

УДК 621.7.072  
DOI: 10.12737/23468

**Е.О. Ольховик**, к.т.н.,  
**А.А. Буцанец**, аспирант  
**А.А. Агеева**, инженер  
(ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,  
198035, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, ул. Двинская 5/7)  
E-mail: olhovikeo@gumrf.ru

## **Исследование формирования размерной точности моделей для литейного производства, выполненных методом аддитивной технологии**

*Представлены результаты исследований по использованию аддитивных технологий для изготовления геометрически сложных моделей в составе литейной технологии. Представлена оценка размерной точности и качества поверхности экспериментальных моделей. В заключении сделаны предложения по практическому использованию аддитивных технологий и даны рекомендации по обеспечению размерной точности при трёхмерной печати моделей отливок.*

**Ключевые слова:** размерная точность; аддитивные технологии; фасонные отливки; литье по выплавляемым моделям; PLA пластик; ABS пластик; ReplicatorG.

**E.O. Olkhovik**, Can. Eng.,  
**A.A. Butsanets**, Post graduate student,  
**A.A. Ageeva**, Engineer  
(FSBEI HE "Makarov SUNIWT",  
5/7, Dvinskaya Str, Saint-Petersburg 198035, the Russian Federation)

## **Investigation of dimension accuracy formation in casting patterns carried out by method of additive technologies for foundry**

*The results of investigations on the use of additive technologies for manufacturing geometrically complex patterns in foundry technology are presented. The purpose of this work is the investigation of possibility to use as pattern materials – PLA and ABS plastic according to the technology of the layer-by-layer application of melted pattern material through an extruder.*

*In the paper there is considered an alternative method which consists in printing basic units on a 3D printer with subsequent manufacturing patterns made of them for casts. For 3D pattern conversion into a set of instructions for the motion of a printing head there was used Replicator G (free software). The parameters of dimension accuracy and a rate of pattern material burning were investigated inasmuch as a slow gasification can result in unsatisfactory filling of a mold with melt and as a consequence in the defect formation in a subsequent cast because gas dissolution in metal.*

**Keywords:** dimension accuracy; additive technologies; shaped casts; casting on melted patterns; PLA plastic; ABS plastic; ReplicatorG.

Аддитивные технологии (АТ) применяются для быстрого изготовления моделей со сложной геометрией. Особенностью и удобством АТ является то, что нет необходимости использовать специальные инструменты или оснастку для производства готовой 3D-модели.

Металлические отливки сложной геометрии и формы в основном получают, используя технологии литья по выплавляемым (ЛВМ) или выжигаемым (ЛГМ) моделям [1 – 3], поскольку традиционные литейные технологии с использованием песчаных форм ограничены в

своих возможностях [4].

Разработка литейной технологии является сложным и циклическим процессом, здесь необходима разработка большого количества вариантов технологических решений, как для всей отливки, так и для ее отдельных узлов. Основным недостатком ЛВМ технологии является высокая трудоемкость и низкая размерная точность восковых моделей, поскольку применяется ручной труд, а модельный материал изначально имеет низкую прочность и жесткость с учетом большого количества проводимых над ним технологических операций.

Технология ЛГМ частично решает данные проблемы, но является более сложной в плане выпуска оснастки (пресс-формы, извлекаемые стержни) и использования технологического оборудования (пневмотранспорт, вакуумная техника, система вентиляции и др.).

Опыт применения АТ в литейном производстве известен [1 – 5]. Как правило, это изготовление моделей для получения отпечатка в песчаной форме или изготовление пресс-формы, реже мастер-моделей.

При этом не изучена возможность изготовления литых деталей сложной геометрии без производства модельной оснастки, а в литературе отсутствуют практические рекомендации по быстрому прототипированию моделей технологией Fused Deposition Modeling (FDM), в том числе для последующего изготовления оснастки с обеспечением необходимой размерной точности в соответствии с ГОСТ Р 53464–2009. Выполненный литературный обзор и патентный поиск показал, что в настоящее время не сформулировано общих подходов по обеспечению размерной точности 3D моделей, полученных с использованием АТ для литейного производства, что и является задачей работы.

### Цели и задачи исследования

Основной задачей данного исследования являлось изучение возможности применения АТ по наиболее распространенной FDM технологии на оборудовании ReplicatorG для быстрого изготовления литейных моделей с последующим изготовлением металлических отливок. Это позволит отказаться от изготовления промежуточных вариантов модельной оснастки и перейти к применению АТ для изготовления моделей на 3D принтере. Такой способ отработки литейной технологии позволит сократить материальные и временные затраты, что всегда является актуальной задачей как на

опытном так и на промышленном производстве.

Удельная точность при использовании АТ обычно определяется возможностями технологии, принтера и программного обеспечения (ПО) и обобщенно оценивается как минимальный размер капли пластика через печатающую головку или точность ее позиционирования, однако на практике, при печати прототипированных моделей для литейного производства, возникает ряд сложностей с обеспечением размерной точности для модели в целом.

В качестве основных проблем можно выделить следующие: температурная усадка пластика, плоскостное коробление модели, провалы участков, не имеющих слоев поддержки, перекося и смещение отверстий, изменение криволинейности радиусных элементов и т.п.

Параметры точности при использовании АТ, по мнению авторов должны превышать аналогичные для технологий ЛВМ и ЛГМ, т.е. должны соответствовать 9-му классу точности по ГОСТ Р 53464–2009, при этом по состоянию поверхности соответствовать опорной механической обработке, т.е. находится в пределах 6,3 Ra.

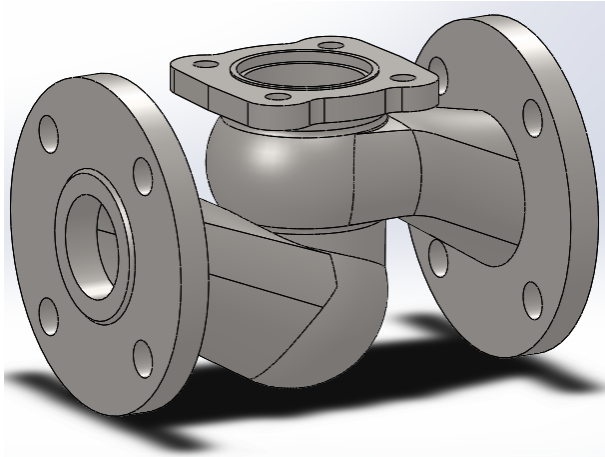
В задачи исследования входило следующее: разработка компьютерной параметрической модели отливки (рис. 1), пригодной для последующей печати на 3D принтере, нанесение огнеупорного слоя, изучение свойств горения ABS и PLA для прогнозирования заливки расплавленным металлом.

В качестве объекта для исследований был выбран корпус запорной арматуры (см. рис.1, а), как наиболее сложной отливки для литейного производства. Модель корпуса состоит из набора тел вращения, соединенных между собой радиусными переходами, внутри расположена полость аналогичной формы и конструкции.

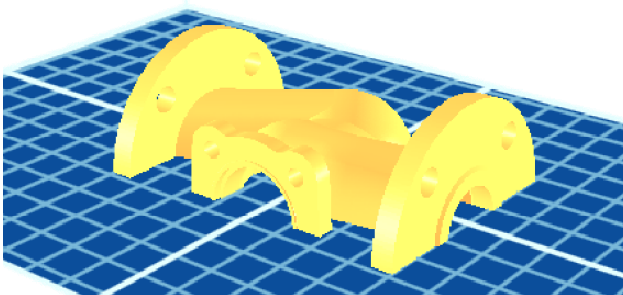
В качестве обоснования по выбору данной модели использовались аргументы в пользу исследования размерной точности, как комплекса параметров, отвечающих за итоговое качество отливки. А именно, проходные (боковые) патрубки расположены перпендикулярно основному (запорному) фланцу, цилиндрические фланцы должны иметь круглую форму и при этом также быть параллельными друг другу, проходное сечение (полость) и крепежные отверстия также находятся в диаметральной зависимости от расположения фланцев и т.д.

Таким образом, на выбранной для исследо-

вания модели возможно произвести измерения степени отклонения линейных, угловых и радиусных размеров, параметров коробления, состояния поверхности, взаимного, в том числе плоскостного расположения отдельных элементов друг относительно друга или выбранной базы.



а)



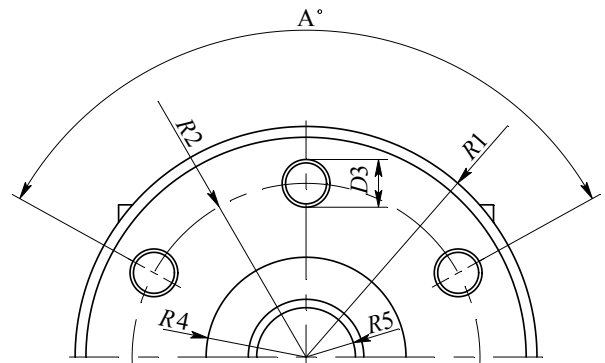
б)

**Рис. 1. 3D модель корпуса запорной арматуры:**  
а – исходная САПР модель; б – полумодель в ReplicatorG

Для оценки размерной точности были выбраны параметры, которые демонстрируются на рис. 2, в качестве контрольных размеров были выбраны радиусы полумодели:  $R1-R5$  и их взаимное расположение относительно центра и угла  $A^\circ$ . Для проходного сечения  $R5$  в модели была создана поддержка в виде специальной сетки, для отверстий  $D3$  поддержка не предусматривалась.

Важной особенностью для изготовления литейных моделей является то, что в качестве базы рекомендуется использование плоскости разъема отливки (назначение дополнительных баз не рекомендуется), а для механической обработки, как правило, используются другие базовые плоскости. Данное противоречие может приводить к нерациональному использо-

ванию металла по причине назначения лишних припусков на механическую обработку.



**Рис. 2. Выбранные контролируемые размеры полумодели корпуса клапана**

Практический интерес вызывает способ размещения печатаемой модели на столе, в том числе выбор плоскости разъема и организация слоев поддержки для отверстий различного диаметра.

### Применяемые материалы и методы решения задачи

Низкая температура плавления, биоразлагаемость, стабильность при изготовлении готовых моделей, легкая механическая обработка полностью удовлетворяет требованию к изготавливаемым моделям. Структура PLA и ABS пластика представляет собой аморфное строение, что является преимуществом для получения гладкой поверхности или поверхности сложного рельефа [6].

Основным направлением работы было изучение размерной точности, качества поверхности [7] экспериментальных отливок и термодеструкции модельного материала, поскольку особенностью разработанного метода является то, что модель должна выжигаться расплавленным металлом.

Печать моделей осуществлялась на принтере Makerbot Replicator 2 методом FDM, т.е. послойного нанесения расплавленного строительного материала через экструдер. Согласно классификации ASTM International данный метод относится к категории Material Extrusion. В качестве слайсера (программное обеспечение для конвертации трехмерной модели в набор команд движения печатающей головки принтера) использовался ReplicatorG (свободно-распространяемое программное обеспечение).

В данном исследовании применялись методы визуального и измерительного контроля

напечатанных моделей, обобщенные результаты были получены при нескольких итерациях для разных режимов печати, в качестве модельного материала использовались как PLA так и ABS пластики.

Для исследуемой корпусной отливки запорной арматуры, имеющей конструкцию в виде соединения 3–4 стенок различной толщиной в единый узел (см. рис.1) было предварительно выполнено компьютерное моделирование процесса затвердевания [8] с выявлением дефектов усадочного происхождения.

Конструкция такого сложного узла, как правило, определяется только прямыми экспериментами, поскольку толщины стенок и радиусы соединительных переходов между ними невозможно рассчитать как аналитическими методами, так и методами компьютерного моделирования.

Требуемый результат печати был получен при следующих настройках печати принтера: толщина наплаваемого слоя 0,15 мм; плотность заполнения внутренних стенок 10 %. Температура плавления PLA установлена 230 °С, для ABS – 250 °С. Подогрев стола – 100 °С. Время печати половины модели для обоих типов пластика составило около 180 мин.

Для формирования внутренней полости деталь корпуса печаталась из двух частей, для сопряжения полумоделей (рис. 3) базовая плоскость подверглась механической обработке наждачной бумагой P160 с помощью шлифовальной машины.



Рис. 3. Сборка полумоделей напечатанной модели корпуса

Огнеупорный слой наносился в два этапа: первый этап – заполнение внутренней полости (рис. 4), второй этап – создание оболочковой формы (рис. 5). Внутренняя полость была заполнена смесью на основе кварцевого песка тонкого помола и гипсового связующего в одинаковой пропорции, вода добавлялась для обеспечения пластичности смеси. Через 24 ч

стержень полностью затвердел.



Рис. 4. Набивной стержень



Рис. 5. Модель с нанесенным огнеупорным покрытием

Внешний огнеупорный слой на основе кварцевого песка и органического связующего наносился методом окунания в два слоя, с промежуточной сушкой в 12 ч. Оба пластика имеют хорошую адгезию с огнеупорным слоем покрытия, случаев отслоения или разрушения огнеупорного слоя не было выявлено.

#### Изучение свойств термодеструкции модельного материала

Важной особенностью разработанной технологии является возможность непосредственно удаления ABS и PLA модели за счет воздействия высокой температуры расплавленного металла. Температура начала горения обоих пластиков начинается с отметки в ~ 395 °С, при этом процесс имеет максимальную интенсивность при температуре > 425 °С и сопровождается выделением газов. Продукты термодеструкции PLA пластика считаются безвредными, ABS пластик частично выделяет ядовитые вещества.

В данной работе исследовались скорости горения материалов модели по методике, сходной с ГОСТ 28157-89 «Пластмассы. Методы определения стойкости к горению», поскольку медленная газификация может при-

вести к неудовлетворительной заполняемости формы жидким металлом и, как следствие, формированию газовых раковин или газовой пористости в будущей отливке за счет растворения газа в металле.

Методика эксперимента заключалась в интенсивном температурном воздействии на ABS и PLA пластик с измерением скорости горения и выявлением остаточных продуктов. При этом использовалась стандартная проволока для печати диаметром 1,75 мм. Скорость термодеструкции исследовалась по кинетическому перемещению фронта горения при условии устойчивого горения материала. Скорость горения PLA нити составила 2,25 мм/с, а ABS нити – 3,35 мм/с. С увеличением температуры скорость горения будет пропорционально возрастать, но из полученных измере-

ний можно сделать вывод о низкой скорости термодеструкции пластиков.

### Визуальная и инструментальная оценка выбранных параметров

Послойное нанесение материала вызывает неравномерное охлаждение, которое приводит к короблению печатаемой детали. При сопряжении частей модели это подтвердилось – оба пластика требуют механической обработки в плоскости сопряжения.

Линейные размеры печатаемой детали увеличиваются относительно чертежа (табл.), это связано с настройками программного обеспечения (слайсера) при конвертации 3D-чертежа [9] в программный код для принтера и ширины наплавляемой нити при печати слоя.

Отклонения реальных размеров модели от заданных по чертежу в процентах в соответствии с ГОСТ Р 53464–2009

Контролируемый параметр модели	Отклонения модель (PLA), %	Отклонения модель (ABS), %	Требуемый класс размерной точности (приложение А, ГОСТ Р 53464–2009)	Полученный класс размерной точности модели
Длина корпуса	<±1%	<±1%	5÷9	Не менее 9
Толщина фланца корпуса	<±1,5%	<±1,5%		
Диаметр фланца корпуса R1	<1%	<1%		
Диаметр расположения отверстий (D3) во фланце R2	По горизонтали <1%	По горизонтали <1%		
	По вертикали <1,5%	По вертикали <1%		
Диаметр отверстий D3	По горизонтали <1%	По горизонтали <1%		
	По вертикали 1<2,0%	По вертикали 1<1,5%		
Диаметр фланца R4	<1%	<1%		
Диаметр проходного сечения корпуса – R5	С подложкой <1%	С подложкой <1%		
	Без подложки <1,5%	Без подложки <1,5%		
Угол между осями отверстий - A°	<±0.5°	<±0.5°		
Параллельность фланцев	<±0.5°	<±1.0°		
Перпендикулярность центрального фланца к оси проходного сечения	<±1.0°	<±1.0°		
Шероховатость модели	12,5 Ra	12,5 Ra	9	9
	При обработке дихлорметаном 6.3 Ra			

Отверстия обладают как непрямолинейностью, так и неплоскостностью. Визуальный контроль показал, что отверстия, напечатанные по линии радиуса, имеют преимущественно отклонения в плоскости, а отверстия, напечатанные перпендикулярно оси – откло-

нения прямолинейности.

### Обсуждение результатов

Авторы в работе [10] столкнулись с проблемой размерной точности напечатанных

моделей, которые предназначались для литых насадок буровой головки. При этом модели подгонялись «по месту» за несколько итераций, поскольку только в процессе изготовления выяснилось, что требования к размерной точности отливок являются более жесткими, а геометрия напечатанных моделей требовала дополнительной механической обработки, объем которой не был учтен при проектировании.

В работе [11] представлена экспериментальная оценка точности моделей в зависимости от ее габаритных линейных размеров. В качестве номинальных размеров принимались 2, 6, 18 и 54 мм, а отклонения фиксировались по положению печатающей головки в трех плоскостях ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ). Здесь основной гипотезой о нарушении размерной точности принимались отклонения, которые постепенно накапливаются за счет перемещения головки и механической ошибки принтера. Также, как и в данной работе, использовались два вида пластика для печати.

В работе [12] дополнительно проанализированы режимы печати, т.е. толщина единичного слоя и скорость перемещения головки в аспекте усадки пластика для различных способов расположения модели на столе.

Общие замечания по нарушению размерной точности можно представить в следующем виде:

- по вертикальному направлению  $Z$  происходит усадка пластика, как в центральной части модели, так и по краям, что вызвано, скорее всего, неверным режимом подогрева стола и температуры внутри камеры;

- в горизонтальном направлении нарушение размерной точности не зависит от габаритов модели, а связано только с ее фактической геометрией и рельефом.

### Выводы и практические рекомендации

Было установлено, что технология FDM с использованием в качестве строительного материала PLA и ABS пластика может быть использована для быстрого изготовления моделей отливок, имеющих сложную геометрию без предварительного производства модельной оснастки. При этом размерная точность отливок может соответствовать 9 – 11 классу точности в соответствии с ГОСТ Р 53464–2009. Техничко-экономические аспекты изготовления подобных моделей по АТ описаны в работе [13].

Вероятность коробления можно предотвра-

тить путем выбора оптимальных параметров подогрева стола, сохранять тепло внутри рабочей камеры принтера и для повышения адгезионных свойств наносить специальные составы на стол перед печатью.

PLA пластик имеет большую склонность к короблению на начальных слоях, чем ABS. Нанесение специальной сетки с шагом 0,5...1,0 мм перед начальным слоем снижает коробление привалочной плоскости. Данный слой подлежит механическому удалению, что также способствует выравниванию плоскости для дальнейшего сопряжения полумоделей.

Размещать деталь на столе рекомендуется широким элементом вниз, так как для всех выступающих элементов будет необходима поддержка. Чем больше поверхность сопряжения детали со столом, тем меньше вероятность отрыва и коробления при охлаждении нижних слоев относительно верхних.

На изготовленных моделях необходимо проверять отклонения размеров и формы от заданных. Особое внимание следует уделять геометрическим размерам отверстий, а так же их относительному расположению.

Использование разного программного обеспечения (слайсеров) приведет к рассеиванию размеров модели.

Густой огнеупорный раствор имеет свойство растрескивания при высыхании, очевидно, что это связано с адгезионными свойствами PLA.

Проблема низкой скорости термодеструкции пластиков может быть решена за счет увеличения температуры заливки на 10...15 °С; использования открытого литникового канала увеличенного диаметра (до 20 %) по площади поперечного сечения; увеличения времени заливки формы; применения открытых выпоров для удаления продуктов горения.

Выполнять работы необходимо в хорошо проветриваемых помещениях. Горение PLA происходит относительно медленно, пластик переходит в жидкую фазу, затем интенсивно газифицируется без выделения едких веществ. ABS пластик горит более активно, переходит в жидкую фазу и газифицируется, выделяя в воздух едкие вещества и частицы сажи.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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 // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005. Vol. 25. № 3–4. Pp. 308–320. (doi: 10.1007/s00170-003-1840-6)



REFERENCES

2. Агаповичев, А.В., Балякин, А.В., Смелов, В.Г., Вдовин, Р.А. Разработка методики литья из жаропрочных сплавов сложных деталей малоразмерных газотурбинных двигателей с применением аддитивных технологий // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. – 2014. – № 5-3 (47). – С. 19–25.

3. Селезнев, В.А. Изготовление мастер-моделей для литья в песчаные формы // Литейное производство. – 2014. – № 6. – С. 37–40.

4. Белов, В.Д., Колтыгин, А.В., Белов, Н.А., Плисецкая, И.В. Инновации в области литейных магниевых сплавов // Металлург. – 2010. – № 5. – С. 67–70.

5. Назаров, А.П., Окунькова, А.А. Типовые образцы изделий, получаемых методом селективного лазерного спекания // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 3. №1 (67). – С.76–83.

6. Попова, Е.И. Исследование погрешностей изготовления спироидных колес из различных конструкционных пластиков // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 1 (23). – С. 70–72.

7. Безпальчук, С.Н., Буцанец, А.А., Петров, В.М. Обобщенная модель состояния качества поверхности ответственных деталей судовых энергетических установок, выполненных из композиционных углепластиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2015. – № 1 (29). – С. 97–102.

8. Ol'khovik E., Butsanets A., Ageeva A. Use of the distributed computing at hecastings solidification simulation // 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). IEEE, 2015. Pp. 1–4. (doi: 10.1109/MEACS.2015.7414905)

9. Митраков, Г.Н., Сазонов, В.С., Полякова, А.В., Аникин, И.С. Повышение эффективности литья по выплавляемым моделям при использовании аддитивных технологий // Омский научный вестник. – 2015. – №140. – С. 85–87.

10. Altaf K., Rani A.M., Woldemichael D.E., Lemma T.A., Jian C.Z., Fiqri M.H. Application of Additive manufacturing/3D Printing Technologies and Investment Casting for Prototype Development of Polycrystalline Diamond Compact (PDC) Drill Bit Body // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11.No. 10. Pp. 6514–6518.

11. Dimitrov D.M., Beer N.De. Improvements in the capability profile of 3-D printing: An update //South African Journal of Industrial Engineering. 2014. Vol. 25.No. 2. Pp. 1–12.

12. Ol'khovik E., Butsanets A., Ageeva A. Use of additive technologies for practical working with complex models for foundry technologies // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.2016. Vol. 140.No. 1.Pp. 012013.(doi:10.1088/1757-899X/140/1/012013)

13. Моргунов, Ю.А., Саушкин, Б.П. Технико-экономические аспекты аддитивного формообразования // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – № 7 (61). – С. 28–35.

1. 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 //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2005. Vol. 25. № 3–4. Pp. 308–320. (doi: 10.1007/s00170-003-1840-6)

2. Agapovichev, A.V., Balyakin, A.V., Smelov, V.G., Vdovin, R.A. Procedure development for complex parts casting of heat-resistant alloys for small dimension gas turbine engines using additive technologies // Bulletin of Korolyov State Aerospace University of Samara. – 2014. – № 5-3 (47). – pp. 19–25.

3. Seleznyov, V.A. Master-pattern production for casting in sand molds // Foundry. – 2014. – № 6. – pp. 37–40.

4. Belov, V.D., Koltugin, A.V., Belov, N.A., Plisetskaya, I.V. Innovations in field of castable magnesium alloys // Metallurgist. – 2010. – № 5. – pp. 67–70.

5. Nazarov, A.P., Okynkova, A.A. Standard samples of products manufactured through selective laser sintering // Bulletin of Saratov State Technical University. – 2012. – Vol. 3. №1 (67). – pp.76–83.

6. Popova, E.I. Error investigations in manufacturing spiroid wheels made of different engineering plastics // Intelligence Systems in Production. – 2014. – № 1 (23). – pp. 70–72.

7. Bezpalchuk, S.N., Butsanets, A.A., Petrov, V.M. Generalized model of surface quality state in critical parts of ship power units made of composite carbon-plastics // Bulletin of Makarov State University of Navy and Inland Water Transport . – 2015. – № 1 (29). – pp. 97–102.

8. Ol'khovik E., Butsanets A., Ageeva A. Use of the distributed computing at hecastings solidification simulation // 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). IEEE, 2015. Pp. 1–4. (doi: 10.1109/MEACS.2015.7414905)

9. Mitrakov, G.N., Sazonov, V.S., Polyakova, A.V., Anikin, I.S. Casting efficiency increase on melted patterns using additive technologies // Omsk Scientific Bulletin. – 2015. – №140. – pp. 85–87.

10. Altaf K., Rani A.M., Woldemichael D.E., Lemma T.A., Jian C.Z., Fiqri M.H. Application of Additive manufacturing/3D Printing Technologies and Investment Casting for Prototype Development of Polycrystalline Diamond Compact (PDC) Drill Bit Body // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11.No. 10. Pp. 6514–6518.

11. Dimitrov D.M., Beer N.De. Improvements in the capability profile of 3-D printing: An update //South African Journal of Industrial Engineering. 2014. Vol. 25.No. 2. Pp. 1–12.

12. Ol'khovik E., Butsanets A., Ageeva A. Use of additive technologies for practical working with complex models for foundry technologies // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.2016. Vol. 140.No. 1.Pp. 012013.(doi:10.1088/1757-899X/140/1/012013)

13. Morgunova, Yu.A., Saushkin, B.P. Engineering-economic aspects of additive shaping // Science intensive Technologies in Mechanical Engineering. – 2016. – № 7 (61). – pp. 28–35.

Рецензент д.т.н. В.Д. Белов