

УДК 629.5.01

doi: 10.18698/0536-1044-2022-7-24-32

Отклонения геометрических параметров составных частей маломерного судна, полученных с помощью аддитивных технологий

А.В. Дектярев¹, П.Г. Зобов², Г.Р. Дзюнин², В.Н. Морозов¹

¹ ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»

² Институт судостроения и морской арктической техники

Geometry Deviations of the Small Vessel Components Obtained Using Additive Technologies

A.V. Dektyarev¹, P.G. Zobov², G.R. Dzyunin², V.N. Morozov¹

¹ Kaliningrad State Technical University

² Institute of Shipbuilding and Marine Arctic Technology

В настоящее время недостаточно данных о накапливающейся ошибке геометрических параметров крупногабаритных объектов, полученных методом склеивания по частям. В качестве крупногабаритного объекта, созданного FDM-методом, выбран корпус маломерного судна «Нерль». На примере тестовых образцов цилиндрической формы и склеенных из них деталей измерены отклонения диаметра по взаимно перпендикулярным плоскостям и высот склеенных изделий. Определено поле допуска на клееные изделия из полилактида. Выданы рекомендации по проектированию крупногабаритных изделий при печати FDM-методом. Описаны причины появления отклонений геометрических параметров одиночных и склеенных деталей. Рассмотрены основные недостатки FDM-метода, связанные с точностью изготовления. Факторы, влияющие на точность изготовления деталей FDM-методом, подразделены на три группы. Первая связана с параметрами материала изделия (коэффициентом термического расширения, равномерностью прутка и гигроскопичностью), вторая — с его конструктивным исполнением (кратностью линейных размеров высоте слоя и шагу мотора, параметрами заполнения, наличием и размером нависающих элементов), третья — с особенностями аддитивной установки (калибровкой по осям X, Y и Z, калибровкой привода экструзии, конструкцией узла экструзии, ускорением и скоростью перемещений и диаметром сопла). Выяснено, что при подготовке производства 3D-печати крупногабаритного объекта методом склеивания по частям, например, корпуса маломерного судна, необходимо дополнительно учитывать численные параметры слоев клеевых соединений.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, точность изготовления, поле допуска, клееные изделия из полилактида, построечные элементы

Currently, there is not enough data on the cumulative error in the geometric characteristics of large-sized objects assembled using the technology of gluing in parts. The hull of the small vessel "Nerl" was chosen as a large-sized object created by the FDM method. The deviations of the diameter along mutually perpendicular planes and the heights of the glued products were measured on the example of test specimens of a cylindrical shape and gluings from them. The field of tolerance for glued products made of polylactide was determined. Recommendations for designing large-sized products when printing in parts by the FDM method were issued. The causes for the appearance of geometric deviations of single parts

and gluings are described. The main disadvantages of the FDM method related to manufacturing accuracy are considered. Causes of geometric deviations are divided into three groups. The first is related to the parameters of the product material (thermal expansion coefficient, uniformity of the rod and hygroscopicity), the second is related to its design (multiplicity of linear dimensions, layer height and motor pitch, filling parameters, the presence and size of overhanging elements), the third is related to the features of the additive installation (calibration along the X, Y, and Z axis, extrusion drive calibration, extrusion unit design, acceleration and travel speed, and nozzle diameter). It was found that preparing the production of 3D printing of a large-sized object using the technology of gluing in parts, for example, the hull of a small vessel, it is necessary to additionally take into account the numerical parameters of the layers of adhesive joints.

Keywords: additive technologies, 3D printing, manufacturing precision, tolerance field, glued polylactide products, building elements

Аддитивные технологии (АТ) позволяют изготавливать детали со сложной геометрией, что значительно снижает трудоемкость и затраты. Однако уже несколько лет в АТ не происходит фундаментальных изменений. Основные направления работ, связанных с АТ, сводятся к стандартизации, опытной эксплуатации и доведению технологий до стабильного состояния [1].

Одним из сдерживающих факторов внедрения АТ служит ограничение получаемых деталей по максимальным габаритным размерам. Известен опыт создания аддитивных установок больших размеров, способных выполнять печать крупногабаритных конструкций [2–4], причем как отдельных частей корпусов маломерных судов [5], так и полностью законченных изделий [6]. Однако стоимость и габаритные размеры таких АТ велики, что ограничивает их внедрение на судостроительных предприятиях.

Другим подходом к решению проблемы ограниченных габаритных размеров является отработка технологии склеивания деталей. Среди опытных работ по созданию клеевых смесей и крупногабаритных составных изделий можно выделить модель маломерного судна для испытания в опытовом бассейне [7, 8], корпус маломерного судна типа байдарки «Нерль» и клеевой состав для изделий из полилактида [9].

Анализ этих работ позволяет сделать вывод о практической возможности получения крупногабаритных клеевых изделий из полилактида путем печати FDM-методом. Основной проблемой таких объектов является точность их изготовления. На каждом технологическом этапе (печать, сборка, склеивание) возникают дополнительные отклонения от расчетных геометрических параметров.

При этом очень важной величиной остается поле допуска на итоговое изделие. Благодаря исследованию проблем точности изготовления одиночных деталей и клеевых составных изделий формируется база данных для их конструкторской проработки с учетом недостатков АТ, что является одним из последних этапов ее внедрения как стандартной общепринятой технологии.

Опыт прошлых работ показывает, что при небольшом количестве деталей в склейке и качественной постобработке возможно выполнение строгих требований, предъявляемых к точности изготовления [7]. Так, при печати модели маломерного судна типа байдарки «Нерль» в масштабе 1:5, состоящей из пяти деталей, удалось соблюсти требования ИТТС [10, 11] к точности изготовления моделей для опытовых бассейнов.

Однако при увеличении количества деталей в склейке и невозможности постобработки этот вопрос остается проблемным. Так, при сборке крупногабаритных корпусных конструкций, содержащих более 8...10 деталей на блок (при общем количестве блоков — 31), возникают значительные отклонения геометрических параметров, затрудняющие дальнейший монтаж. Проявляется так называемая накапливающаяся ошибка 3D-печати.

Пример шпангоута маломерного судна «Нерль», напечатанного по частям с проявлением накапливающейся ошибки, показан на рис. 1, а, пример блока форштевня — на рис. 1, б. В области палубы наблюдается отклонение геометрических параметров, затрудняющее стыковку последней детали шпангоута со смежными (соседними) деталями. Аналогичные проблемы известны и в смежных отраслях за рубежом [12].

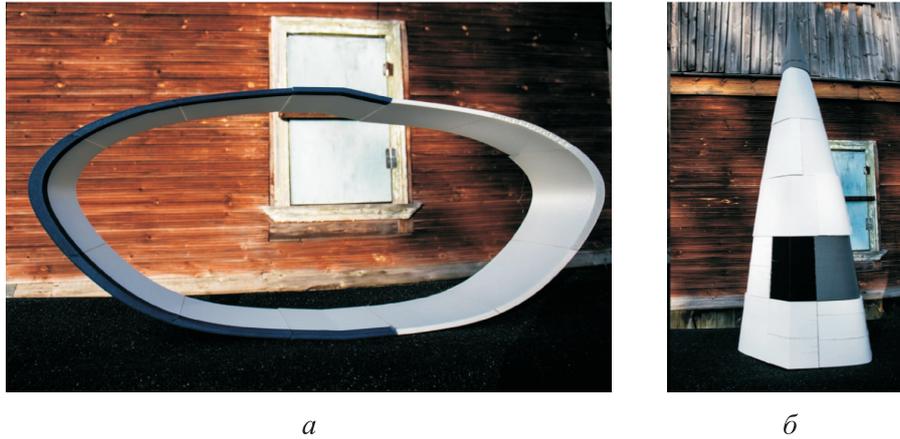


Рис. 1. Примеры крупногабаритных клееных изделий с проявлением накапливающейся ошибки: а — шпангоута маломерного судна «Нерль»; б — блоков форштевня

Цель работы — воспроизведение отклонений геометрических параметров составных частей (построечных элементов) корпуса маломерного судна «Нерль», полученных FDM-методом из полилактидного прутка, путем имитации печати и сборки на примере тестовых образцов цилиндрической формы и склеенных из них деталей для выявления накапливающейся ошибки, позволяющей их учитывать.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Криволинейные корпусные конструкции шпангоутов сложны для измерений, поэтому физику процесса можно воспроизвести на более простой геометрической форме. В качестве объекта исследования выбраны десять специально подготовленных образцов цилиндрического вида. Проведен их размерный контроль и составлены поля допуска.

В процессе изготовления образцов G-Code и настройки стола оставались неизменными. После печати образцов их диаметры измеряли штангенциркулем (с погрешностью $\pm 0,1$ мм) и помечали их расположение относительно системы координат аддитивной установки.

Затем образцы склеивали между собой парно (первый со вторым, третий с четвертым и т. д.), получая пять деталей. Их высоту также измеряли штангенциркулем.

Расчетную номинальную высоту склеенной детали определяли по формуле

$$H = h_1 + h_2 + s = 20,3 \text{ мм},$$

где h_1 и h_2 — номинальная высота первой и второй детали; s — толщина склеивающей смеси, принятая равной 0,3 мм.

Результаты исследования. Результаты измерения — значения диаметров образцов D_x и D_y по взаимно перпендикулярным плоскостям, проходящим через оси X и Y , приведены в табл. 1, значения высоты клееных деталей — в табл. 2, где КР — контрольный размер.

Таблица 1

Значения диаметров образцов

Номер образца	D_x , мм	D_y , мм
1	25,1	25,0
2	25,3	25,1
3	25,0	25,2
4	24,9	24,9
5	25,0	25,0
6	24,9	25,0
7	25,2	25,1
8	25,1	24,9
9	25,0	24,8
10	25,1	24,8
КР	25,0	25,0

Таблица 2

Значения высоты склеенных деталей

Номер склеенной детали	H , мм	Номер склеенной детали	H , мм
1	18,3	4	18,8
2	18,6	5	18,9
3	18,5	КР	20,3

Обсуждение результатов исследования. Анализ полученных результатов показал, что реальный размер склеенных деталей существенно меньше расчетного номинального значения. Предельное верхнее отклонение при усадке от номинального значения составило 1,4 мм, предельное нижнее — 2,0 мм, поле допуска — 0,6 мм.

Поля допуска образцов (0,5 мм) и склеенных деталей (0,6 мм) различаются в пределах погрешности прибора ($\pm 0,1$ мм). С учетом толщины склеивающей смеси (0,3 мм) усадка составила 1,8 мм, без ее учета — 1,5 мм (рис. 2).

Таким образом, в проектировании составных изделий из деталей, полученных FDM-методом из полилактида, следует учитывать усадку 1,8 мм для каждого клевого соединения.

Причины возникновения отклонений геометрических параметров отдельных деталей описаны в работах [12–14]. Факторы, влияющие на точность изготовления деталей FDM-методом, приведены в табл. 3.

Факторы, связанные с материалом детали, различаются в зависимости от вида термопласта, качества его изготовления и условий хранения [15].

Коэффициент теплового расширения. Термопласт, как и любой материал, имеет коэффициент теплового расширения, что приводит к изменению линейных размеров изделий, полученных FDM-методом вследствие их усадки при остывании. У разных типов термопластов значения этого коэффициент могут значительно отличаться друг от друга.

Равномерность прутка. В большинстве аддитивных установок используется стандартный пруток термопласта диаметром 1,75 мм.

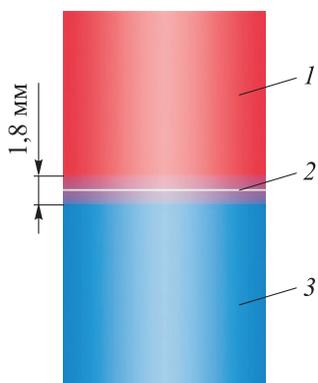


Рис. 2. Схема склеивания образцов: 1 и 3 — первый и второй образец; 2 — плоскость склейки

Таблица 3
Факторы, влияющие на точность изготовления деталей FDM-методом

Сфера влияния фактора	Факторы
Материал детали	Коэффициент теплового расширения, равномерность прутка, гигроскопичность
Конструкция детали	Кратность линейных размеров высоте слоя, кратность линейных размеров шагу мотора, наличие полостей, параметры заполнения, наличие и размер нависающих элементов
Аддитивная установка	Калибровка осей X, Y, Z, калибровка привода экструдера, конструкция узла экструдера, ускорение и скорость перемещения, диаметр сопла

Исходя из этого параметра, программа-слайсер проводит расчет объема термопласта. Однако реальный пруток часто имеет переменный диаметр. Встречаются прутки с отклонением диаметра до 1,6 мм, что вызывает снижение объема подачи термопласта в область построения на 16 % [16].

Гигроскопичность. Точность печати изделий из термопластов также зависит от содержания воды в прутке. Вследствие разной теплоемкости охлаждения полимера может идти неравномерно, вызывая местные коробления отдельных нитей. Кроме того, гигроскопичность может влиять на местные дефекты внутренней решетки изделия, вызывая провалы стенок или нависающих поверхностей.

Факторы, связанные с конструкцией детали. **Кратность линейных размеров изделий параметрам машины.** Высота слоя и диаметр сопла экструдера оказывают прямое влияние на точность изготовления изделий. Так, невозможно напечатать элементы, линейные размеры которых меньше диаметра сопла или высоты слоя.

Если линейный размер элементов детали нельзя разделить на целое число высот слоя, то решение о корректировке размера будет принимать программа-слайсер, которая может уменьшить или увеличить высоту детали.

Кратность линейных размеров шагу мотора. На первых общедоступных аддитивных ма-

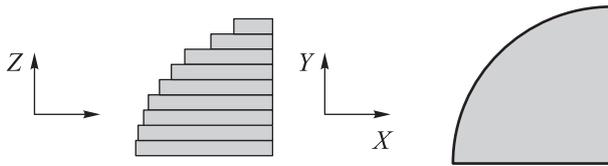


Рис. 3. Схема переориентирования деталей по осям X и Y

шинах достаточно большую погрешность вносили шаговые моторы вследствие дискретности их работы и невозможности точной установки сопла в нужную позицию. В настоящее время аддитивные машины поддерживают работу в режиме дробного шага, что позволяет свести ошибку позиционирования со стороны шагового мотора к минимуму.

Для исключения паразитных эффектов в направлении оси Z (так называемой лестницы) следует переориентировать деталь так, чтобы угловые поверхности не лежали на этой оси, как показано на рис. 3.

Полости и параметры заполнения. Наличие в детали тонких стенок и полостей может вызывать неравномерную усадку.

Также различаются геометрические параметры изделий с неодинаковыми процентными установками и конфигурациями заполнения. На основе опыта предыдущих работ сделан вывод, что заполнение типа 3D Honeycomb вызывает наиболее равномерную усадку детали по всем направлениям.

Наличие и размер нависающих элементов. Нависающие элементы, как правило, невозможно построить без поддержек [17]. Поддержки, являясь в процессе печати частью детали, участвуют в термической усадке, что вносит дополнительные геометрические искажения [18]. Для получения наилучших результатов рекомендуется проектировать изделия, не требующие поддержек при печати (рис. 4).

Факторы, связанные с аддитивной установкой. Калибровка осей X , Y , Z . В рассматрива-

емом случае применен принтер с механикой, работающей в прямоугольной системе координат и имеющий три независимых привода осей X , Y , Z . Параметры осей X и Y можно рассматривать совместно.

К основным причинам геометрических искажений по осям X и Y относятся недостаточная точность изготовления, жесткость механики, провисание, люфт в приводных ремнях и шкивах, неправильная установка корректирующих коэффициентов.

Стандартный бытовой принтер требует ручной перекалибровки после 35...40 печатей. Ось Z следует рассматривать отдельно. В случае оси Z на печать влияет не только механика, но и установка платформы построения.

В настоящее время новые версии прошивок могут учитывать неточности в калибровке печатного стола, однако поверхности детали, соприкасающиеся с ним, все равно будут отражены с искажением при неправильной калибровке. Так, для сохранения параметров печати в случае использования стола с пружинной схемой подвески рекомендуется проводить калибровку после каждой десятой печати, либо каждый раз после простоя.

Калибровка привода и конструкция узла экструзии. Проблемы, связанные с узлом экструдера, приводят к геометрическим искажениям детали, аналогичным тем, которые вносит неравномерность прутка. В основном проблема заключается в неточности подачи термопласта, что вызывает разрывы в нитях заполнения и контура и может привести к искажению всех геометрических параметров.

С точки зрения конструктивного исполнения можно выделить две основные группы экструдеров — с прямой подачей и внешним приводом подачи. Первая конструкция обладает лучшими показателями точности подачи прутка, чем вторая, но из-за большей массы подвижного узла не позволяет проводить печать на высокой скорости.

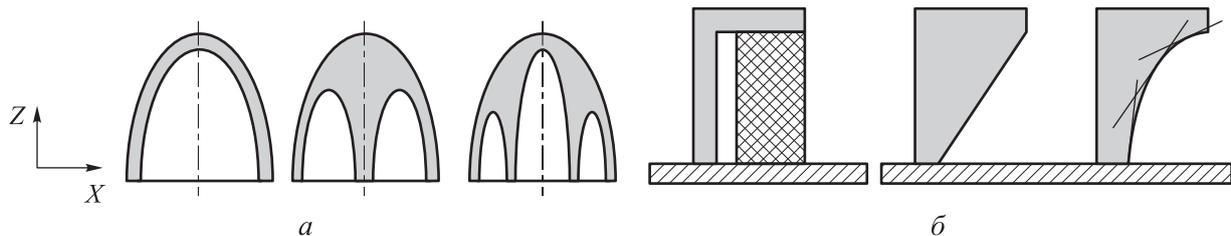


Рис. 4. Схемы переориентирования деталей:
а — по осям X и Y ; б — с соблюдением тангенциальности и углов построения

Вторая конструкция имеет посредственные показатели точности подачи прутка, часто вызывает деламинацию слоев вследствие неточной подачи, подтеки пластика из-за переподдачи и прочие виды искажений. Однако на сегодняшний день в экструдерах такого типа невозможно полностью решить проблемы с подачей.

Частичное решение проблемы заключается в точной настройке ретракта, хотя неравномерность искривления прутка в подающей трубке полностью исключить нельзя из-за непредсказуемости этого процесса [19].

Ускорение и скорость перемещения. Повышение скорости линейного перемещения печатной головки является простейшим способом ускорения процесса печати. Однако повышение этих параметров приводит к снижению точности позиционирования, «скруглению» острых углов и разрыву нитей заполнения. Максимально допустимая скорость, подбираемая для каждой аддитивной установки опытным путем, обычно не превышает 100...110 мм/с.

Диаметр сопла. При увеличении диаметра сопла растет скорость построения, однако любые элементы меньше этого диаметра не будут отражены. Также при печати следует учитывать дополнительный допуск, составляющий 0,5 диаметра сопла [19].

Дополнительные погрешности, зависящие от клеевого соединения. Появление усадки в клеевых изделиях объясняется свойствами клеевого состава, вызывающего размягчение поверхностных слоев детали. Сжатие деталей при склеивании приводит к взаимной диффузии материала деталей, чем и объясняется усадка.

Проектирование составных изделий с применением такой технологии требует учета

в каждой детали припуска 0,9 мм для каждого клеевого соединения, что в случае примененной установки можно учесть добавлением трех дополнительных слоев.

Выводы

1. Применение клеевых соединений является одним из способов, позволяющих обойти ограничения максимальных габаритных размеров изделий и задействовать в судостроительной отрасли относительно дешевые аддитивные установки. Так, использованная в данной работе технология применена для производства изделий размером более 1000 мм при стоимости оборудования в 8–10 раз дешевле [20], чем аддитивная установка с соответствующими габаритами поля печати.

2. Показано, что при печати крупногабаритных объектов из полилактида FDM-методом, в том числе корпусов маломерных судов, аналогичных по габаритным размерам корпусу маломерного судна «Нерль», необходимо дополнительно учитывать припуск 0,9 мм для каждого клеевого соединения. Также следует принимать во внимание указанные факторы возникновения отклонений в одиночных деталях.

3. Полученные данные позволяют учесть в конструкции деталей «жертвенных» слоев под усадку в результате склеивания. Отработка такой технологии в будущем позволит получать крупногабаритные полимерные изделия с помощью АТ со значительным снижением себестоимости производства относительно классической технологии печати одной цельной деталью.

Литература

- [1] Дектярев А.В., Морозов В.Н., Яфасов А.Я. Аддитивные технологии в судостроении: тенденции и правовое регулирование. *Морские интеллектуальные технологии*, 2019, № 4–4, с. 38–49.
- [2] Wu P., Wang J., Wang X. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Autom. Constr.*, 2016, vol. 68, pp. 21–31, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.005>
- [3] Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Procedia Eng.*, 2016, vol. 151, pp. 292–299, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>
- [4] Sakin M., Kiroglu Y.C. 3D printing of buildings: construction of the sustainable houses of the future by BIM. *Energy Procedia*, 2017, vol. 134, pp. 702–711, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.562>

- [5] Cortés Carmona A. *Estudio de la viabilidad de la tecnología de impresión 3d aplicada al sector de la construcción naval*. Bachelor's thesis. Universitat Politècnica de Catalunya, 2019. 84 p.
- [6] Stadler A.T., Schönauer M., Aslani R. et al. The impact of a flexible stern on canoe boat maneuverability and speed. *Biomimetics*, 2020, vol. 5, no. 1, art. 7, doi: <https://doi.org/10.3390/biomimetics5010007>
- [7] Зобов П.Г., Дектярев А.В., Морозов В.Н. Современные методы 3D-сканирования при размерном анализе судовых моделей с учетом их аддитивного изготовления. *Известия КГТУ*, 2019, № 53, с. 151–161.
- [8] Дектярев А.В., Зобов П.Г., Николаев И.И. и др. Опыт применения 3D-печати в судомоделизме при исследовании буксировочного сопротивления маломерного судна в условиях опытового бассейна. *Известия КГТУ*, 2019, № 54, с. 166–177.
- [9] Зобов П.Г., Дектярев А.В., Морозов В.Н. Новая формула клеевого соединения для изделий из полилактида. *Вестник молодежной науки*, 2020, № 1. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42765788>
- [10] Recommended procedures. Procedure 7.5-01-01-01. Rev. 01. ITTC. 23rd ITTC, 2002. URL: <https://www.ittc.info/media/1804/75-01-01-01.pdf> (дата обращения: 15.01.25022).
- [11] Resistance uncertainly analysis, example for resistance test. Procedure 7.5-02-02-02. Rev. 01. 23rd ITTC, 2002. URL: <https://itc.info/media/2021/75-02-02-02.pdf> (дата обращения: 15.01.25022).
- [12] Hernandez D.D. Factors affecting dimensional precision of consumer 3D printing. *Int. J. Aviat. Aeronaut. Aeros.*, 2015, vol. 2, no. 4, doi: <https://doi.org/10.15394/ijaaa.2015.1085>
- [13] Liu Z., Zhang M., Bhandari B. et al. 3D printing: printing precision and application in food sector. *Trends Food Sci. Technol.*, 2017, vol. 69-A, pp. 83–94, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.018>
- [14] Xia M., Nematollahi B., Sanjayan J. Printability, accuracy and strength of geopolymer made using powder-based 3D printing for construction applications. *Autom. Constr.*, 2019, vol. 101, pp. 179–189, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.013>
- [15] Chung M., Radacsi N., Robert C. et al. On the optimization of low-cost FDM 3D printers for accurate replication of patient-specific abdominal aortic aneurysm geometry. *3D Print. Med.*, 2018, vol. 4, no. 1, art. 2, doi: <https://doi.org/10.1186/s41205-017-0023-2>
- [16] Cardona C., Curdes A.H., Isaacs A.J. Effects of filament diameter tolerances in fused filament fabrication. *IUJUR*, 2016, vol. 2, no. 1, pp. 44–47, doi: <http://dx.doi.org/10.14434/iujur.v2i1.20917>
- [17] Shen Z.H., Dai N., Li D.W. et al. Bridge support structure generation for 3D printing. *Proc. MMTEI2015*, 2016, pp. 141–149, doi: https://doi.org/10.1142/9789813109384_0016
- [18] Jiang J., Lou J., Hu G. Effect of support on printed properties in fused deposition modelling processes. *Virtual Phys. Prototyp.*, 2019, vol. 14, no. 4, pp. 308–315, doi: <https://doi.org/10.1080/17452759.2019.1568835>
- [19] Alsoufi M.S., Alhazmi M.W., Suker D.K. et al. Experimental characterization of the influence of nozzle temperature in FDM 3D printed pure PLA and advanced PLA+. *AJME*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 45–60, doi: <https://doi.org/10.12691/ajme-7-2-1>
- [20] Дектярев А.В. О планировании и реализации проекта создания отдела (бюро) аддитивных технологий на АО «ПСЗ «Янтарь». *Морские интеллектуальные технологии*, 2020, № 3–1, с. 110–119, doi: <https://doi.org/10.37220/MIT.2020.49.3.014>

References

- [1] Dektyarev A.V., Morozov V.N., Yafasov A.Ya. Additive technologies in shipbuilding: trends and legal regulation. *Morskie intellektual'nye tekhnologii* [Marine Intellectual Technologies], 2019, no. 4–4, pp. 38–49. (In Russ.).
- [2] Wu P., Wang J., Wang X. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Autom. Constr.*, 2016, vol. 68, pp. 21–31, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.005>
- [3] Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Procedia Eng.*, 2016, vol. 151, pp. 292–299, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>

- [4] Sakin M., Kiroglu Y.C. 3D printing of buildings: construction of the sustainable houses of the future by BIM. *Energy Procedia*, 2017, vol. 134, pp. 702–711, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.562>
- [5] Cortés Carmona A. *Estudio de la viabilidad de la tecnología de impresión 3d aplicada al sector de la construcción naval*. Bachelor's thesis. Universitat Politècnica de Catalunya, 2019. 84 p.
- [6] Stadler A.T., Schönauer M., Aslani R. et al. The impact of a flexible stern on canoe boat maneuverability and speed. *Biomimetics*, 2020, vol. 5, no. 1, art. 7, doi: <https://doi.org/10.3390/biomimetics5010007>
- [7] Zobov P.G., Dektyarev A.V., Morozov V.N. Modern 3D-scanning methods for dimensional analysis of ship models taking into account their additive manufacturing. *Izvestiya KGTU [KSTU News]*, 2019, no. 53, pp. 151–161. (In Russ.).
- [8] Dektyarev A.V., Zobov P.G., Nikolaev I.I. et al. Experience of using 3D-printing in ship modeling while investigating towing resistance of a small-sized vessel in an experimental tank. *Izvestiya KGTU [KSTU News]*, 2019, no. 54, pp. 166–177. (In Russ.).
- [9] Zobov P.G., Dektyarev A.V., Morozov V.N. New formula of adhesion joint for polylactide parts. *Vestnik molodezhnoy nauki*, 2020, no. 1. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42765788> (in Russ.).
- [10] Recommended procedures. Procedure 7.5-01-01-01. Rev. 01. ITTC. 23rd ITTC, 2002. URL: <https://www.ittc.info/media/1804/75-01-01-01.pdf> (accessed: 15.01.25022).
- [11] Resistance uncertainly analysis, example for resistance test. Procedure 7.5-02-02-02. Rev. 01. 23rd ITTC, 2002. URL: <https://itc.info/media/2021/75-02-02-02.pdf> (accessed: 15.01.25022).
- [12] Hernandez D.D. Factors affecting dimensional precision of consumer 3D printing. *Int. J. Aviat. Aeronaut. Aeros.*, 2015, vol. 2, no. 4, doi: <https://doi.org/10.15394/ijaaa.2015.1085>
- [13] Liu Z., Zhang M., Bhandari B. et al. 3D printing: printing precision and application in food sector. *Trends Food Sci. Technol.*, 2017, vol. 69-A, pp. 83–94, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.018>
- [14] Xia M., Nematollahi B., Sanjayan J. Printability, accuracy and strength of geopolymer made using powder-based 3D printing for construction applications. *Autom. Constr.*, 2019, vol. 101, pp. 179–189, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.013>
- [15] Chung M., Radacsi N., Robert C. et al. On the optimization of low-cost FDM 3D printers for accurate replication of patient-specific abdominal aortic aneurysm geometry. *3D Print. Med.*, 2018, vol. 4, no. 1, art. 2, doi: <https://doi.org/10.1186/s41205-017-0023-2>
- [16] Cardona C., Curdes A.H., Isaacs A.J. Effects of filament diameter tolerances in fused filament fabrication. *IUJUR*, 2016, vol. 2, no. 1, pp. 44–47, doi: <http://dx.doi.org/10.14434/iujur.v2i1.20917>
- [17] Shen Z.H., Dai N., Li D.W. et al. Bridge support structure generation for 3D printing. *Proc. MMTEI2015*, 2016, pp. 141–149, doi: https://doi.org/10.1142/9789813109384_0016
- [18] Jiang J., Lou J., Hu G. Effect of support on printed properties in fused deposition modelling processes. *Virtual Phys. Prototyp.*, 2019, vol. 14, no. 4, pp. 308–315, doi: <https://doi.org/10.1080/17452759.2019.1568835>
- [19] Alsoofi M.S., Alhazmi M.W., Suker D.K. et al. Experimental characterization of the influence of nozzle temperature in FDM 3D printed pure PLA and advanced PLA+. *AJME*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 45–60, doi: <https://doi.org/10.12691/ajme-7-2-1>
- [20] Dektyarev A.V. On the planning and implementation of the project for the creation of the department (bureau) of additive technologies at "Yantar" Baltic shipbuilding plant. *Morskie intelektual'nye tekhnologii [Marine Intellectual Technologies]*, 2020, no. 3–1, pp. 110–119, doi: <https://doi.org/10.37220/MIT.2020.49.3.014> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 13.04.2022

Информация об авторах

ДЕКЛЯРЕВ Александр Владимирович — аспирант кафедры кораблестроения. ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» (236022, Калининград, Российская Федерация, Советский пр., д. 1, e-mail: nwasanches@mail.ru).

ЗОБОВ Павел Геннадьевич — заведующий лабораторией теории корабля и гидромеханики. Институт судостроения и морской арктической техники (164500, Северодвинск, Российская Федерация, ул. Капитана Воронина, д. 6, e-mail: pavelzobov98@mail.ru).

ДЗЮНИН Георгий Робертович — ассистент кафедры «Кораблестроение». Институт судостроения и морской арктической техники (164500, Северодвинск, Российская Федерация, ул. Капитана Воронина, д. 6, e-mail: g.dzjunin@nafu.ru).

МОРОЗОВ Владимир Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры кораблестроения. ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» (236022, Калининград, Российская Федерация, Советский пр., д. 1, e-mail: mvn3613@gmail.com).

Information about the authors

DEKTYAREV Alexander Vladimirovich — Postgraduate, Department of Shipbuilding. Kaliningrad State Technical University (236022, Kaliningrad, Russian Federation, Sovetsky Ave., Bldg. 1, e-mail: nwasanches@mail.ru).

ZOBOV Pavel Gennadievich — Head of the Laboratory of Ship Theory and Hydromechanics. Institute of Shipbuilding and Marine Arctic Technology (164500, Severodvinsk, Russian Federation, Kapitana Voronina St., Bldg. 6, e-mail: pavelzobov98@mail.ru).

DZYUNIN Georgy Robertovich — Assistant Lecturer, Department of Shipbuilding. Institute of Shipbuilding and Marine Arctic Technology (164500, Severodvinsk, Russian Federation, Kapitana Voronina St., Bldg. 6, e-mail: g.dzjunin@nafu.ru).

MOROZOV Vladimir Nikolaevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Shipbuilding. Kaliningrad State Technical University (236022, Kaliningrad, Russian Federation, Sovetsky Ave., Bldg. 1, e-mail: mvn3613@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Деклярев А.В., Зобов П.Г., Дзюнин Г.Р., Морозов В.Н. Отклонения геометрических параметров составных частей маломерного судна, полученных с помощью аддитивных технологий. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 7, с. 24–32, doi: 10.18698/0536-1044-2022-7-24-32

Please cite this article in English as:

Dektyarev A.V., Zobov P.G., Dzyunin G.R., Morozov V.N. Geometry Deviations of the Small Vessel Components Obtained Using Additive Technologies. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 7, pp. 24–32, doi: 10.18698/0536-1044-2022-7-24-32