17. **Kupp D., Eifert H., Greul M., Kunstner M.** Rapid Prototyping of Functional Metallic and Ceramic Parts Using the Multiphase Jet Solidification (MJS) Process // Proc. 8th Solid Freeform Fabrication Symposium; Univ. of Texas, Austin, TX, 1997. P. 203–210.
18. **Гришин А. С.** [и др.]. Новые технологии в индустрии питания – 3D-печать // Вестн. ЮУрГУ. Сер. «Пищевые и биотехнологии». 2016. Т. 4. № 2. С. 36–44.
19. **Глиняный 3D-принтер LUTUM** // [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: <https://3dprinter.ua/glinyanyiy-3d-printer-lutum/>.
20. **StoneFlower** анонсировала экструдер для печати глиняными смесями // [Электронный ресурс]. 2017. Режим доступа: <http://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/stoneflower-announced-the-extruder-for-printing-clay-mixtures/>.
21. **Joris P.** Investment Casting and 3D Printing: BFFs // [Электронный ресурс]. 2017. Режим доступа: <https://3dprint.com/185785/investment-casting-and-3dp/>.
22. **Van Herpt O.** Functional 3D Printed Ceramics // [Электронный ресурс]. 2012. Режим доступа: <http://oliviervanherpt.com/functional-3d-printed-ceramics/>.
23. **Семейных Н. С.** Технология керамических материалов. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. 202 с.
24. **Блохина Т. П., Тарасов Р. В., Макарова Л. В.** Оценка воздушных и огневых усадочных деформаций глин месторождений Пензенской области // Современные научные исследования и инновации. 2014. № 8. Ч. 1. [Электронный ресурс]. 2018. Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2014/08/37254>.

25. Грузман В. М. Теория и технология литья в замороженные формы: автореф. дис. ... д-р. техн. наук. Екатеринбург, 1993. 37 с.
26. Глебов С. М. Разработка способа изготовления керамических форм и стержней замораживанием для ответственных деталей центробежных насосов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2009. 19 с.
27. Мамишев В. А., Шинский О. И., Соколовская Л. А. Прикладные аспекты повышения качества отливок при их затвердевании в песчаных формах. Сообщение 4 // *Металл и литье Украины*. 2015. № 6. С. 35–38.
28. Замятин Н. И. Теоретические и технологические основы применения противопригарных покрытий на водной основе для замороженных литейных форм и стержней. дис. ... канд. техн. наук. Одесса, 2016. 173 с.

REFERENCES

1. Zlenko M. A. *Additivnye tehnologii v mashinostroenii: posobie dlya inzhenerov* [Additive technologies in mechanical engineering: a manual for engineers]. M. A. Zlenko, M. V. Nagaitsev, V. M. Dovbysh. / Moscow, SSC RF Federal State Unitary Enterprise «NAMU». 2015. 220 p.
2. Kolesnikov L. A., Manzhula G. P., Sheleg V. K., Yakimovich A. M. Sostoyanie i perspektivy razvitiya tehnologiy bystrogo prototipirovaniya v promyshlennosti (Chast 1). *Nauka i tehnika = Science and Technique*, 2013, no. 5, pp. 3–9.
3. Kolesnikov L. A., Manzhula G. P., Sheleg V. K., Yakimovich A. M. Sostoyanie i perspektivy razvitiya tehnologiy bystrogo prototipirovaniya v promyshlennosti (Chast 2). *Nauka i tehnika = Science and Technique*, 2013, no. 6, pp. 8–16.
4. Valetov V. A. *Additivnye tehnologii (sostoyanie i perspektivy)*. Ucheb. posob. SPb.: Un-t ITMO, 2015. 63 p.
5. Pechat master-modeli FDM ili SLA dlya izgotovleniya obratnykh silikonovykh form. [Jelektronnyj resurs]. 2015. Rezhim dostupa: <https://klona.ua/blog/3d-pechat-i-prototipirovanie/pechat-master-modeli-fdm-ili-sla-dlya-izgotovlenie-obratnykh-silikonovykh-form>.
6. **Technologiya** mnogostrujnogo modelirovaniya (MJM) [Jelektronnyj resurs]. 2018. Rezhim dostupa: http://3dtoday.ru/wiki/MJM_print/.
7. **Master-modeli** [Jelektronnyj resurs]. 2018. Rezhim dostupa: <http://3dspirit.ru/usage/master-models>.
8. Baurova N. I. *Primenenie polimernykh kompozitsionnykh materialov pri proizvodstve i remonte mashin*: Ucheb. Posobie / N. I. Baurova, V. A. Zorin. M., MADI, 2016. 264 p.
9. **3D-printery** dlya liteynogo proizvodstva (SLS / BJ) [Jelektronnyj resurs]. 2018. Rezhim dostupa: <http://neovejtus.rf/catalog/3d-printery-dlya-liteynogo-proizvodstva-sls-bj/>.
10. **Pesok** kak material dlya 3D-pechati [Jelektronnyj resurs]. 2018. Rezhim dostupa: http://3d.globatek.ru/3d_printing_materials/sand/.
11. Kurinyj V. V., Sviridov A. V. *Vozmozhnost primeneniya metodov bystrogo prototipirovaniya v liteynom proizvodstve*. Uch. Zap. Komsomolskogo-na Amure gos. teh. un-ta. 2011, no. IV-1. S. 86–89.
12. **Zubkov A.** Additivnye tehnologii 3D-pechati i 3D-skanirovanie [Jelektronnyj resurs]. 2018. Rezhim dostupa: <http://www.di-paul.ru>.
13. **Aspidova A., Papusha I.** Pechat po novoy tehnologii MOVINGLIGHT. *Control Engineering Rossiya*. 2017, no. 4, pp. 56–60.
14. **Grabchenko A. I. i dr.** *Integrirovannye generativnye tehnologii*: Ucheb. Posobie; pod red. A. I Grabchenko. Harkov: NTU «HPI», 2011. 416 s.
15. **Geiger M., Greul M., Sindel M., Steger W.** Multiphase Jet Solidification – a new process towards metal prototypes and a new data interface. *Solid Freeform Fabrication Symposium, Univ. of Texas, Austin, TX, 1994*. P. 9–16.
16. **Greul M.** (2016) Innovative Economic Process for the Rapid Prototyping of Near Net Shape Metal and Ceramic Parts, *Materials Technology*. 1996, no. 11:4. P. 140–142.
17. **Kupp D., Eifert H., Greul M., Kunstner M.** Rapid Prototyping of Functional Metallic and Ceramic Parts Using the Multiphase Jet Solidification (MJS) Process // *Proc. 8th Solid Freeform Fabrication Symposium; Univ. of Texas, Austin, TX, 1997*. P. 203–210.
18. **Grishin A. S. i dr.** *Novye tehnologii v industrii pitaniya – 3D-pechat*. *Vestnik UrGU. Ser. «Pishevye I biotehnologii»*. 2016. T. 4, no. 2, pp. 36–44.
19. **Glinyanyj 3D-printer LUTUM** [Jelektronnyj resurs]. 2015. Rezhim dostupa: <https://3dprinter.ua/glinyanyiy-3d-printer-lutum/>.
20. **Stone Flower** anonsirovala ekstruder dlya pečati glinyanymi smesyami [Jelektronnyj resurs]. 2017. Rezhim dostupa: <http://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/stoneflower-announced-the-extruder-for-printing-clay-mixtures/>.
21. **Joris P.** Investment Casting and 3D-Printing: BFFs [Jelektronnyj resurs]. 2017. Rezhim dostupa: <https://3dprint.com/185785/investment-casting-and-3dp/>.
22. **Van Herpt O.** Functional 3D-Printed Ceramics [Jelektronnyj resurs]. 2012. Rezhim dostupa: <http://oliviervanherpt.com/functional-3d-printed-ceramics/>.
23. **Semejnyh N. S.** *Tehnologiya keramicheskikh materialov*: konspekt lekcij. Perm: Iz -vo Perm. gos. teh. un-ta, 2008. 202 p.
24. **Blohina T. P., Tarasov R. V., Makarova L. V.** Ocenka vozdušnykh i ognevnykh usadochnykh deformacij glin mestorozhdenij Penzenskoj oblasti // *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii*. 2014. no. 8. Ch. 1 [Jelektronnyj resurs]. 2018. Rezhim dostupa: <http://web.snauka.ru/issues/2014/08/37254>.
25. **Gruzman V. M.** *Teoriya i tehnologiya litya v zamorozhennye formy*. Avtoref. diss. dok. tekhn. nauk: 05.16.04. Ekaterinburg, 1993. 37 p.
26. **Glebov S. M.** *Razrabotka sposoba zgotovleniya keramicheskikh form i stverzhnej zamorazivaniem dlya otvetstvennykh detalej centobezhnykh nasosov*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk: 05.16.04. Sankt-Peterburg, 2009. 19 p.
27. **Mamishev V. A. Shinsrij O. I., Sokolovskaya L. A.** Prikladnye aspekty povysheniya kachestva otlivok pri ih zatverdevanii b peschanykh formah. *Soobshenie 4. Metall i lite Ukrainy = Metal and Foundry of Ukraine*, 2015, no. 6, pp. 35–38.
28. **Zamyatin N. I.** *Teoreticheskie i tehnologicheskie osnovy primeneniya protivoprigarnykh pokrytij na vodnoi osnove dlya zamorozhennykh litejnykh form I sterzhnej* Diss. kand. tekhn. nauk, Odessa, 2016. 173 p.