

Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью

А. В. Балашов, М. И. Маркова

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

Аннотация: В статье рассмотрен экструзионный метод 3D печати, описаны исследования на растяжение, сжатие, изгиб, удельный вес, усадку образцов с различной структурой, процентом заполнения материалом образцов, полученных из ABS пластика. Приведен пример использования аддитивных технологий для изготовления литевой технологической оснастки. В результате исследований определены механические свойства изделий из ABS пластика. Установлена зависимость предела прочности при растяжении детали из ABS пластика от количества нитей на оболочке поверхностного слоя детали; зависимость предела прочности при изгибе детали из ABS пластика и удельного веса материала детали от процента заполнения; зависимость напряжения при сжатии при установленной относительной деформации 10% деталей из ABS пластика.

Ключевые слова: аддитивные технологии, экструзионная 3D-печать, механические свойства, FDM-технологии, ABS пластик.

Введение

В настоящее время на промышленных предприятиях и в научно-исследовательских организациях все больше находят распространение аддитивные технологии. Аддитивные технологии заключаются в поэтапном, послойном создании изделий на основе компьютерной 3D модели. Они классифицируются по применяемым материалам, по способам образования слоя и его фиксирования [1-3]. Для реализации процессов печати используется оборудование 3D послойного синтеза без применения технологической оснастки. Практическое использование аддитивных технологий нашло применение в промышленности при изготовлении сложных изделий. Такое производство экономически обосновано в единичном и даже мелкосерийном производстве.

Наиболее распространенными аддитивными технологиями являются SLM и FDM технологии [2,3]. Печать металлом реализуется по SLM-технологиям, заключающимся в послойном лазерном сплавлении металлического порошка. Качество изделий, изготовленных аддитивными технологиями, оцениваются удельной и усталостной прочностью. Физико-

механические свойства изделий, полученных по SLM-технологиям в настоящее время достаточно изучены и описаны. Наибольший интерес представляют печать не только металлом, но и пластиком.

Самым распространенным методом печати пластиком является экструзионный метод (FDM метод), заключающийся в послойном наплавлении материала [1]. Популярность FDM метода вызвана достаточно низкой стоимостью принтеров и расходных материалов для печати. Кроме того на большую распространенность данной технологии влияет доступность комплектующих для сборки FDM-принтеров [4].

Детали, получаемые по FDM технологии прочные, упругие, обладают набором физических характеристик, зависящих от типа материала. Однако, недостаточная изученность физико-механических свойств изделий, полученных 3D-печатью сдерживает дальнейшее распространение в производство FDM-технологии. Данные по механическим свойствам, таких как пределы прочности на растяжение, изгиб, сжатие, усадка и вес материала необходимы для проектирования рациональных конструкций изделий, изготавливаемых 3D печатью. Исследования, направленные на изучение свойств изделий полученных 3D печатью являются актуальными. Для расширения области использования изделий, полученных 3D печатью по FDM-технологиям были определены: предел прочности образцов на растяжение, изгиб, сжатие, процент усадки материала изделия, полученного по FDM-технологии.

Методика исследований

Экспериментальные образцы были получены из ABS пластика на 3D принтере MakerBot Replicator 2X при следующих режимах печати: температура экструдера – 250 °С; скорость печати 80 мм/с; коэффициент подачи пластика – 0,97; диаметр сопла экструдера – 0,3 мм; ширина нити –

0,45 мм; высота слоев – 0,25 мм; температура стола первого слоя – 115 °С; температура стола остальных слоев – 105 °С.

Испытания образцов на растяжение, изгиб, сжатие осуществлялось на испытательной установке INSTRON 3369.

А) Определение предела прочности на растяжение [6–8]

Целью экспериментальных исследований являлось получение зависимости предела прочности при растяжении образца от структуры поверхностного слоя изделия из ABS пластика.

Экспериментальные исследования реализовывались на образцах, полученных по FDM-технологиям по ГОСТ 11262-80, тип 1. На экспериментальных образцах (рис. 1) сформированы поверхностные слои, состоящие из оболочек с 4, 6, 8 и 10 нитями с заполнением 100%.

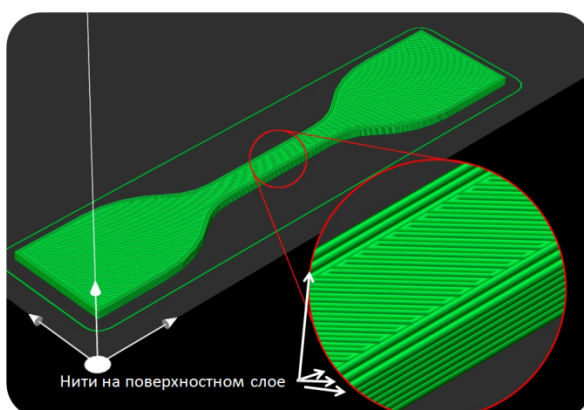


Рис. 1. – 3D модель образца для испытаний на растяжение

Предел прочности на растяжение определялся на разрывной машине INSTRON 3369. Скорость испытания на разрыв составляла 5 мм/мин.

Б) Определение предела прочности на изгиб [7,8]

Целью экспериментальных исследований являлось получение зависимости удельного веса и предела прочности при изгибе образца от внутренней структуры изделия из ABS пластика.

Экспериментальные исследования реализовывались на образцах, полученных по FDM-технологиям по ГОСТ 4648-73. Экспериментальные образцы (рис. 2) сформированы внутренним заполнением материала 20, 40, 60, 80 и 100%; структура слоев – четырехгранник и шестигранник. Размеры образцов: 20×25×120 мм.

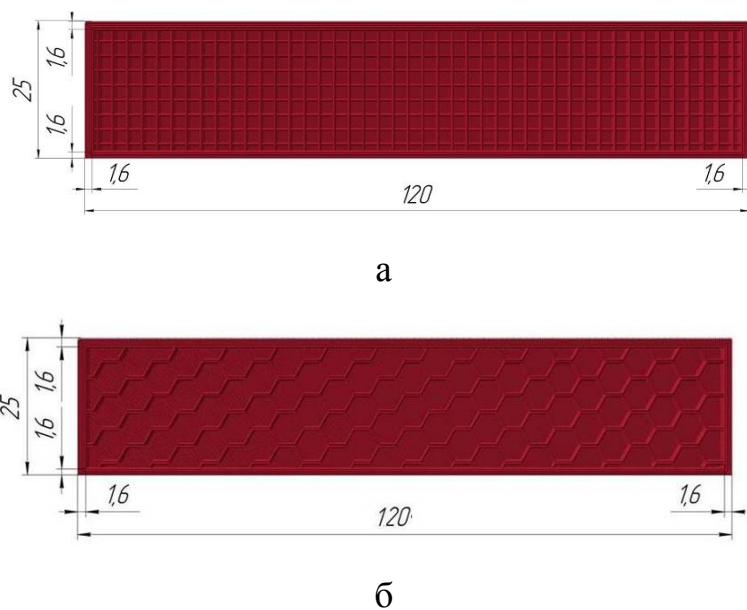


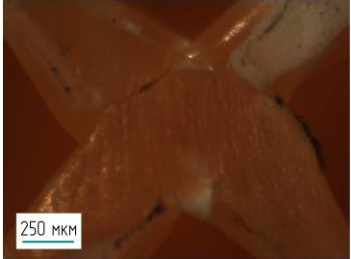

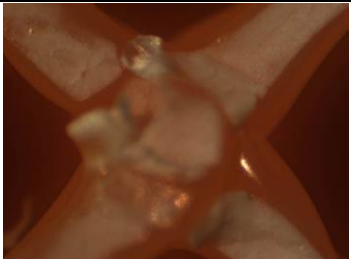
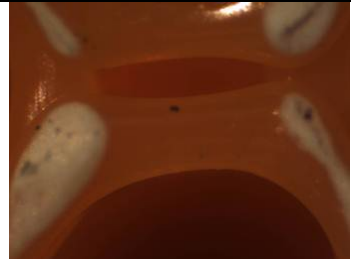
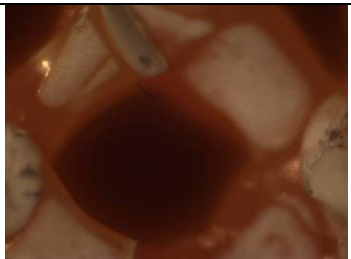
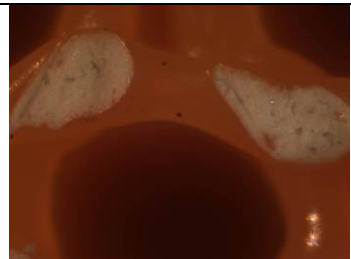
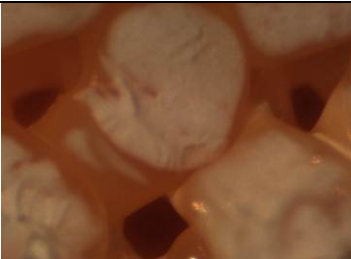

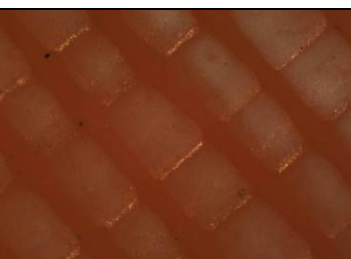
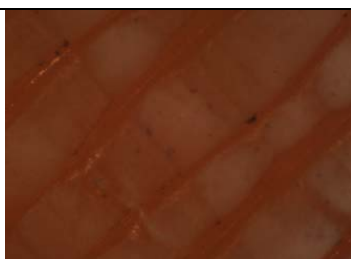
Рис. 2. – Образцы для определения предела прочности на изгиб: а – с четырехгранной схемой заполнения; б – с шестигранной схемой заполнения

Фотографии внутренних микроструктур образцов с четырехгранной и шестигранной схемами заполнения получены на инструментальном микроскопе МИП 2, оснащённом цифровой камерой BR-5101LC-UF, таблица 1.

Вес образцов с различным заполнением материала, полученных по четырехгранной и шестигранной схемам заполнения материала определялся на аналитических весах CAPТОГОСМ CE224. Предел прочности на изгиб определялся на разрывной машине INSTRON 3369 по трехточечной схеме.

Таблица 1

Микроструктура образцов

Заполнение, %	Схема заполнения	
	четырёхгранная	шестигранная
20		
40		
60		
80		
100		

В) Определение предела прочности на сжатие [7,8]

Целью экспериментальных исследований являлось получение зависимости предела прочности при сжатии образца от структуры поверхностного слоя изделия из ABS пластика.

Экспериментальные исследования реализовывались на образцах, полученных по FDM-технологиям по ГОСТ 4651-82. Экспериментальные образцы (рис. 3) сформированы внутренним заполнением материала 20, 40, 60 и 80%. Размеры образцов: 50×50×50 мм.



Рис. 3. – Образцы для испытаний на сжатие

Затем образцы испытывались на изгиб на испытательной установке INSTRON 3369. В соответствии с ГОСТ 4651-82 определяли напряжение сжатия при установленной относительной деформации – 10%.

Г) Определение процента усадки материала изделия, полученного по FDM-технологии

Для отливок получаемых процессами точного литья, вследствие минимальных, либо вообще отсутствующих припусков на механическую обработку, одним из критериев модели является точность ее изготовления [9]. Так как печать моделей производится расплавленным пластиком, то наличие усадки вполне ожидаемо. Поэтому цель эксперимента заключалась в определении зависимости усадки от степени заполнения модели. Для этого был разработан образец, сочетающий различные виды поверхностей (рис. 4).

Для проведения измерений было изготовлено по 5 моделей с заполнением материала 20, 40 60, 80 и 100%. Измерение линейного размера

между двумя внешними плоскими гранями каждой модели, заданным 30 мм, производилось цифровым микрометром три раза с вычислением среднего значения.

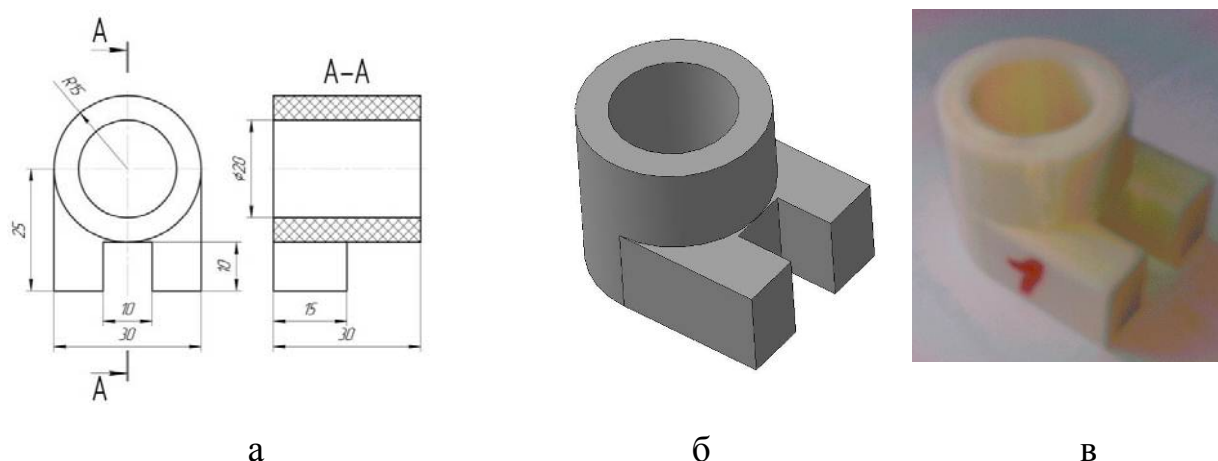


Рис. 4. – Модель для испытаний на усадку: а – эскиз образца; б – 3D-модель образца; в – образец

Результаты и их обсуждение

А) Определение предела прочности на растяжение

По результатам обработки экспериментальных данных (рис. 5) установлена зависимость (1) предела прочности при растяжении изделия из пластика ABS от количества нитей на оболочке поверхностного слоя.

$$\sigma_p = 1,434 \cdot \ln(k) + 34,7, \quad (1)$$

где σ_p – предел прочности при растяжении, МПа; k – количество нитей на оболочке детали.

Зависимость показала, что количество нитей на оболочке поверхностного слоя оказывает существенное влияние на их прочность. Для 8 и 10 нитей предел прочности при растяжении составляет 37,5– 38 МПа, при этом самая максимальная деформация материала для 10 нитей.

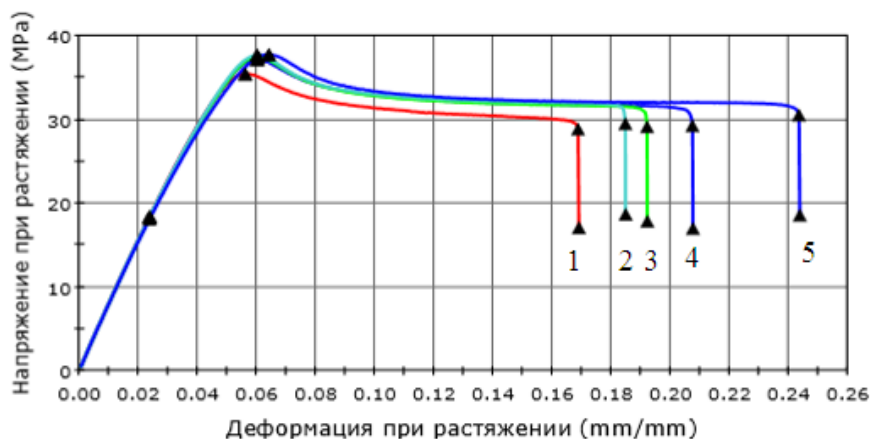


Рис. 5. – Результаты испытания экспериментальных образцов, где 1 – две нити; 2 – четыре нити; 3 – шесть нитей; 4 – восемь нитей; 5 – десять нитей

Б) Определение предела прочности на изгиб

Результаты взвешивания и расчета удельного веса приведены в таблице

2.

Таблица 2

Расчет удельного веса образцов

Структура	Заполнение, %	20	40	60	80	100
Четырехгранник	Удельный вес, гр/см ³	3,60	4,97	6,42	7,69	8,71
Шестигранник	Удельный вес, гр/см ³	3,41	4,41	5,22	5,92	8,70

Анализ фотографий внутренней микроструктуры образцов (таблица 1) и зависимостей удельного веса образца от заполнения материалом показал, что образцы с четырехгранной структурой более плотные по сравнению с образцами с шестигранной структурой при одинаковых режимах печати и заполнении [10].

Результаты обработки экспериментальных данных представлены в виде зависимостей на рисунке 6.

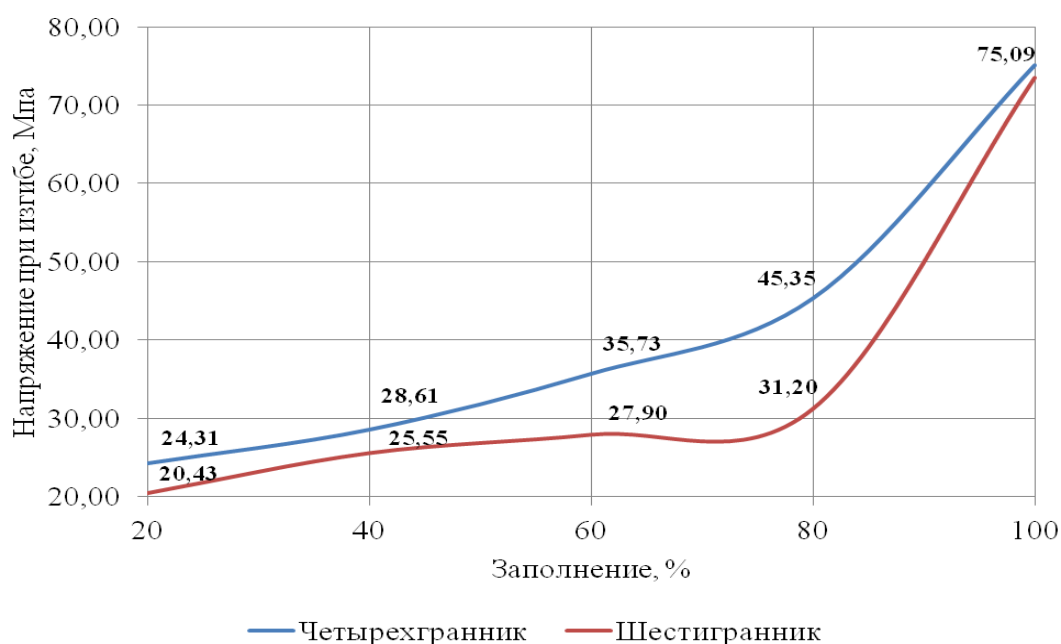


Рис. 6. – Зависимость предела прочности при изгибе от заполнения материалом детали

Зависимость влияния процента заполнения материала по четырехгранной схеме на напряжение при изгибе описывается уравнением (2).

$$\sigma_{и4} = 0,0002 \cdot \theta^3 - 0,0229 \cdot \theta^2 + 1,1488 \cdot \theta + 8,798, \quad (2)$$

где $\sigma_{и4}$ – предел прочности при изгибе образца, заполненный по четырехгранной схеме; θ – процент заполнения материала.

Зависимость влияния процента заполнения материала по шестигранной схеме на напряжение при изгибе описывается уравнением 3.

$$\sigma_{и6} = 9E-06 \cdot \theta^4 - 0,0017 \cdot \theta^3 + 0,1125 \cdot \theta^2 - 2,7734 \cdot \theta + 43,17, \quad (3)$$

где $\sigma_{и6}$ – предел прочности при изгибе образца, заполненный по шестигранной схеме.

Установленные зависимости (2, 3) удельного веса и предела прочности при изгибе экспериментальных образцов из пластика ABS от схемы 3D печати и процента заполнения материалом позволяют оперировать прочностью

проектируемого изделия, которое будет изготавливаться по FDM-технологиям.

В) Определение предела прочности на сжатие

Результатом обработки экспериментальных данных является зависимость влияния заполнения материалом экспериментального образца, на предел прочности при сжатии (Рис. 7).

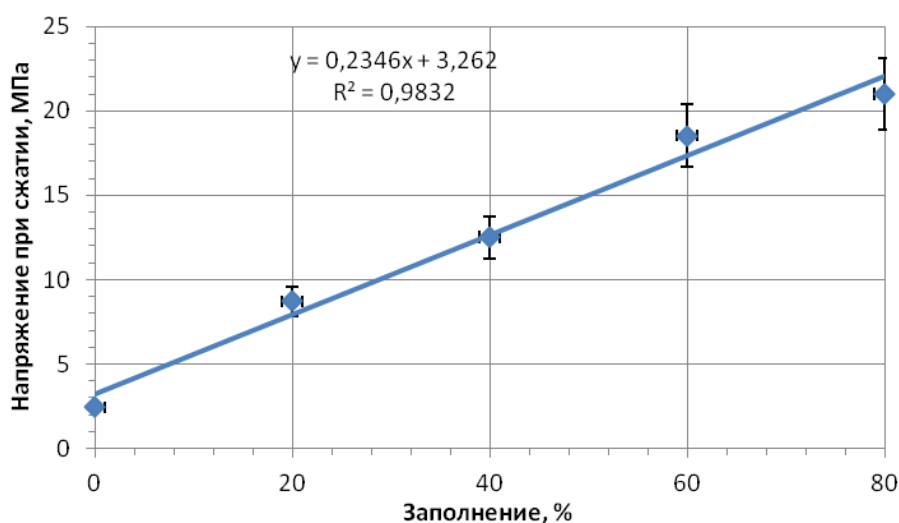


Рис. 7. – Зависимость максимального напряжения при сжатии при относительной деформации 10 % от заполнения материалом детали

Таким образом, образцы (рис. 3) с заполнением материала 80% выдерживают напряжение при сжатии 22 МПа. При снижении образца с заполнением материала 40% напряжение уменьшается почти вдвое (12,3 МПа). Это необходимо учитывать при проектировании нагруженных деталей для изготовления их из ABS пластика экструзионным методом по FDM-технологиям.

Г) Определение процента усадки материала изделия, полученного по FDM-технологии.

Зависимость усадки модели от процента заполнения ее материалом (рисунке 8) позволит определить размеры для ее проектирования.

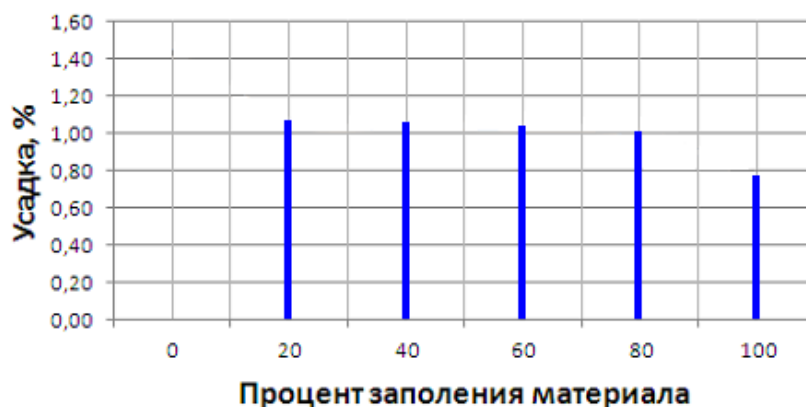


Рис. 8. – Зависимость усадки модели от процента заполнения ее материалом

На основе экспериментальных данных (рис. 8) была спроектирована и напечатана литейная модель [10] (рис. 9).



Рис. 9. – Литейная модель

Выводы

Для расширения области использования изделий, полученных по FDM-технологиям, проведены испытания образцов из ABS пластика (рис. 1–4) на предел прочности при растяжении, изгибе, сжатии, определен их удельный вес и усадка.

Установлено, что деформация материала при его растяжении зависит от количества нитей на оболочке поверхностного слоя и достигает

наибольших значений для образцов, содержащих восемь (0,218 мм) и десять (0,242 мм) нитей при напряжении 38 МПа.

Расчет удельного веса образцов (рис. 2) показал, что плотность образцов с четырехгранной структурой выше по сравнению с шестигранной структурой при одинаковых режимах печати и заполнения. Деформация материала при его 100% заполнении с четырехгранной структурой выше, чем у материала с шестигранной структурой.

При определении предела прочности на сжатие образцов (рис. 3) выявлено: чем выше процент заполнения образца материалом, тем больше образец выдерживает напряжение при сжатии (таблица 3).

Таблица 3

Максимальное напряжение образца при сжатии

Заполнение образца, %	Максимальное напряжение, МПа
20	8
40	12,3
60	18,5
80	22

Экспериментальные данные по усадке материала для моделей (рис. 4) показали, что при заполнении модели материалом от 20 до 80% усадка составляет 1%. При 100% заполнении модели материалом усадка составила 0,78%.

Экспериментальные данные использовались при проектировании литейной оснастки и изготовлении заготовки корпусных деталей узла сцепки железнодорожных вагонов методом послойного наплавления ABS пластика.

Литература

1. Гончарова О.Н., Бережной Ю.М., Бессарабов Е.Н., Кадамов Е.А., Гайнутдинов Т.М., Нагопетьян Е.М., Ковина В.М. Аддитивные технологии - динамично развивающееся производство // Инженерный вестник Дона, 2016, № 4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931.
2. Зотов О.Ю., Фролов Д.А. Особенности метода изготовления изделий путем послойного наплавления материала // Ученый XXI века. 2016. № 1 (14). С. 7-11.
3. Безобразов Ю.А., Зленко М.А., Зотов О.Г. Анализ структуры образцов, полученных DMLS и SLM-методами быстрого прототипирования // 6-я Международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении». Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. С. 154-157.
4. Белоусов А.В., Храпов С.С., Тен А.В., Садчиков Н.В., Болдырева Ю.А. Параллельный FDM-принтер // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. 2016. № 4 (35). С. 116-131.
5. Savvakis K., Petousis M., Vairis A., Vidakis N., Vikmeyer A.T. Experimental determination of the tensile strength of fused deposition modeling parts // Conference: American Society of Mechanical Engineers-International Mechanical Engineering Congress & Exposition, At Montreal. 2014. pp. 1-6.
6. Балашов А.В., Черданцев А.О., Новиковский Е.А., Ананьин С.В., Белоплотов С.В. Исследование прочности изделий, полученных методом 3D-печати // Ползуновский вестник. 2016. № 2. С. 61-64.
7. Колесников А.А. Ситуационное управление обеспечением качества изготовления изделий по технологии печати на 3D принтере на основе технологии FDM // Техника и технология: новые перспективы развития. 2014. № XII. С. 77-79.

8. Gajdoš I., Slota J. Influence of Printing Conditions on Structure in FDM Prototypes // Tehnicki Vjesnik. 2013. №20 (2). pp. 231-236.

9. Марков А.М., Габец Д.А., Каргин В.В., Габец А.В. Моделирование технологии изготовления чугунного колпака скользуна // Инженерный вестник Дона, 2015, № 1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2808.

10. Белоplotов С.В., Балашов А.В., Черданцев А.О., Новиковский Е.А., Заборцева М.Н. Изготовление литейной модели методом 3D печати // Ползуновский альманах. 2016. № 4. С. 12-18.

References

1. Goncharova O.N., Berezhoj U.M., Bessarabov E.N., Kadamov E.A., Gaynutdinov T.M., Nagopetyan E.M., Kovina V.M. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2016. № 4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931.

2. Zotov O.Yu., Frolov D.A. Scientist of XXI century. 2016. № 1 (14). pp. 7-11.

3. Bezobrazov U.A., Zlenko M.A., Zotob O.G. 6th international youth scientific and practical conference «Innovative technologies in metallurgy and mechanical engineering». Yekaterinburg, 2012, pp. 154-157.

4. Belousov A.V, Khrapov S.S., Ten A.V., Sadchikov N.V., Boldyreva Yu.A. Bulletin of Volgograd state University. Series.1: Mathematics. Physics. 2016. №4 (35). pp. 118-131.

5. Savvakis K., Petousis M., Vairis A., Vidakis N., Bikmeyev A.T. Conference: American Society of Mechanical Engineers-International Mechanical Engineering Congress & Exposition. At Montreal, 2014, pp. 1-6.

6. Balachov A.V., Cherdancev A. O., Novikovskiy E.A., Ananen S.V., Beloplotov S.V. Polzunovskij vestnik. 2016. № 2. pp. 61-64.

7. Kolesnikov A.A. Technique and technology: new prospects of development. 2014. № XII. pp. 77-79.

8. Gajdoš I., Slota J. Tehnicki Vjesnik. 2013. №20 (2). pp. 231-236.



9. Markov A.M., Gabets D.A., Gabets A.V., Kargin V.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2015, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2808.

10. Beloplotov S.V., Balachov A.V., Cherdancev A. O., Novikovskiy E.A., Zaborceva M.N. Polzunovskii almanac. 2016. № 4. pp. 12-18.