

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 62-29

doi: 10.30987/2782-5957-2025-5-21-31

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕЛКОРАЗМЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ С ПОМОЩЬЮ КОМПОЗИТНОЙ 3D-ПЕЧАТИ

Сергей Борисович Перетятко<sup>1✉</sup>, Александр Васильевич Михайлюченко<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

<sup>2</sup> Акционерное общество «Опытное Конструкторское Бюро «Факел», Калининград, Россия

<sup>1</sup> sergej.peretyatko@klgtu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-3915-2137>

<sup>2</sup> mikhaylyuchenko.alex@gmail.com

### Аннотация

Целью исследования является проверка возможности изготовления мелкоразмерной технологической оснастки методом композитной 3D-печати пластиком с армированием углеродным непрерывным волокном.

Задача, решению которой посвящена статья: исследование влияния различных технологических процессов на механические свойства готового изделия, в том числе режимов отжига на прочностные характеристики изделия.

Методы исследования. Исследовались 5 групп образцов: первая группа печаталась без предварительной подготовки филамента, вторая группа - после сушки филамента, третья группа - после отжига деталей при температуре 135°C, четвертая группа с применением отжига в гипсе при температуре 250°C, и пятая группа, где проводились эксперименты с температурой отжига. Для проверки качества и прочности напечатанных деталей была выбрана методика проверки прочности на

изгиб, для чего использовалась электромеханическая универсальная испытательная машина СМТ-50. Новизна работы: выявлено влияние различных режимов обработки на прочность и межслойную адгезию композитного материала при изготовлении мелкоразмерной технологической оснастки.

Результаты исследования: разработана технология производства деталей мелкоразмерной технологической оснастки, аддитивным методом композитной 3D-печати пластиком РА6 с армированием углеродным непрерывным волокном (карбоном) с последующим отжигом образцов в гипсовой форме при температуре 200°C и временем выдержки 1 час.

Выводы: отжиг не увеличивает прочность детали, но улучшает межслойную адгезию.

**Ключевые слова** оснастка, 3D-печать, волокно, метод, технологии, машиностроение, промышленность.

Ссылка для цитирования:

Перетятко С.Б. Изготовление мелкоразмерной технологической оснастки с помощью композитной 3D-печати / С.Б. Перетятко, А.В. Михайлюченко // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 5. – С. 21-31. doi: 10.30987/2782-5957-2025-5-21-31.

Original article

Open Access Article

## PRODUCTION OF SMALL-SIZED JIGGING USING COMPOSITE 3D PRINTING

Sergey Borisovich Peretyatko<sup>1✉</sup>, Aleksandr Vasilyevich Mikhailyuchenko<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

<sup>2</sup> Experimental Design Bureau "Fakel", Kaliningrad, Russia

<sup>1</sup> sergej.peretyatko@klgtu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-3915-2137>

<sup>2</sup> mikhaylyuchenko.alex@gmail.com

### Abstract

The study objective is to test the possibility of manufacturing small-sized jigging using composite 3D

printing with plastic reinforced with continuous carbon fiber.

The task to which the paper is devoted is to study the influence of various production processes on the mechanical properties of a finished product, including annealing modes on the strength characteristics of the product.

Research methods. 5 groups of samples are studied: the first group was printed without preliminary preparation of the filament, the second group - after drying the filament, the third group - after annealing the parts at temperature of 135°C, the fourth group - using annealing in gypsum at temperature of 250°C, and the fifth group, where experiments with the annealing temperature were carried out. To check the quality and strength of the printed parts, a bending strength test method was chosen, for which CMT-50 electromechanical universal testing machine was used.

*Reference for citing:*

*Peretyatko SB, Mikhailyuchenko AV. Production of small-sized jiggings using composite 3D printing. Transport Engineering. 2025;5:21-31. doi: 10.30987/2782-5957-2025-5-21-31.*

## Введение

Машиностроение – это одна из ключевых отраслей промышленности, которая требует высокой точности и эффективности в производственных процессах. Применяя аддитивные технологии, можно быстро и экономически выгодно создавать детали сложной формы и конструкции. В современном мире необходимо чтобы идея могла превратиться в прототип за считанные часы. Таким образом, технологии 3D-печати становятся неотъемлемой частью современного производства, поддерживая стремление к эффективности и экономической целесообразности [1-7].

В современном машиностроении все больше требуется изделий с небольшим весом и размерами что требует для своего

## Эксперименты и методы

Композитная 3D-печать, основанная на использовании углеродных непрерывных волокон, представляет собой процесс создания деталей, в котором углеродные волокна пропитываются полимерным материалом и затем слоями наносятся на печатающую платформу. Этот процесс позволяет создавать детали с высокой прочностью, жесткостью и легкостью [8, 10-16]. При этом, дальнейшая постобработка может улучшить свойства напечатанного изделия [17].

Так как данную цангу планируется использовать для зажима металлических

прутов, то для повышения срока службы она была доработана. Непосредственная часть зажимных губок будет сменная и при помощи двух потайных винтов будет крепиться к основной части цанги (рис. 1б).

Research results: a technology is developed for the production of small-size jiggings parts using the additive method of composite 3D printing with PA6 plastic reinforced with continuous carbon fiber, followed by annealing of samples in gypsum form at temperature of 200°C and soaking time of 1 hour.

Conclusions: annealing does not increase the strength of the part, but improves the interlayer adhesion.

**Keywords:** jiggings, 3D printing, fiber, method, technology, mechanical engineering, industry.

производства мелкогабаритной технологической оснастки [8, 9]. Машиностроительная отрасль России активно использует оборудование, которое требует специализированной малогабаритной технологической оснастки из металла. Однако, не смотря на ряд преимуществ, в последние годы возникли значительные трудности с закупкой подобной оснастки из-за рубежа [8].

Целью данного исследования является проверка возможности изготовления мелкогабаритной технологической оснастки методом композитной 3D-печати пластиком с армированием углеродным непрерывным волокном, в частности изготовление цанги «HGB-TD20R» (рис. 1а).

Для печати использовался гибридный промышленный 5D-принтер, это пятиосевой FDM /FFF 3D принтер с возможностью армировать детали непрерывным углеродным волокном (карбоном). В этой версии принтера второй экструдер предназначен для нити 3K (3000 волокон), пропитанной полимерным связующим. Программное обеспечение от производителя принтера

позволяет формировать *GCODE* для пятиосевой печати в автоматическом режиме. Общий вид обработанной модели без

заполнения PA6 (оставлено только углеродное волокно на одном слое) представлен на рис. 1в.

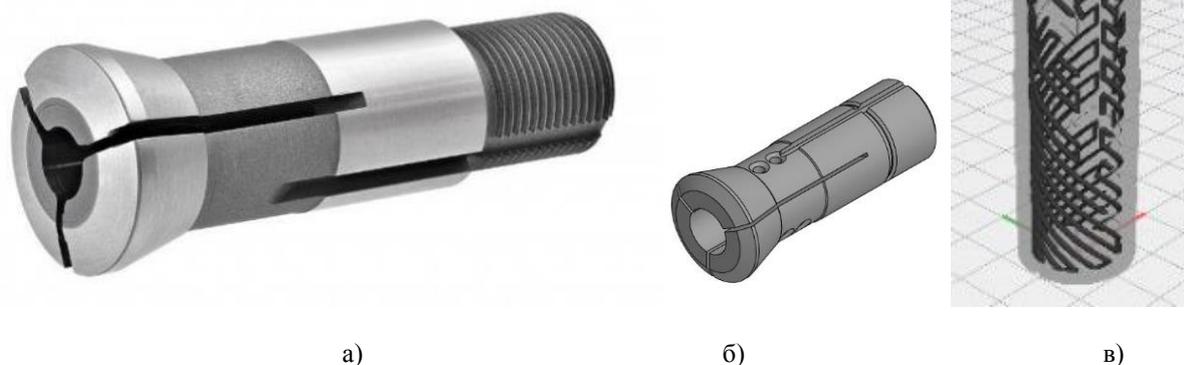


Рис. 1. Люнетная цанга *HGB-TD20R*: а – фото цанги, б – модель доработанной цанги, в – общий вид обработанной модели без заполнения нейлоном, оставлено только углеродное волокно на одном слое

*Fig. 1. Lunette collet HGB-TD20R: a - the original collet, b - the model of the modified collet, c - The general view of the model is without filling with nylon, leaving only carbon fiber on one layer*

Для проверки качества и прочности напечатанных деталей была выбрана методика проверки прочности на изгиб. Размер выбирался с опорой на ГОСТ Р 56810-2015, за исключением длины образца, так как по данной технологии планируется изготовления деталей небольшого формата до 100 мм. Размер образца: длина 55 мм, ширина 15 мм, толщина 5,5 мм.

Образцы по структуре являются композитами, состоящими из матрицы и наполнения. Наполнение – это непрерывное углеволокно с пропиткой из полиамида PA6. Матрица – это материал, окружающий армирование. Была выбрана следующая конфигурация образца:

По толщине: 10 слоев PA6, затем 10 слоев чередования армирующего слоя со слоем из PA6, затем снова 10 слоев PA6. Тем самым у полученного композита практически нет пустых пространств внутри, также обеспечивается максимальная площадь соприкосновения армирования с матрицей, что должно повысить прочность образца.

Сушка филамента производилась с применением электрошкафа сушильного.

Для проверки прочностных характеристик использовалась электромеханическая универсальная испытательная машина (50 кН) СМТ-50. Машина предназначена для измерения силы и деформации при испытаниях материалов на растяжение и сжатие.

Проводились проверки прочности на изгиб. Согласно ГОСТ Р 56810-2015 были произведены расчеты прочности при изгибе по формуле

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2},$$

где  $L$  – расстояние между опорами;  $F$  – максимальная сила, предшествующая разрушению;  $b$  – ширина образца;  $h$  – толщина образца.

Исследовались 5 групп образцов: первая группа печаталась без предварительной подготовки филамента, вторая группа – после сушки филамента, третья группа – после отжига деталей при температуре 135 °С, четвертая группа с применением отжига в гипсе при температуре 250 °С, и пятая группа, где проводились эксперименты с температурой отжига.

## Обсуждение результатов экспериментов

**Группа 1.** Было изготовлено 5 образцов с присвоенными номерами от 1-1 до 1-5. Данные образцы печатались из материала без подготовки, а сразу из упаковки. Детали печатались с трудом так как в силу высокой гигроскопичности РА6, проходя через разогретый хотенд принтера влага внутри филомента вскипает что приводит к переэкструзии материала и неравномерности укладки. На рис. 2 представлены фотографии образцов при проведении испытаний. На рис. 3а представлен график нагружения образца 1-3. Результаты проверки прочно-

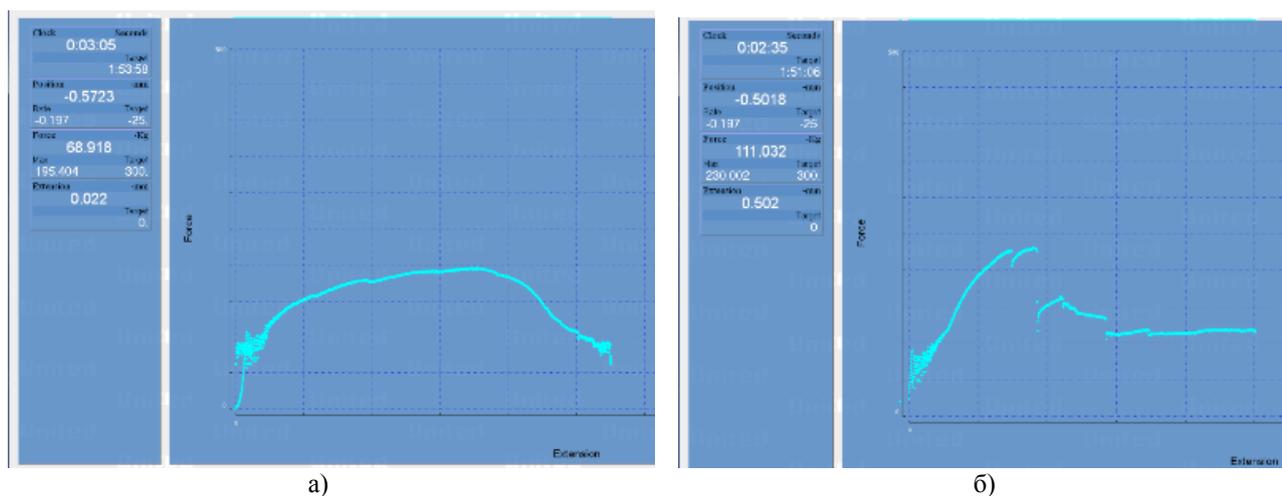
сти образцов на изгиб представлены в табл. 1.

**Группа 2.** Для улучшения качества образцов, филамент был высушен при температуре 70°C в течении 15 часов. Для предотвращения дальнейшей напитки влаги с атмосферы, филамент после просушки сразу помещался в дегидратор с силикагелем. Результаты проверки прочности на изгиб представлены в табл. 2. На рис. 3б представлен график нагружения образца 2-2. На рис. 4 представлено фото сломанного образца 2-3.



а) б)  
Рис. 2. Образцы при проведении испытаний: а – образец, установленный на испытательную машину, б – сломанный образец

*Fig. 2. Test samples: a - sample mounted on the testing machine, b - broken sample*



а) б)  
Рис. 3. Графики нагружения образцов: а – образец 1-3, б – образец 2-2

*Fig. 3 Graphs of loading of samples: a - sample 1-3, b - sample 2-2*

**Группа 3.** Для уменьшения внутренних напряжений, образованных во время изготовления, а также перестройки

кристаллической структуры образцы третьей группы были отожжены. Образцы были помещены в электрошкаф сушиль-

ный. Отжиг происходил при температуре в 135 °С в течении 2 часов после достижения заданной температуры. По истечению времени нагрев был отключен и образцы охлаждались до комнатной темпе-

ратуры вместе с электрошкафом сушильным. Результаты проверки прочности на изгиб представлены в табл. 3. На рис. 5 представлен график нагружения образца 3-1.

Таблица 1

Результаты проверки прочности образцов первой группы

Table 1

*Results of testing the strength of the first group samples*

Номер образца	Длина $l$ , мм	Толщина $h$ , мм	Ширина $b$ , мм	Максимальная сила $F$ , Н	Предел прочности на изгиб $\sigma$ , МПа
1-3	55	5,7	15,3	1912	317
1-4	55	5,5	15,2	1922	345
1-5	55	5,6	15,2	1735	300

Таблица 2

Результаты расчетов прочности образцов второй группы

Table 2

*Results of calculating the strength of the second group samples*

Номер образца	Длина $l$ , мм	Толщина $h$ , мм	Ширина $b$ , мм	Максимальная сила $F$ , Н	Предел прочности на изгиб $\sigma$ , МПа
2-1	55	5,45	15,3	2122	385,3
2-2	55	5,55	15,1	2256	400,1
2-3	55	5,5	15,1	2192	395,9
2-4	55	5,85	15,1	2148	342,9
2-5	55	5,4	15,1	2076	389,0



Рис. 4. Фото сломанного образца 2-3

Fig. 4. Photo of broken sample 2-3

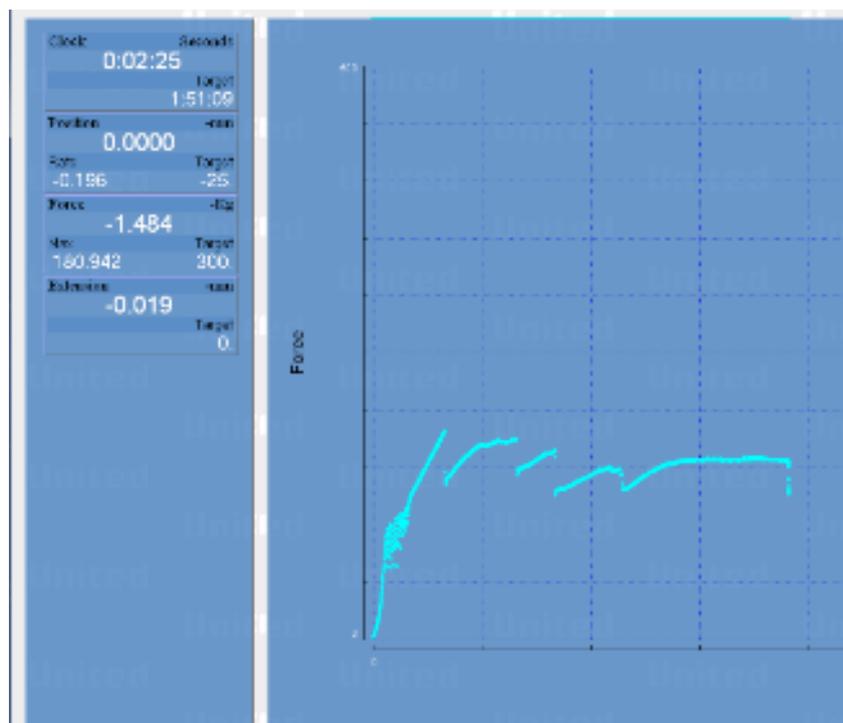


Рис. 5. График нагружения образца 3-1  
 Fig. 5. Loading graph of sample 3-1

Таблица 3

Результаты расчетов прочности образцов третьей группы

Table 3

Results of calculating the strength of the third group samples

Номер образца	Длина $l$ , мм	Толщина $h$ , мм	Ширина $b$ , мм	Максимальная сила $F$ , Н	Предел прочности на изгиб $\sigma$ , МПа
3-1	55,6	5,7	15,4	1774	298,9
3-2	55,5	5,6	15,2	1715	293,7
3-3	55,5	5,3	15,3	2080	407,7
3-4	55,8	5,3	15,6	1546	290,7
3-5	55,5	5,3	15,3	1922	376,0

**Группа 4.** Для увеличения межслойной адгезии была применена методика отжига при более высокой температуре, практически доведя образцы до температуры плавления. Но тогда необходимо принять меры по сохранению формы деталей, т.к. при такой температуре детали могут начать деформироваться. Для отжига образцов при высокой температуре предлагается производить отжиг в гипсе.

Формироваться форма будет из жидкого гипса, тем самым деталь будет иметь всестороннюю поддержку, предотвращающую деформации при отжиге.

Изготавливается раствор гипса. В собранную форму заливается гипс толщиной

10 мм. Вкладывается на поверхность образец, за счет того, что раствор густой образец не тонет и остаётся на поверхности. Поверх деталей заливается вторая часть раствора, суммарно толщина доводится до 25 мм. После первичного застывания гипсового раствора, образец сушится при температуре 90 °С в течении 3 часов. Затем происходит отжиг в течении 2 часов при температуре 250 °С.

Результаты отжига оказались отрицательными, так как образцы разрушились. Образцы не просто расплавились, но начался процесс их деструкции. Хотя температура сопла при печати составляла 290°С и после воздействия такой темпера-

туры образцы были в рабочем состоянии и имели возможность выдерживать заданную нагрузку. Но при температуре печи в 250 °С образцы подверглись полной деструкции. Данное разрушение можно объяснить длительным временем воздействия высокой температуры.

**Группа 5.** Был проведен эксперимент с температурой плавления образцов в печи. Образцы поместили в печь, далее температура повышалась с шагом 20 градусов начиная с температуры 160 °С. При достижении заданной температуры образцы выдерживались по 10 минут, после чего печь открывалась и проверялось состояние образцов. В результате выяснено, что при температуре в 200 °С образец потерял жёсткость и деформировался от

любого усилия, но сохраняет свою форму, а при температуре 220 °С образец расплавился и начал растекаться, при этом непрерывное углеволокно потеряло свою конфигурацию и приобрело форму овала за счет своей упругости.

По результатам вышесказанного был повторен эксперимент с отжигом образцов в гипсовой форме по технологии как с группой 4, за исключением температуры отжига равной 200 °С и временем выдержки 1 час. Отличительной особенностью группы 5 при испытаниях было не расслоение всех образцов по длине, а поперечное разрушение образцов 5-1 и 5-3, также образец 5-5 не разрушился, а начал деформироваться. На рис. 6 представлен график нагружения образца 5-2.

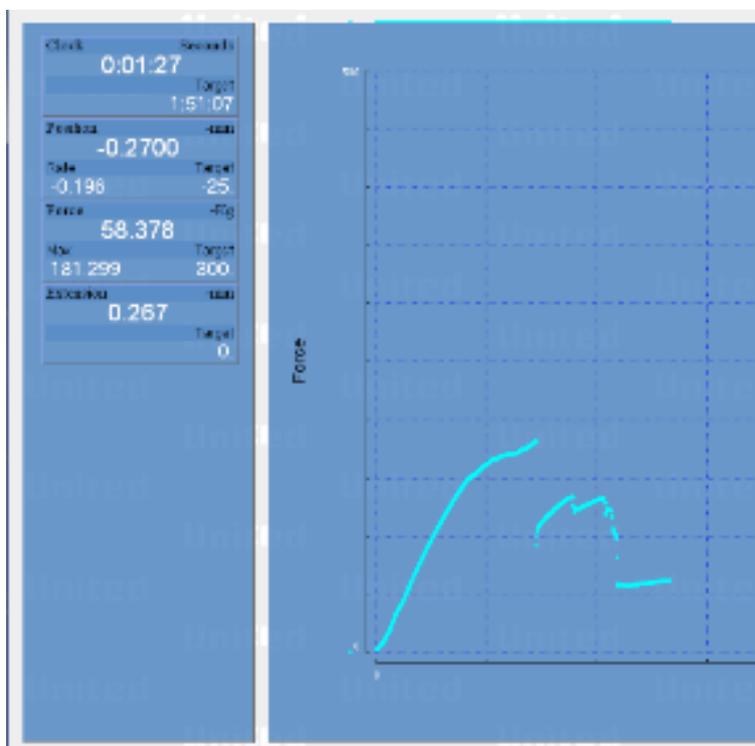


Рис. 6. График нагружения образца 5-2  
Fig. 6. Loading graph of sample 5-2

Таблица 4

Результаты расчетов прочности образцов пятой группы

Table 4

Results of calculating the strength of the fifth group samples

Номер образца	Длина $l$ , мм	Толщина $h$ , мм	Ширина $b$ , мм	Максимальная сила $F$ , Н	Предел прочности на изгиб $\sigma$ , МПа
5-2	55,5	5,3	15,3	1778	345,0
5-3	55,6	5,7	15,2	1532	261,8
5-4	55,4	5,8	15,3	1612	257,5
5-5	55,5	5,8	15,3	1960	312,2

## Заключение

В образцах первой группы, изготовленных из неподготовленного материала, практически отсутствует линейная начальная составляющая, отвечающая за упругую деформацию. Это свидетельствует о слабой межслойной адгезии. Также не происходило расслоений образцов, что свидетельствует о постепенной пластической деформации материала. Слои филамента и углеволокна слабо связаны между собой и практически не сопротивляются нагрузке.

По данным, полученным по образцам группы 2, видно, что сушка филамента дает положительный эффект. Полученный композит стал более прочным. Однако, в образцах второй группы наблюдается скачкообразное падение прочности, связанное с расслоением образца по длине. Такое поведение свидетельствует о недостаточной межслойной адгезии. Это объясняется тем, что новый слой выкладывается на уже остывший материал и слои не могут полноценно соединиться между собой и создать единую кристаллическую структуру.

Образцы третьей группы прошли процесс отжига. Отжигом в данном случае можно считать нагревание пластика до такой температуры, при которой его молекулы могут перестраиваться, что делает его структуру более прочной, стабильной и с меньшим внутренним напряжением. В отличие от кристаллических материалов, которые при нагревании достигают состояния плавления, аморфные полимеры не имеют четко выраженной температуры плавления. Вместо этого они постепенно размягчаются в диапазоне температур, который называется температурой стеклова-

ния. Формирование кристаллической структуры внутри полимеров возможно лишь при достижении температуры стеклования, оставаясь при этом ниже температуры плавления. Для аморфных полимеров температура плавления определяется как температура, при которой заканчивается процесс стеклования. На этом этапе молекулярная структура теряет свою упорядоченность, и молекулы начинают свободно перемещаться. В то же время при температурах ниже стеклования молекулы остаются в состоянии недостаточной подвижности, что препятствует их перемещению.

Аморфные полимеры характеризуются значительным разрывом между началом стеклования и температурой плавления. С повышением температуры наблюдается слияние отдельных слоев, что способствует увеличению прочности объекта. Однако следует учитывать, что с увеличением температуры материал может подвергаться сжатию и деформации, что приводит к его разрушению. Таким образом, для достижения оптимального результата необходимо найти баланс между сохранением геометрических параметров изделия и максимизацией его прочностных характеристик. Оптимальное время отжига зависит от размеров и формы объекта. Отожженные образцы группы 3, при температуре 135 °С, показали меньшую абсолютную прочность, а также неизменившиеся показатели межслойной адгезии. Следовательно, данные режимы отжига не являлись оптимальными.



Рис. 7. Люнетная цанга, изготовленная аддитивной композитной печатью

Fig. 7. Lunette collet produced by additive composite printing

Отжиг образцов группы 4 в течении 2 часов при температуре 250 °С также не дал положительных результатов. По аналогии с образцами из группы 2 у образцов группы 4 наблюдалось скачкообразное падение прочности из-за расслоения образцов по длине, кроме одного образца под номером 3-4.

У образцов группы 5, которые проходили отжиг при температуре 200 °С и временем выдержки 1 час, при испытаниях не было расслоения по длине. Четыре об-

разце разрушились, а пятый деформировался, что можно считать положительным результатом. По результатам проведенных исследований была изготовлена люнетная цанга по габаритам аналогичная цанге *HGB-TD20R*, после чего была проведена проверка ее работоспособности в производственных условиях. Данные испытания подтвердили работоспособность данной цанги. На рис. 7 показана люнетная цанга, изготовленная аддитивной композитной печатью по предложенной технологии.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Торубаров, И. С. Разработка способа пятиосевой FFF печати с укладкой непрерывного углеволокна / И. С. Торубаров // Гагаринские чтения - 2022: Сборник тезисов работ международной молодёжной научной конференции XLVIII, Москва, 12-15 апреля 2022 года. Москва: Издательство "Перо", 2022. С. 550-551. – EDN KQERFG.
2. Торубаров, И. С. Разработка устройства объёмной печати по технологии FFF с укладкой непрерывного волокна / И. С. Торубаров // XXVII Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области : Сборник материалов конференции, Волгоград, 02-15 ноября 2022 года / Редколлегия: С.В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2022. С. 49-51. – EDN GLJLAQ.
3. Карташов, К. В. Технологии 3D печати композитными материалами с применением углеродного волокна / К. В. Карташов // Научный Лидер. 2022. № 6(51). С. 135-137. – EDN YTWHSF.
4. С.В. Кондрашов, А.А. Пыхтин, С.А. Ларионов, А.Е. Сорокин. Влияние технологических режимов fdm-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики fdm-моделей (обзор). ТРУДЫ ВИАМ №10 (82) 2019, DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49.
5. Торубаров И.С., Дроботов А.В., Гушин И.А., Вдовин Д.С., Плотников А.Л., Яковлев А.А. Аддитивное производство изделий с пространственным армированием непрерывным волокном // Frontier Materials & Technologies. 2022. № 2. С. 92–104. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-2-92-104.
6. Zhang D., Rudolph N., Woytowicz P. Reliable Optimized Structures with High Performance Continuous Fiber Thermoplastic Composites From Additive Manufacturing (AM) // International SAMPE Technical Conference. 2019. Vol. 2019-May. Article number 148951. DOI: 10.33599/nasampe/s.19.1396.
7. Avdeev A., Shvets A., Gushchin I., Torubarov I., Drobotov A., Makarov A., Plotnikov A., Serdobintsev Y. Strength Increasing Additive Manufacturing Fused Filament Fabrication Technology, Based on Spiral Toolpath Material Deposition // Machines. 2019. Vol. 7. № 3. Article number 57. DOI: 10.3390/machines7030057.
8. Габдрашитов, Т. А. Импортзамещение с использованием 3D-печати и 3D-сканирования / Т. А. Габдрашитов, И. И. Шарипов // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения: Материалы национальной (с международным участием) научно-практической конференции, Казань, 10-11 апреля 2024 года. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. С. 58-60. – EDN NXZQNI.
9. Валетов, В. А. Аддитивные технологии (состоянии и перспективы): учебное пособие / В. А. Валетов. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2015. 63 с.
10. Патент № 2776061 С2 Российская Федерация, МПК В29С 64/118, В29С 64/209, В33У 10/00. Способ изготовления изделий, армированных непрерывным волокном, с помощью аддитивных технологий и печатающая головка 3D-принтера для его осуществления: № 2020140909: заявл. 11.12.2020: опубл. 13.07.2022 / А. Р. Авдеев, И. А. Гушин, А. В. Дроботов [и др.]; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Стереотек". – EDN VYVIDH.
11. Strength increasing additive manufacturing fused filament fabrication technology, based on spiral toolpath material deposition / A. Avdeev, A. Shvets, I. Gushchin [et al.] // Machines. 2019. Vol. 7, No. 3. P. 57. – DOI 10.3390/MACHINES7030057. – EDN VAKJEJ.
12. Развитие технологии 3D печати с армированием непрерывным волокном / И. С. Торубаров, А. В. Дроботов, А. Л. Плотников, И. А. Гушин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2021. – № 8(255). С. 81-86. – DOI 10.35211/1990-5297-2021-8-255-81-86. – EDN ZPIGFL.
13. Дроботов, А. В. Разработка устройства и способа FFF печати с армированием непрерывным углеволокном / А. В. Дроботов, А. Л. Плотни-

- ков, И. С. Торубаров // Инновационные технологии в машиностроении : сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции, Юрга, 25–27 мая 2023 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Юргинский технологический институт. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. С. 130-131. – EDN BWGPHI.
14. Чемодуров, А. Н. Исследования в области применения технологий 3D-печати композитными материалами / А. Н. Чемодуров // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сборник научных статей 2-й Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 11–12 апреля 2024 года. – Воронеж: ЗАО «Университетская книга», 2024. С. 374-377. – EDN GUVCUV.
  15. Патент № 2717274 С2 Российская Федерация, МПК В29С 64/118, В29С 64/20, В33У 30/00. Способ изготовления изделий с помощью адди-

тивных технологий и устройство для его осуществления: № 2018144131: заявл. 11.03.2019: опубл. 19.03.2020 / А. Р. Авдеев, И. А. Гушин, А. В. Дроботов [и др.]; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Стереотек". – EDN VYBIDH.

16. Гусев, Д. В. Исследование возможности использования угле- и стеклонаполненных термопластов при изготовлении корпусных деталей электронной аппаратуры транспортных систем / Д. В. Гусев, М. А. Ларионов // Транспортное машиностроение. 2022. № 12(12). С. 48-55. – DOI 10.30987/2782-5957-2022-12-48-55. – EDN BERQAD.
17. Говоров, И. С. Поверхностная обработка образцов, изготовленных методом FDM-печати / И. С. Говоров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 604-608. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-9-604-605. – EDN LIKRNU.

## REFERENCES

1. Torubarov IS. Development of a five-axis FFF printing method with continuous carbon fiber laying. Collection of Theses of the International Youth Scientific Conference XLVIII, April 12-15, 2022: Gagarin Readings; Moscow: Pero Publishing House; 2022.
2. Torubarov IS. Development of a volumetric printing device using FFF technology with continuous fiber laying. Collection of XXVII Regional Conference of Young Scientists and Researchers of the Volgograd region, November 02-15, 2022; Volgograd: Volgograd State Technical University; 2022.
3. Kartashov KV. 3D printing technologies with composite materials using carbon fiber. Nauchny Lider. 2022;6(51):135-137.
4. Kondrashov SV, Pykhtin AA, Larionov SA, Sorokin AE. The influence of technological modes of fdm printing and the composition of the materials used on the physical and mechanical characteristics of fdm models (review). Trudi VIAM. 2019;10(82). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49.
5. Torubarov IS, Drobotov AV, Gushchin IA, Vdovin DS, Plotnikov AL, Yakovlev AA. Additive manufacturing of products with spatial reinforcement by continuous fiber. Frontier Materials and Technologies. 2022;2:92-104. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-2-92-104.
6. Zhang D, Rudolph N, Woytowicz P. Reliable optimized structures with high performance continuous fiber thermoplastic composites from additive manufacturing (AM). International SAMPE Technical Conference. 2019;2019-May. DOI: 10.33599/nasampe/s.19.1396.
7. Avdeev A, Shvets A, Gushchin I, Torubarov I, Drobotov A, Makarov A, Plotnikov A, Serdobintsev Y. Strength increasing additive manufacturing fused filament fabrication technology, based on spiral toolpath material deposition. Machines. 2019;7(3). DOI: 10.3390/machines7030057.
8. Gabdrashitov TA, Sharipov II. Import substitution using 3D printing and 3D scanning. Proceedings of the National (with international participation) Scientific and Practical Conference, April 10-11, 2024: Digital Systems and Models: Theory and Practice of Design, Development and Application; Kazan: Kazan State Power Engineering University; 2024.
9. Valetov VA. Additive technologies (state and prospects): textbook. St. Petersburg: ITMO University; 2015.
10. Avdeev AR, Gushchin IA, Drobotov AV. RF Patent No. 2776061 С2 МПК В29С 64/118, В29С 64/209, В33У 10/00. Method for manufacturing products reinforced with continuous fiber using additive technologies and 3D printer print-head for its implementation. 2022 Jul 13.
11. Avdeev A, Shvets A, Gushchin I. Strength increasing additive manufacturing fused filament fabrication technology, based on spiral toolpath material deposition. Machines. 2019;7(3):57. DOI 10.3390/MACHINES7030057.
12. Torubarov IS, Drobotov AV, Plotnikov AL, Gushchin IA. Development of 3D printing technology with continuous fiber reinforcement. Izvestia VSTU. 2021;8(255):81-86. DOI 10.35211/1990-5297-2021-8-255-81-86.
13. Drobotov AV, Plotnikov AL, Torubarov IS. Development of the device and method of FFF printing with continuous carbon fiber reinforcement. Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference, May 25-27, 2023: Innovative Technologies in Mechanical

Engineering; Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University; 2023.

14. Chemodurov AN. Research in the field of application of 3D printing technologies with composite materials. Collection of Scientific Papers of the 2nd All-Russian Scientific and Technical Conference, April 11-12, 2024: Prospects for the Development of Processing Technologies and Equipment in Mechanical Engineering; Voronezh: Universitetskaya Kniga; 2024.
15. Avdeev AA, Gushchin IA, Drobotov AV. RF Patent No. 2717274 C2 МПК В29С 64/118, В29С 64/20, В33У 30/00. Method of manufac-

turing products using additive technologies and a device for its implementation. 2020 March 19.

16. Gusev DV, Larionov MA. Study of the possibility to use carbon- and glass-filled thermoplastics in the manufacture of body parts of transport system electronic equipment. Transport Engineering. 2022;12(12):48-55. DOI 10.30987/2782-5957-2022-12-48-55.
17. Govorov IS. Surface treatment of samples produced by FDM printing method. Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2024;9:604-608. DOI 10.24412/2071-6168-2024-9-604-605.

#### **Информация об авторах:**

**Перетятко Сергей Борисович** – кандидат технических наук, исполняющий обязанности заведующего кафедрой инжиниринга технологического оборудования Калининградского государственного технического университета, тел. 89632943307.

**Peretyatko Sergey Borisovich** – Candidate of Technical Sciences, Acting Head of the Department of Technological Equipment Engineering at Kaliningrad State Technical University, phone: 89632943307.

**Михайлюченко Александр Васильевич** – главный специалист АО «ОКБ «Факел», магистрант Калининградского государственного технического университета.

**Mikhailyuchenko Aleksandr Vasilyevich** – Chief specialist of Experimental Design Bureau "Fakel", Master's degree student at Kaliningrad State Technical University.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 24.03.2025; одобрена после рецензирования 02.04.2025; принята к публикации 30.04.2025. Рецензент – Матлахов В.П., кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета.**

**The article was submitted to the editorial office on 24.03.2025; approved after review on 02.04.2025; accepted for publication on 30.04.2025. The reviewer is Matlakhov V.P., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University.**