

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.74

DOI: 10.12737/article_5a337fbb87fb85.27541064

Е.О. Ольховик

ИССЛЕДОВАНИЕ АБРАЗИВНОЙ СТОЙКОСТИ ЛИТЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Представлены результаты исследования абразивной стойкости литейной модельной оснастки, полученной с использованием аддитивных технологий. Предложены экспериментальная установка и методика проведения испытаний. Приведены примеры испытаний оснастки для получения отпечатка фасонных отливок из ABS- и PLA-пластика как в

исходном состоянии, так и при нанесении различных защитных покрытий. Предложены практические рекомендации по 3D-печати литейных моделей для их формовки в ХТС.

Ключевые слова: литейное производство, аддитивные технологии, 3D-печать, литейные модели, абразивная стойкость.

E.O. Olkhovik

INVESTIGATION OF CASTING PATTERN ABRASION RESISTANCE OBTAINED USING ADDITIVE TECHNIQUES

In the investigation presented there is considered a problem of the durability definition in casting pattern equipment made of ABS (acrylnitrilebutadienestyrene)- and PLA (polylactide) plastic obtained through a method of 3D printing by technology of layer-by-layer surfacing to abrasive wear in molding sand medium.

A description of the procedure and equipment for tests of plastic models made of ABS- and PLA materials is shown. The techniques for manufacturing models with the use of 3D printer (additive techniques) are described. There is offered a circuit with the application of vibrational load for model tests which reproduces most qualitatively real conditions of abrasive wear in molding sand mixture. In addition the properties of protective coatings on the basis of acryl paints and two-component polyurethane tar with a special extender were studied.

All tests were carried out on the basis of up to 2000 cycles, each of which corresponds to one molding or a model removal. The additive techniques use for manufacturing casting equipment is a promising direction in engineering development, as common methods for manufacturing wooden or metal equipment are expensive. As a result of the investigation there is developed and approbated test engineering, a procedure to study wear of plastic casting patterns manufactured according to the additive techniques of layer-by-layer surfacing.

In the paper there are formulated generalized practical recommendations for 3D printing of casting pattern equipment for impression obtaining in a sand mold as technological solutions and measures for abrasive wear prevention of such patterns at molding.

Key words: foundry, additive techniques, 3D printing, casting patterns, abrasive resistance.

Введение

Использование аддитивных технологий в литейном производстве является перспективным направлением, поскольку за последние несколько лет значительно снизилась стоимость 3D-принтеров, повысилась качество печати и упростилась технология печати (изготовления) моделей. В работе [1] S. Singh и R. Singh подробно рассмотрели области применения аддитивных технологий для изготовления отливок различного назначения. В работах [2; 3] D.L. Bourell и проф. Ravi выполнили качественный обзор направлений совре-

менного развития литейного производства, в том числе с акцентом на применение технологий 3D-печати. Ими предложена достаточно подробная дорожная карта применения аддитивных технологий для производства отливок различного назначения. Если предлагаемые направления развития спроецировать на все более массовое использование аддитивных технологий в литье по выплавляемым (ЛВМ) и газифицируемым (ЛГМ) моделям, то в дальнейшей перспективе можно выделить два длительных и отдельных направления: первое

- это использование аддитивных технологий для изготовления литейной оснастки взамен традиционной деревянной (для массового изготовления отливок); второе - это полный переход на металлическую 3D-печать готовых деталей.

В работе [4] проф. Леушин и др. исследовали особенности применения твердотельной модели оснастки, изготовленной по технологии послойного нанесения ABS-пластика, который в качестве материала для литейной оснастки показал значительное превышение его ресурса работы по сравнению с деревянной модельной оснасткой.

Также хорошо известны проблемы использования технологии FDM (Fused Deposition Modelling) для изготовления литейных моделей. В работах [5; 6] описаны проблемы состояния и чистоты поверхности моделей из ABS- и PLA-пластика для ЛВМ и ЛГМ. Традиционные восковые модели имеют более высокие показатели шероховатости поверхности, чем пластиковые модели. Частично эта проблема может быть решена за счет химической постоб-

работки поверхности ABS- и PLA-пластика, но данный процесс приведет к удорожанию одноразовых моделей. Известна и описана проблема размерной точности моделей, полученных с использованием 3D-печати. Нами были проведены исследования и выданы рекомендации по предотвращению коробления и перекоса напечатанных моделей [7; 8].

Еще одним из перспективных направлений 3D-печати в литейном производстве является изготовление вспомогательной оснастки и шаблонов как для стабилизации литейной формы, так и для изготовления стержней. Технологические преимущества таких методов раскрыты в работе [9]. Также аддитивные технологии являются востребованными для разработки новых литейных технологий, требующих большого количества итераций по изменению геометрии системы «отливка - форма - стержень - литниково-питающая система», в том числе с применением методов геометрической и топологической оптимизации [10].

Методы, материалы и технология исследований

В данной статье в качестве основного предмета исследований рассматривается пластиковая литейная оснастка, предназначенная для получения отпечатков и полостей в песчаной форме при виброформовке. Основным показателем качества литейной технологической оснастки является ее жизненный цикл, т.е. стойкость к износу или разрушению (деформации). В качестве технологического процесса машинного формообразования выбраны литье в песчано-глинистую форму и литье в химически твердеющую форму.

Традиционно пластиковая оснастка не применяется в таких технологических процессах либо применяется весьма ограниченно, поскольку не выдерживает конкуренции с металлической оснасткой по параметрам «износ» и «долговечность» и с деревянной оснасткой по параметрам «стоимость изготовления» и «скорость изготовления». В настоящее время стоимость профессионального модельного комплекта из пластика превышает стоимость дере-

вянной оснастки примерно в пять раз. Это связано с удешевлением деревянных моделей, которые сейчас изготавливают преимущественно из МДФ на станках с ЧПУ. Пластиковые литейные модели по-прежнему изготавливают методом экструзии в металлическую форму, что является затратной технологией.

Основной задачей настоящей работы является разработка аппаратуры и методики для исследования износа литейной модельной оснастки, полученной с использованием аддитивной технологии на 3D-принтере из стандартного ABS- и PLA-пластика. Под сопротивлением износу подразумеваются условия абразивного и ударного силового взаимодействия с песчаной смесью при формировании отпечатка (полости) в форме или при уплотнении стержня. Дополнительно исследовались варианты защитных покрытий (лакокрасочных и композитных) для пластиковых литейных моделей и выполнялась оценка их стоимости.

Количество съёмов (единовременных контактов) для пластиковой оснастки имеет достаточно широкий интервал и может варьироваться от 100 до 10000 без ремонта. Благодаря применению специальных износостойких добавок при изготовлении полимерных материалов литейная оснастка из пластика значительно повышает свою стойкость к ударной нагрузке и абразивному износу, однако использование таких материалов для литейной оснастки ограничено - в первую очередь высокой ценой на них. Кроме того, для изготовления пластмассовой оснастки необходимо специальное дорогостоящее оборудование.

FDM-технология позволяет преодолеть ценовой и технологический барьеры, но, в свою очередь, имеет ограничения по размерной точности моделей и применяемым материалам (нет возможности использовать высокопрочный пластик с добавками). Коммерческая составляющая этого процесса достаточно подробно рас-

Подготовка и проведение испытаний

Для производства литейных моделей из ABS и PLA (стандартная нить) использовалась наиболее распространенная модель 3D-принтера - Makerbot Replicator 2. За базовые параметры печати были выбраны следующие: плотность печати (процент заполнения) - 15 %; толщина слоя - 0,15 мм; скорость подачи нити - 75 мм/с; скорость перемещения печатающей головки - 120 мм/с; температура подогрева стола - 230 °С.

Температурный режим подогрева стола и скорость печати выбирались исходя из показателей качества поверхности модели. Объем заполнения варьировался для различных вариантов 3D-печати в диапазоне от 15 до 30 %. Его увеличение не приводило к существенному повышению качества моделей, но значительно увеличивало время печати. Исходные образцы для испытаний представлены на рис. 1.

Отдельные модели подвергались постобработке дихлорметаном, что позволяло добиться высокого качества поверхности моделей. Для создания защитного износостойкого слоя модели дополнительно окрашивались воздушным напылением (в

смотрена в диссертации [11]. При этом на открытом рынке в качестве расходных нитей из ABS и PLA присутствуют только пластики со стандартными свойствами, упрочненные добавками нити в настоящее время практически отсутствуют. Функциональными свойствами пластика здесь являются повышенная прочность к деформациям, ударам, высокий диапазон температур эксплуатации (от -40 до +90°С), устойчивость к воздействию агрессивных химических веществ (кислот и щелочей, применяемых в литейном производстве), экологическая чистота.

Авторы в работе [12] включили в технологический процесс изготовления модельной оснастки первоначальное производство модели-эталона (мастер-модели) с использованием аддитивных технологий для дальнейшего производства промодели отливки и рабочих моделей, что оказалось экономически оправданным.

один слой толщиной примерно 0,15 мм) акриловой краски (1-й вариант) или двухкомпонентного покрытия на основе полиуретановой смолы со специальными износостойкими добавками (2-й вариант). Существенных проблем с адгезией защитного покрытия не было выявлено. Для более качественного нанесения требуется предварительная обработка поверхности, в том числе с использованием специальной грунтовки для пластика.

Для постановки эксперимента была воспроизведена реальная ситуация вибрационной формовки модели в опоке с песчаной смесью. Принципиальная схема установки для испытаний представлена на рис. 2. Состав песчаной смеси, максимально приближенный к реальному формовочному составу для ХТС-технологии, был следующим: SiO₂ (диоксид кремния) - 98,5 % (всего); Al₂O₃ (оксид алюминия) - 0,25 %; Fe₂O₃ (оксид железа) - 0,10 %; K₂O+Na₂O (оксиды калия и натрия) - < 0,1 %; MgO+CaO (оксиды магния и кальция) - < 0,9%; другие компоненты - < 0,5 % (форма зерен песка - округлая). Размер частиц формовочного песка был следую-

щим: 0,2; 0,3; 0,4; 0,6 мм. Состав подбирался индивидуально (преимущественно в равных пропорциях) по размеру частиц через лабораторные сита. Твердость песка по шкале Мора составляла 6,2...7,4 единицы. Таким образом, основа песчаной смеси

наиболее близко соответствовала марке 2К₂О₂О₂₅ (2К₂О₂О₃) по ГОСТ 2138-91. Перед использованием песок подвергался термической обработке при 150°С для сушки и обезвоживания.



Рис. 1. Литейные полумодели (ABS, PLA) корпуса запорной арматуры, полученные с использованием 3D-принтера Makerbot Replicator 2

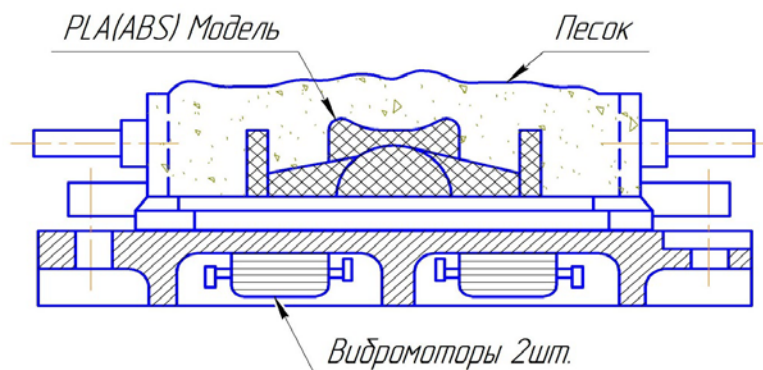


Рис. 2. Схема установки для испытаний на абразивный износ пластиковых литейных моделей

Испытания заключались во временном вибрационном воздействии на систему «литейная модель - формовочный песок» в замкнутом объеме, ограниченном опкой. Вибрационное воздействие выполня-

лось за счет двух вибромоторов (рис. 2), закрепленных снизу модельной плиты. При их работе осуществлялся динамический контакт модели с песком и его объемное перемешивание. Поскольку в фор-

мовочной смеси отсутствовало связующее, то уплотнения песка не происходило, однако, как показала практика, под воздействием вибрации частицы песка с наибольшим размером оседали в нижней части опоки, поэтому требовалось периодическое ручное перемешивание песка.

В условиях реального производства такое вибрационное воздействие (для ХТС) имеет длительность 5...15 секунд. Данного цикла механических колебаний вполне достаточно для уплотнения формовочной смеси и набора прочности.

Разработанная установка была снабжена возможностью регулировки частоты вращения вибромоторов (в диапазоне

450...1200 оборотов в минуту) за счет использования частотных регуляторов. Таким образом, имеется возможность регулировать вынужденную центробежную силу в диапазоне 200...500 Н.

Износ пластиковых моделей измерялся в трех различных вариантах: износ поверхности модели (рис. 3), массовый износ (рис. 4) и оценка в локальных областях модели (рис. 5). За один цикл принималось вибрационное воздействие в течение 10 секунд, что соответствует одной формовке (съёму модели). Выбранная длительность испытаний составляла 2000 циклов, или 5,5 ч. При этом испытывались сразу 4 полумодели, закрепленные на виброплите.

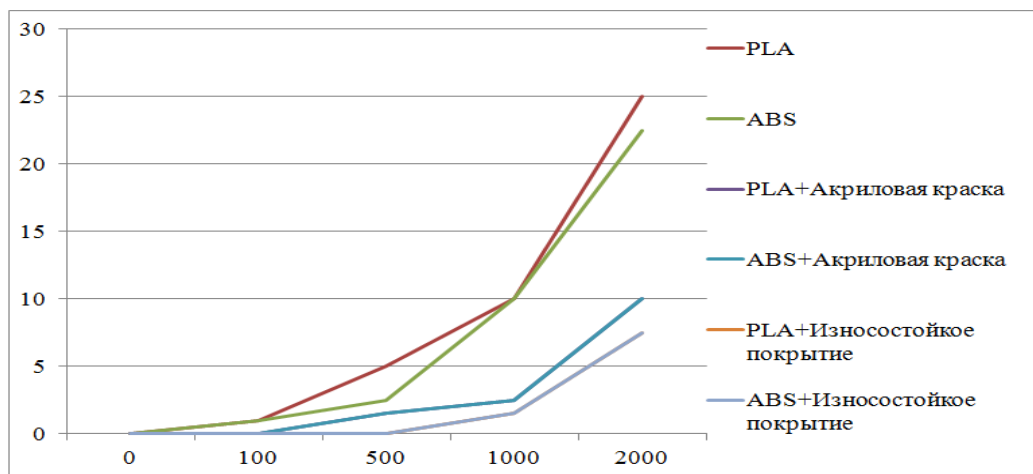


Рис. 3. Износ поверхности литейных моделей, % (0-2000 циклов)

Величина износа поверхности литейных моделей (рис. 3) определялась в % от общей поверхности путем измерения локального износа с использованием магнитной индикаторной стойки по 10-12 характерным и заранее выбранным точкам на поверхности пластиковой модели. Такой метод является достаточно относительным, поскольку обеспечить высокую точность измерений весьма затруднительно. Также необходимо учитывать, что модель изнашивается неравномерно в различных участках, т.е. для другой геометрии модели картина износа может существенно отличаться. При всех недостатках такой метод позволяет отследить динамику износа в зависимости от количества циклов съёма.

Локальные участки износа выявлялись визуально по следам наиболее интен-

сивной деструкции лакокрасочного покрытия модели. При этом они относились в основном на области модели, имеющие наиболее замкнутое пространство (внешние карманы), поскольку песок там задерживается и имеет только ограниченную возможность свободно перемещаться, что хорошо соотносится с результатами в работе [13].

Массовый износ (рис. 4) определялся методом прямого взвешивания моделей на электронных весах через каждые 250 циклов испытаний. Здесь также полученные результаты можно оценивать только в сравнении, поскольку вес моделей достаточно мал, а точность измерения составляла порядка 0,025 г.

О динамике линейного износа локальных участков поверхности напечатан-

ных моделей можно судить по рис. 5. Измерения проводились исключительно для зон активного износа (2-3 точки) с использованием магнитной индикаторной стойки (в вертикальном направлении). Другие участки поверхности могут оставаться в исходном состоянии, т.е. не подвергаться

износу при тех же условиях вибрационного воздействия.

Применяемые методики испытаний были адаптированы из работ [14; 15], в которых также исследовался локальный и массовый износ материалов, имеющих структурную неоднородность поверхностного слоя.

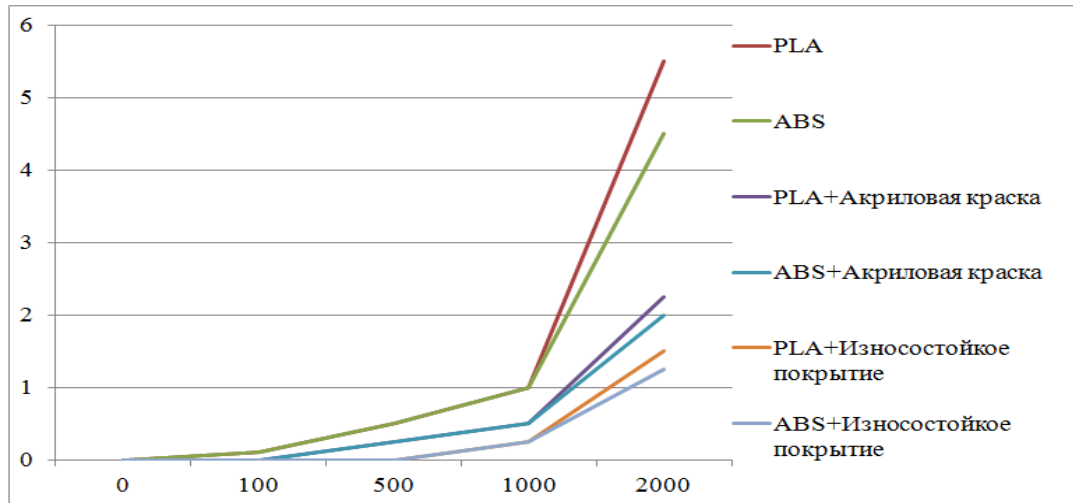


Рис. 4. Массовый износ литейных моделей, % (0-2000 циклов)

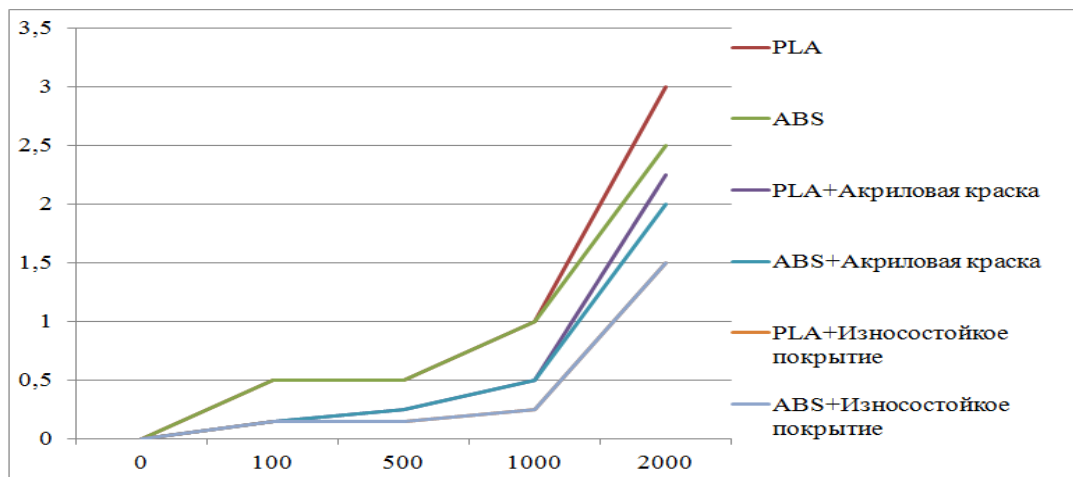


Рис. 5. Линейный износ поверхности литейных моделей, мм (0-2000 циклов)

Обсуждение результатов

Всего было испытано около 20 разных моделей из стандартного ABS- и PLA-пластика (при различных условиях вибрационного уплотнения и размерах частиц песка), напечатанных при различных технологических параметрах.

Полученные данные подтвердили идею авторов работы [16] о том, что тех-

нологические параметры 3D-печати полу-моделей для получения отпечатков в песчаной форме существенно отличаются от параметров 3D-печати для технологий ЛВМ и ЛГМ.

Чтобы избежать ускоренного износа модели при формовке, необходимо использовать метод наиболее плотной 3D-

печати (плотность печати, или процент заполнения, - 15...30 % в начальных установках; было выявлено, что дальнейшее увеличение плотности положительно не влияет на сопротивление износу). Наиболее оптимальные параметры печати: скорость подачи нити - 60...90 мм/с; скорость перемещения печатающей головки - 120 мм/с; температура подогрева стола - 230 °С; толщина каждого слоя - < 0,2 мм (должна быть как можно меньше, поскольку это будет обеспечивать высокое качество внутренней адгезии материала модели).

Необходимо отметить, что модели с низкой плотностью печати изнашивались с большей интенсивностью. При этом защитный лакокрасочный слой выполнял свои защитные функции, однако после его разрушения износ модели существенно ускорялся.

Отдельно следует отметить выявленную динамику износа элементов типа «внешний плоский угол». Так, если в исходной напечатанной модели радиус скругления для плоского угла составлял 0,25 мм, то уже после 500 циклов нагружения это значение было 0,6 мм, а после 2000 циклов - 1...1,2 мм.

Следует заметить, что все измерения износа полумоделей исследуемого корпуса арматуры (который имеет достаточно сложную геометрию в виде композиции из тел вращения) не стоит однозначно переносить на модельную оснастку другой геометрии, поскольку, как было выявлено, форма поверхности имеет решающее значение при сопротивлении износу.

Выводы

1. Разработана испытательная техника для изучения износа пластиковых литейных моделей, полученных по аддитивной технологии FDM. Отличительной особенностью установки является возможность регулировки интенсивности вибрационного воздействия на исследуемые модели.

2. Предложена методика, которая позволяет испытать пластиковые модели, полученные с использованием аддитивных технологий, на абразивный износ.

В работе [17] авторы приводят данные по армированию биокомпозитов (в том числе ABS и PLA) джутовым волокном. Данная композиция, обработанная Силаном-2, показала наилучшее сцепление с волокнистой матрицей и проявила максимальное сопротивление к абразивному износу, по своей механической природе близкому к литейному производству. Однако использование такой композиции в составе аддитивных технологий при послойном нанесении может быть не так эффективно, поскольку волокнистая джутовая матрица не будет полноценно формироваться.

В работе [18] авторы предложили упрочнение поверхностного слоя ABS-пластика путем внедрения частиц оксида алюминия при высокоэнергетической струйной обработке поверхности при комнатной температуре. Данный метод существенно повышает износостойкость, однако на практике он затруднителен, так как предполагает использование высокотехнологичного оборудования. Второй способ - это химическая обработка поверхности напечатанной модели при высокой температуре, когда пластик значительно размягчается. Данный метод интересен, но также имеет недостатки, которые могут привести к недопустимому короблению модели.

Разъемные модели должны быть качественно скреплены между собой только механическим способом, поскольку термосклеивание или специальные клеи не дают высоких прочностных характеристик соединения.

3. Сформулированы практические предложения по изготовлению мастер-моделей с использованием FDM-технологии, позволяющие достичь показателей долговечности, превышающих 2000 циклов формовки в песчаной смеси.

Будущие исследования будут посвящены задачам оценки качества отливок, полученных по отпечаткам в форме, выполненным по пластиковым моделям, напечатанным на 3D-принтере.

Было установлено, что использование клеевого соединения для сборки пла-

стиковых литейных моделей не является эффективным, поскольку уже после 200 циклов формовки оно активно разрушается. Наиболее оптимальным способом сборки моделей из нескольких частей является использование металлических штифтов и резьбовых соединений.

При проектировании оснастки для изготовления моделей с использованием

аддитивных технологий необходимо учитывать возможную толщину защитного лакокрасочного покрытия, которая составляет не менее 0,15...0,25 мм. Качество напечатанных моделей уверенно позволяет получать отпечатки в песчаной форме с радиусными элементами в 0,5 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Singh, S. Precision investment casting: A state of art review and future trends / S. Singh, R. Singh // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2016. – Т. 230. – № 12. – С. 2143-2164.
2. Ravi, B. SMART Foundry 2020 / B. Ravi // IEEE Potentials. – 2016. – Т. 35. – № 4. – С. 29-32.
3. Bourell, D.L. Roadmap for additive manufacturing: identifying the future of freeform processing / D.L. Bourell, M.C. Leu, D.W. Rosen. - The University of Texas at Austin, 2009. – С. 11-15.
4. Леушин, И.О. Применение RP-технологии для изготовления малогабаритной оснастки в мелкосерийном производстве литья / И.О. Леушин, В.А. Решетов, А.Д. Романов, А.А. Большаков // Известия Московского государственного технического университета «МАМИ». - 2013. - Т. 2. - № 2. - С. 229-232.
5. Kumar, P. Effect of process parameters on surface roughness of hybrid investment casting / P. Kumar, I.S. Ahuja, R. Singh // Progress in Additive Manufacturing. – 2016. – Т. 1. – № 1-2. – С. 45-53.
6. Harun, W.S.W. Characteristic studies of collapsibility of ABS patterns produced from FDM for investment casting / W.S.W. Harun [et al.] // Materials Research Innovations. – 2009. – Т. 13. – № 3. – С. 340-343.
7. Olkhovik, E.O. Use of additive technologies for practical working with complex models for foundry technologies / E.O. Olkhovik, A.A. Butsanets, A.A. Ageeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2016. – Т. 140. – № 1.
8. Ольховик, Е.О. Исследование формирования размерной точности моделей для литейного производства, выполненных методом аддитивной технологии / Е.О. Ольховик, А.А. Бучанец, А.А. Агеева // Научные исследования в машиностроении. – 2016. – № 12. – С. 3-9.
9. Piekło, J. Methods of Additive Manufacturing used in the Technology of Skeleton Castings / J. Piekło, M. Maj // Archives of Metallurgy and Materials. – 2014. – Т. 59. – № 2. – С. 699-702.
10. Ольховик, Е.О. Применение методов топологической оптимизации при разработке литейной технологии / Е.О. Ольховик, В.В. Десницкий // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2016. – Т. 14. – № 4. – С.27-35.
11. Gullapalli, R.A. A Study of Mixed Manufacturing Methods in Sand Casting Using 3D Sand Printing and FDM Pattern-making Based on Cost and Time / R.A. Gullapalli. – Youngstown State University, 2016.
12. Нелюб, И.А. Особенности и преимущества применения современных пластполимерных материалов для изготовления модельной оснастки / И.А. Нелюб, П.А. Кушель, С.Л. Ровин // Литьё и металлургия. – 2010. – № 4 (58) . – С.36-39.
13. Almaghariz, E.S. Quantifying the role of part design complexity in using 3D sand printing for molds and cores / E.S. Almaghariz [et al.] // International Journal of Metalcasting. – 2016. – Т. 10. – № 3. – С. 240-252.
14. Булгаков, В.П. Втулка шарнира черпаковой цепи земснаряда из двухслойной борированной стали / В.П. Булгаков, С.С. Уксусов, Л.А. Цапко // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. - 2015. - №4 (32). - С. 153-157.
15. Булгаков, В.П. Влияние химической неоднородности отливки поршня из сплава АК12М2МГН (АЛ25) на задирообразование в цилиндропоршневой группе / В.П. Булгаков, Ю.В. Чеботарев, И.Н. Рубан // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2016. – № 5(39). – С. 151-158.
16. Gorski, F. Application of Polystyrene Prototypes Manufactured by FDM Technology for Evaporative Casting Method / F. Gorski, W. Kuczko, R. Wichniarek, P. Bun, P. Szymanski // MM (Modern Machinery) Science Journal. – 2017. – С. 1729-1733.
17. Goriparthi, B.K. Effect of fiber surface treatments on mechanical and abrasive wear performance of polylactide/jute composites / B.K. Goriparthi, K.N.S. Suman, N.M. Rao // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2012. – Т. 43. – № 10. – С. 1800-1808.
18. Getu, H. Reduction of particle embedding in solid particle erosion of polymers / H. Getu, J.K. Spelt, M. Papini // Wear. – 2011. – Т. 270. – № 11. – С. 922-928.

1. Singh, S. Precision investment casting: A state of art review and future trends / S. Singh, R. Singh // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2016. – Т. 230. – № 12. – С. 2143-2164.
2. Ravi, B. SMART Foundry 2020 / B. Ravi // IEEE Potentials. – 2016. – Т. 35. – № 4. – С. 29-32.
3. Bourell, D.L. Roadmap for additive manufacturing: identifying the future of freeform processing / D.L. Bourell, M.C. Leu, D.W. Rosen. - The University of Texas at Austin, 2009. – С. 11-15.
4. Leushin, I.O. RP-technique application for manufacturing compact equipment in small-batch production of foundry / I.O. Leushin, V.A. Reshetov, A.D. Romanov, A.A. Bolshakov // *Proceedings of Moscow State Technical University "MAMI"*. – 2013. – Vol. 2. – No.2. – pp. 229-232.
5. Kumar, P. Effect of process parameters on surface roughness of hybrid investment casting / P. Kumar, I.S. Ahuja, R. Singh // *Progress in Additive Manufacturing*. – 2016. – Т. 1. – № 1-2. – С. 45-53.
6. Harun, W.S.W. Characteristic studies of collapsibility of ABS patterns produced from FDM for investment casting / W.S.W. Harun [et al.] // *Materials Research Innovations*. – 2009. – Т. 13. – № 3. – С. 340-343.
7. Olkhovik, E.O. Use of additive technologies for practical working with complex models for foundry technologies / E.O. Olkhovik, A.A. Butsanets, A.A. Ageeva // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2016. – Т. 140. – № 1.
8. Olkhovik, E.O. Investigation of pattern dimension accuracy formation for foundry carried out by method of additive techniques / E.O. Olkhovik, A.A. Butsanets, A.A. Ageyeva // *Science Intensive Techniques in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.12. – pp. 3-9.
9. Piekło, J. Methods of Additive Manufacturing used in the Technology of Skeleton Castings / J. Piekło, M. Maj // *Archives of Metallurgy and Materials*. – 2014. – Т. 59. – № 2. – С. 699-702.
10. Olkhovik, E.O. Application of topological optimization methods at foundry techniques development / E.O. Olkhovik, V.V. Desnitsky // *Bulletin of Novosov State Technical University of Magnitogorsk*. – 2016. – Vol. 14. – No.4. – pp. 27-35.
11. Gullapalli, R.A. A Study of Mixed Manufacturing Methods in Sand Casting Using 3D Sand Printing and FDM Pattern-making Based on Cost and Time / R.A. Gullapalli. – Youngstown State University, 2016.
12. Nelyub, I.A. Peculiarities and advantages in application of modern plastic-polymeric materials for manufacturing pattern equipment / I.A. Nelyub, P.A. Kushel, S.L. Rovin // *Foundry and Metallurgy*. – 2010. – No.4. (58). – pp. 36-39.
13. Almaghariz, E.S. Quantifying the role of part design complexity in using 3D sand printing for molds and cores / E.S. Almaghariz [et al.] // *International Journal of Metalcasting*. – 2016. – Т. 10. – № 3. – С. 240-252.
14. Bulgakov, V.P. Two-layer borated steel joint bush of dradger ladle chain / V.P. Bulgakov, S.S. Uksusov, L.A. Tsapko // *Bulletin of Admiral Makarov State University of Navy and Inland Water Transport*. – 2015. – No.4(32). – pp. 153-157.
15. Bulgakov, V.P. Influence of chemical heterogeneity of piston cast made of alloy AK12M2MGN (AL25) upon scratch formation in cylinder-piston group / V.P. Bulgakov, Yu.V. Chebotaryov, I.N. Ruban // *Bulletin of Admiral Makarov State University of Navy and Inland Water Transport*. – 2016. – No.5(39). - pp. 151-158.
16. Gorski, F. Application of Polystyrene Prototypes Manufactured by FDM Technology for Evaporative Casting Method / F. Gorski, W. Kuczko, R. Wichniarek, P. Bun, P. Szymanski // *MM (Modern Machinery) Science Journal*. – 2017. – С. 1729-1733.
17. Goriparthi, B.K. Effect of fiber surface treatments on mechanical and abrasive wear performance of polylactide/jute composites / B.K. Goriparthi, K.N.S. Suman, N.M. Rao // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2012. – Т. 43. – № 10. – С. 1800-1808.
18. Getu, H. Reduction of particle embedding in solid particle erosion of polymers / H. Getu, J.K. Spelt, M. Papini // *Wear*. – 2011. – Т. 270. – № 11. – С. 922-928.

Статья поступила в редколлегию 21.07.17.

Рецензент: д.т.н., профессор Санкт-Петербургского политехнического университета
В.В. Десницкий

Сведения об авторах:

Ольховик Евгений Олегович, к.т.н., доцент кафедры «Основы инженерного проектирования» Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, e-mail: olhovick@gmail.com.

Olkhovik Evgeny Olegovich, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Fundamentals of Engineering Design", Admiral Makarov State University of Navy and Inland Water Transport, e-mail: olhovick@gmail.com