

DOI: 10.53078/20778481_2023_1_13

УДК 691.175, 620.172

И. А. Леонович, Д. Д. Адинцов

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ABS-ПЛАСТИКА В ОБРАЗЦАХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ FFF-ПЕЧАТИ

I. A. Leanovich, D. D. Adzintsov

STUDY OF PROPERTIES OF ABS PLASTIC IN SAMPLES OBTAINED BY FFF PRINTING TECHNOLOGY

Аннотация

В работе приведены результаты механических испытаний на растяжение образцов из ABS-пластика, выполненных стилем заполнения linear во взаимно перпендикулярных направлениях с контуром из трех филаментов. Выявлены особенности сформированной структуры и ее влияние на характер разрушения материала. Исходя из особенности полученной структуры материала при заданном диаметре нити даны рекомендации по выбору толщины образца для достижения корректного центрального растяжения. Предложены рекомендации по выбору формы и размеров образцов для определения прочностных и деформативных свойств материала.

Ключевые слова:

FFF-печать, ABS-пластик, аддитивные технологии, испытание на растяжение, структура и свойства материала.

Для цитирования:

Леонович, И. А. исследование свойств ABS-пластика в образцах, полученных по технологии FFF-печати / И. А. Леонович, Д. Д. Адинцов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 1 (78). – С. 13–21.

Abstract

The paper presents the results of mechanical tensile tests of ABS plastic samples made by the linear filling style in mutually perpendicular directions with a contour of three filaments. The features of the structure formed and its influence on the nature of material destruction are revealed. Based on the peculiarities of the material structure obtained at a given diameter of the filament, recommendations are given for choosing the thickness of the sample to achieve the correct central tension. Recommendations on the choice of the shape and size of samples to determine the strength and deformative properties of the material are proposed.

Keywords:

FFF printing, ABS plastic, additive technologies, tensile testing, material structure and properties.

For citation:

Leanovich, I. A. Study of properties of ABS plastic in samples obtained by FFF printing technology / I. A. Leanovich, D. D. Adzintsov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 1 (78). – P. 13–21.

Введение

Обзор литературных источников по рассматриваемой теме выявил отсутствие строгой систематизации по определению механических свойств

ABS-пластика, полученного наплавлением нитей.

Для того чтобы сравнить результаты испытаний по определению механических свойств материала, следует определить наиболее близкий аналог по

технологии и параметрам производства, размерам и форме образцов, условиям испытаний и т. д. Все перечисленные факторы в той или иной степени влияют на полученный результат. В публикациях [1–7], часть из которых включает широкий обзор англоязычных работ [1–3], отмечено большое разнообразие исходных условий, которое не позволяет выявить строгие взаимозависимости между свойствами материала, формой и размерами образцов, положением образцов при печати, стилем заполнения, количеством контурных слоев и т. д.

В ряде публикаций обращается внимание на форму и размеры образцов для испытания пластика на растяжение с указанием рекомендаций по применению соответствующих ГОСТов [1, 2]. Указывается, что ГОСТ 11262–2017 (ISO 527–2:2012) *Пластмассы. Метод испытания на растяжение* и ГОСТ 34370–2017 (ISO 527–1:2012) *Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении* не учитывают анизотропию свойств, которая получается в многослойных ячеистых структурах, характерных для образцов, полученных методом 3D-печати по технологии FFF/FDM [1]. Такие же замечания относятся к стандарту ASTM D638–14 *Стандартный метод испытаний свойств пластмасс на растяжение* [2]. Отмечается большое разнообразие в выборе формы и размеров образцов по разным ГОСТам, а также собственные формы, например, с односторонним утолщением [1].

Ряд авторов, оставляя неизменным стиль заполнения, варьировали положением образца при печати [1–3]. В [3] дополнительно определялись степень влияния количества контурных слоев на прочность при однонаправленном положении нити и влияние введения армирующего углеродного волокна.

В [4] приводятся прочностные свойства пластика при испытании ци-

линдрических образцов при укладке нитей параллельно.

В [5] представлены результаты исследования по определению механических свойств ABS-пластика при растяжении, изгибе и сжатии при разных скоростях печати. Отмечается заниженное значение модуля упругости и относительного удлинения по сравнению с литым материалом, причем чем ниже скорость печати, тем выше значение модуля упругости.

В [6] в результате исследований определены свойства ABS-пластика, но не указан стиль заполнения образцов.

В [7] исследовались образцы с четырехгранным и шестигранным стилем заполнения с разным количеством нитей на контурном слое.

Все авторы отмечают существенную зависимость прочностных и деформативных свойств ABS-пластика от степени заполнения. Наибольшее количество исследований проводилось для 100-процентного заполнения как наиболее близкого к литому материалу, со средней скоростью печати (45...50 мм/с). Учитывая большое разнообразие выпускаемых 3D-принтеров, имеющих свои особенности по формированию образцов, аналог собственного исследования можно определить только приблизительно.

Для наших исследований наиболее близким аналогом по условиям проведения экспериментов являются работы [1, 3].

Основная часть

В нашей работе рассмотрены результаты экспериментальных исследований по определению прочностных и упругих характеристик при растяжении ABS-пластика на стандартных образцах, вид и размеры которых показаны на рис. 1 [8, 9].

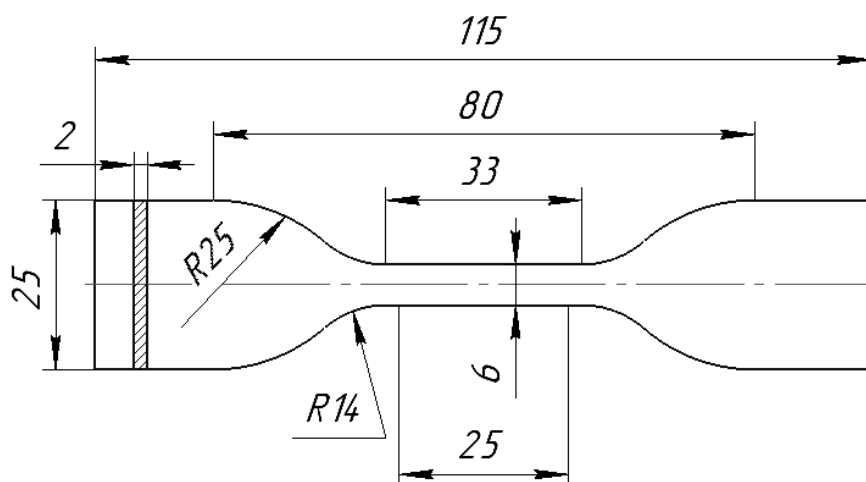


Рис. 1. Размеры плоских образцов типа 1 по ГОСТ 11262–2017

Было изготовлено две серии образцов по технологии Fused Filament Fabrication (FFF) на принтере VSHAPER PRO с диаметром сопла экструдера 0,4 мм и точностью подачи проволоки 1 мкм (рис. 2, а). Данный принтер выполняет наплавление только из нити диаметром 1,75 мм и формирует стиль заполнения linear, меняя направление

нити в каждом последующем слое на 90°. Изготовление образцов производилось из проволоки ABS-s21 (black) с внешним контуром из трех филаментов. Все образцы располагались горизонтально вдоль направления печати, т. е. филаменты в одном слое были направлены вдоль оси образца, в последующем слое – поперек оси образца.



Рис. 2. Применяемое оборудование: а – 3D-принтер VSHAPER PRO; б – испытательная машина Kason WDW-1

Регулируемые параметры настройки 3D-принтера показаны ниже:

- заполнение – 100 %;
- скорость печати – 45...50 мм/с;
- температура головки экструдера – 235 °С;
- температура нагрева камеры – 60 °С;
- температура нагрева стола – 90 °С.

Для определения механических характеристик при статическом растя-

жении применялась разрывная машина Kason WDW-1 (рис. 2, б), позволяющая определять с помощью цифровой системы измерений нагрузки и перемещения с допускаемой относительной погрешностью не более 0,5 %.

Первая серия образцов (А1 – А5) испытывалась при скорости нагружения 5 мм/мин, вторая серия образцов (В1 – В5) – при скорости нагружения 0,5 мм/мин (рис. 3).

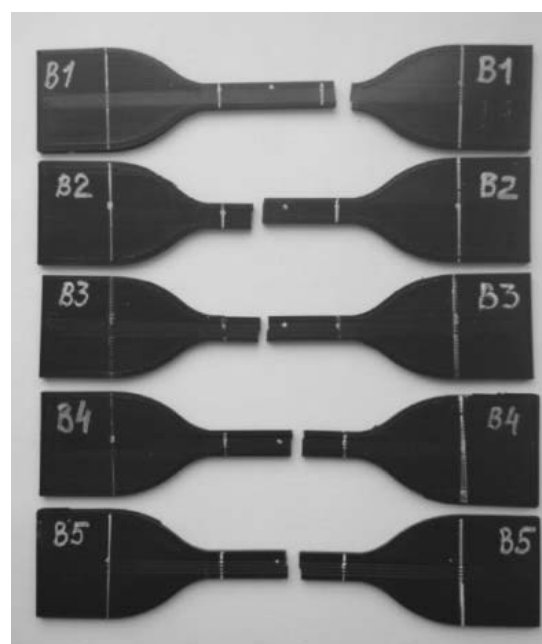
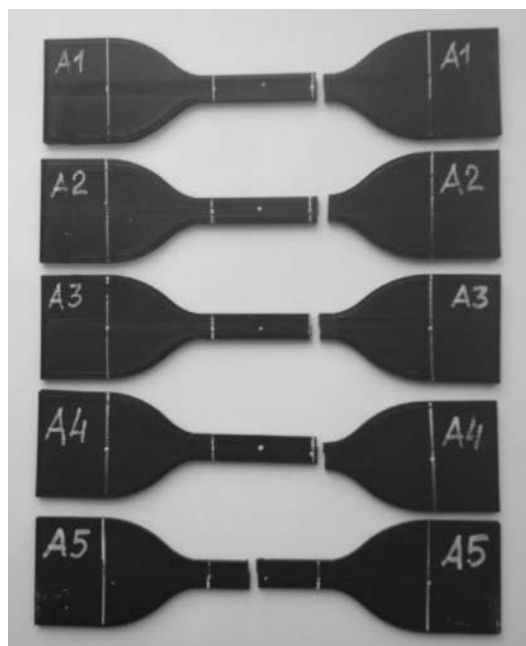


Рис. 3. Образцы после испытаний

Автоматически фиксировались максимально достигнутая нагрузка, соответствующая пределу прочности материала при растяжении $\sigma_{рм}$, нагрузка, соответствующая условному пределу текучести $\sigma_{рт}$, нагрузка при разрушении образца и относительное удлинение при разрыве. На диаграммах растяжения образцов не было площадки текучести, что свидетельствует о малой пластичности пластика после наплавления нитей. Модуль продольной упругости при растяжении E_p рассчитывался вручную по диаграммам согласно указаниям [8, 9].

Результаты измерений и расчетов

сведены в табл. 1.

Разная скорость нагружения при испытании не выявила в наших исследованиях влияния этого параметра на механические свойства материала. Возможно, скорость нагружения повлияла на место разрушения образца: при скорости 5 мм/мин большинство образцов группы А (см. рис. 3) разрушилось по границе контрольной длины, близко к радиусу закругления, в отличие от образцов группы В (скорость нагружения – 0,5 мм/мин), которые разрушались в основном в пределах контрольной длины.

Статистическая обработка резуль-

татов испытаний при доверительной вероятности в 95 % показала незначительный разброс значений прочностных характеристик и средний разброс значе-

ний для модуля продольной упругости и относительного удлинения при разрыве (табл. 2) [10].

Табл. 1. Результаты испытаний образцов из ABS-пластика

Образец	Площадь поперечного сечения A_0 , мм	Максимальная растягивающая нагрузка $F_{рм}$, Н	Предел прочности при растяжении $\sigma_{рм}$, МПа	Растягивающая нагрузка при достижении условного предела текучести $F_{рту}$, Н	Условный предел текучести при растяжении $\sigma_{рту}$, МПа	Модуль упругости при растяжении E_p , МПа	Относительное удлинение при разрыве $\varepsilon_{рр}$, %
A1	12,28	443,2	36,09	417,6	34,01	509,0	9,2
A2	12,22	445,3	36,44	418,5	34,25	511,5	12,4
A3	12,16	468,8	38,55	417,0	34,29	562,6	11,2
A4	12,16	456,7	37,56	444,7	36,57	651,0	8,0
A5	12,62	477,0	37,80	433,0	34,31	852,7	7,2
B1	12,06	503,8	41,77	484,4	40,17	497,5	9,2
B2	11,85	448,3	37,83	406,5	34,30	633,0	9,6
B3	12,24	441,3	36,05	413,9	33,82	583,5	10,4
B4	11,80	416,1	35,26	393,0	33,31	635,6	8,1
B5	12,62	511,6	40,54	464,8	36,83	837,2	10,8

Табл. 2. Механические характеристики ABS- пластика

Характеристика материала	Среднее значение	Доверительный интервал	Коэффициент вариации
Предел прочности при растяжении $\sigma_{рм}$, МПа	37,78	$\pm 1,48$	5,45
Условный предел текучести при растяжении $\sigma_{рту}$, МПа	35,19	$\pm 1,5$	5,95
Модуль упругости при растяжении E_p , МПа	627,36	$\pm 91,07$	20,29
Относительное удлинение при разрыве $\varepsilon_{рр}$, %	9,61	$\pm 1,15$	16,77

В [5] на образцах типа 1 [8], напечатанных на принтере Designer PRO 250 при скорости печати 45 мм/с, получены прочность при растяжении $\sigma_{рм} = 42,8$ МПа и модуль упругости при растяжении $E_p = 1463$ МПа. В нашем случае при аналогичной скорости печати модуль упругости в 2,3 раза ниже. Авторами [5] не указано, в каком положении формировался образец и с каким стилем за-

полнения, поэтому сравнение будет не совсем корректно.

Из указанных ранее источников [1–7] наиболее близким по условиям формирования к исследуемым образцам были образцы группы II [2], напечатанные на принтере Fortus 250mc. Характеристики прочности оказались соизмеримы с нашими результатами: $\sigma_{рм} = 39$ МПа; $\sigma_{рту} = 34,5$ МПа. Дефор-

мативные характеристики отличались значительно: модуль упругости в 2,8 раза выше нашего показателя ($E_p = 1759$ МПа) и, соответственно, относительное удлинение при разрыве более чем в 2 раза ниже нашего показателя ($\epsilon_{pp} = 4,1$ %). Следует отметить, что авторами [2] использовались образцы более крупные, с контрольной длиной 33 мм и толщиной 4 мм (стандарт ASTM D-638), что не позволяет корректно сравнивать наши испытания, т. к. результаты определения модуля упругости на малых образцах несопо-

ставимы с результатами, полученными на образцах более крупных [7]. Структура образцов в [2] равномерная, с контуром со всех сторон в одну нить.

Для выявления причины заниженного значения модуля упругости в нашем случае рассмотрим строение и структуру полученных образцов.

Используемая нить диаметром 1,75 мм при указанных выше условиях формирования материала укладывалась по толщине на всех образцах одинаково, придавая характерное строение поверхности, показанное на рис. 4.

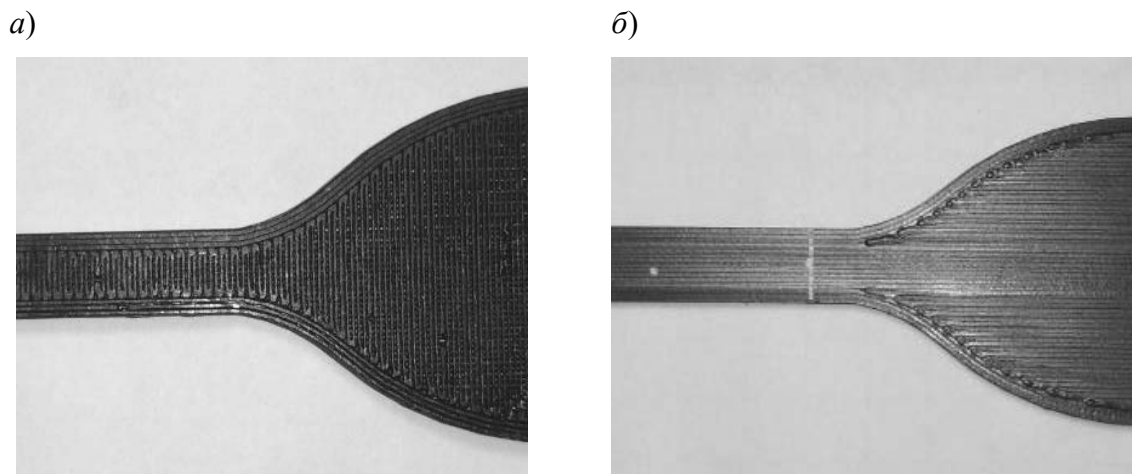


Рис. 4. Поверхность образца: *а* – первый сформированный слой с поперечным направлением нитей; *б* – последний сформированный слой с продольным направлением нитей

Принтер VSHAPER PRO на подложке формирует первый слой, в котором все нити внутренней части направлены поперек оси образца (см. рис. 4, *а*). При заданной толщине поперечного сечения в 2 мм и проволоке диаметром 1,75 мм внутренняя часть верхнего слоя в итоге формируется в продольном направлении (см. рис. 4, *б*). Таким образом, в образцах изначально была заложена несимметричность строения, которая могла повлиять на деформацию образца при растяжении.

Сопротивление слоя с продольным направлением нити соответствует деформации сплошного материала, в то

время как в поперечном слое основную нагрузку воспринимают контурные филаменты. При недостаточном спекании поперечных нитей друг с другом они могут отрываться друг от друга, не работая в полной мере на растяжение, что подтвердилось при анализе структуры разломов.

Типичный вид разлома наших образцов, полученный с помощью стереоскопического микроскопа СМО665Т при разной степени увеличения, показан на рис. 5. На данных образцах слой с поперечным направлением нитей расположен сверху.

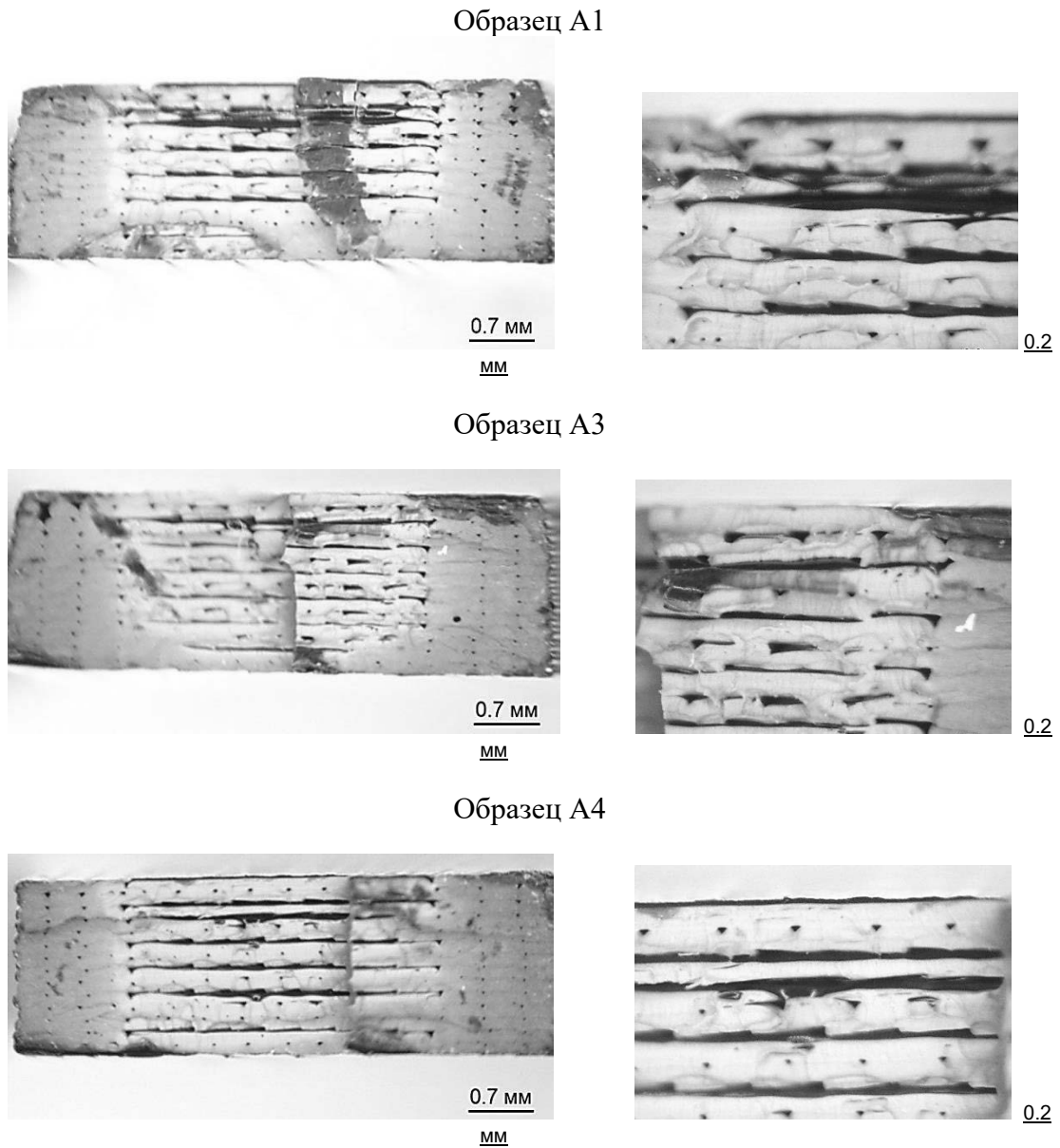


Рис. 5. Поперечное сечение образцов в разломе

Структура поперечного сечения состоит из плотных краев из трех филаментов и более рыхлой середины, занимающей приблизительно 50 % от поперечного сечения. Ряды с продольным направлением нити хорошо видны, причем между нитями нет идеального спекания, т. к. наблюдаются незаполненные материалом незначительные объемы. Темные горизонтальные полосы на разломах – это места отрыва соседних нитей с поперечным направлением,

причем в верхней части образцов расслоение более очевидно, т. к. эта часть материала оказывала меньшее сопротивление растяжению. Отрыв нитей происходил раньше разрушения образца, поэтому материал в этом слое находится в углублении (темная полоса). Практически деформацию растяжения испытывали только нити, расположенные вдоль оси образца.

В результате поперечное сечение оказалось несимметричным по степени

сопротивления растяжению, и по мере нагружения образца разрушение началось со стороны слоя с поперечным направлением нитей (см. рис. 4, а). При этом центр тяжести поперечного сечения сместился к слою с продольным направлением нитей (см. рис. 4, б), и, следовательно, образец испытывал внецентренное растяжение вместо простого центрального растяжения. Это ухудшило условия нагружения, добавив к растяжению изгиб, что изменило характер деформации образца и нарушило чистоту эксперимента согласно [8]. Для одинакового сопротивления растягивающим усилиям необходимо подобрать толщину образца таким образом, чтобы в верхнем слое нить укладывалась в поперечном направлении, что частично должно улучшить показатели модуля упругости. Лучшим сопротивлением обладал бы образец с внешними рядами из продольных нитей, однако принтер VSHAPER PRO этого не позволяет сделать: первый ряд всегда формируется в поперечном направлении. Для достижения более равномерной структуры поперечного сечения можно также применять более крупные образцы, например 1А, 1В, 2 [8].

Заключение

Определены экспериментально механические характеристики ABS-пластика, полученного методом 3D-печати по FFF-технологии на принтере VSHAPER PRO при 100-процентном заполнении объема образца стилем linear во взаимно перпендикулярных направлениях с контуром из трех филаментов. Испытания на центральное статическое растяжение двух групп образцов

типа 1 по ГОСТ 11262–2017, напечатанных горизонтально вдоль направления печати, производились на универсальной разрывной машине Kason WDW-1. Исследование разломов выполнялось с помощью стереоскопического микроскопа СМО665Т.

Анализ результатов показал, что характеристики прочности материала (предел прочности и условный предел текучести) при малом коэффициенте вариации (5,45 % и 5,95 %) соизмеримы с результатами, полученными другими авторами при аналогичных условиях формирования образцов [2], и близки к характеристикам сплошного (литого) ABS-пластика.

Модуль продольной упругости при растяжении в нашем случае оказался в 2,8 раза меньше значений, полученных в [2], где использовались образцы более крупных размеров. Обнаружилась значительная неравномерность структуры поперечного сечения исследуемых образцов, причем слой с поперечной укладкой нитей сильнее расслоился, чем слой с продольной укладкой нитей. В результате образец испытывал совместное действие растяжения и изгиба, что также повлияло на величину модуля упругости. Для недопущения такого эффекта следует регулировать толщину образца таким образом, чтобы формировалось симметричное сечение с поперечным или продольным направлением нити на внешних слоях. Для более корректного определения модуля упругости рекомендуется выбирать образцы более крупных размеров: по ГОСТ 11262–2017 – тип 1А, 1В, 2, по стандарту ASTM D-638 – тип IV. ГОСТ 11262–2017 допускает для образцов типа 1 увеличение толщины до 3 мм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование 3D-печатных образцов из пластика для испытания на растяжение / А. В. Маренкова [и др.] // Аддитивные технологии. – 2020. – № 4. – С. 24–30.
2. Шмелев, А. В. Экспериментальное и расчетное определение механических характеристик образцов ABS-пластика при растяжении, изготовленных методом 3D-печати [Электронный ресурс] /

А. В. Шмелев, В. И. Ивченко, А. В. Талалуев // Наука и инновации. – 2021. – Вып. 4. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-4-2070>. – Дата доступа: 14.04.2022.

3. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) [Электронный ресурс] / С. В. Кондрашов [и др.] // Труды ВИАМ. – 2019. – № 10 (82). – С. 34–49. – Режим доступа: <http://www.viam-works.ru>. – Дата доступа: 05.06.2022.

4. **Бурлов, В. В.** Особенности процесса свободного наслаивания расплавов аморфных термопластов и его влияние на свойства изделий, получаемых по 3D-технологии / В. В. Бурлов, К. Н. Спиров, В. К. Крыжановский // Изв. СПбГТИ(ТУ). – 2016. – № 36 (62). – С. 52–57.

5. Механические свойства ABS-пластика, полученного по FDM-технологии. Современный взгляд на проблемы технических наук / Е. С. Костина [и др.] // Современный взгляд на проблемы технических наук: сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа, 2014. – С. 42–46.

6. Свойства изделий из ABS-пластиков и полиамида, получаемых методом 3D-печати / К. С. Беседина [и др.] // Изв. СПбГТИ(ТУ). – 2018. – № 45. – С. 60–63.

7. **Балашов, А. В.** Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью [Электронный ресурс] / А. В. Балашов, М. И. Маркова // Инженер. вестн. Дона. – 2019. – № 1. – Режим доступа: ivdon.ru/magazine/archive/nly2019/5618. – Дата доступа: 14.04.2022.

8. Пластмассы. Метод испытания на растяжение: ГОСТ 11262–2017 (ISO 527–2:2012). – Введ. 01.10.2018. – Москва: СТАНДАРТИНФОРМ, 2018. – 24 с.

9. Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Часть 1. Общие принципы: ГОСТ 34370–2017 (ISO 527–1:2012). – Введ. 01.10.2018. – Москва: СТАНДАРТИНФОРМ, 2018. – 27 с.

10. **Леонович, И. А.** Исследование механических характеристик ABS-пластика в образцах, полученных FFF-печатью / И. А. Леонович // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 140.

Статья сдана в редакцию 25 ноября 2022 года

Ирина Анатольевна Леонович, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-298-40-51-52. E-mail: loleonia@gmail.com.

Даниил Дмитриевич Адинцов, студент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-444-81-19-77.

Iryna Anatolyevna Leanovich, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-298-40-51-52. E-mail: loleonia@gmail.com.

Daniil Dmitrievich Adzintsov, student, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-444-81-19-77.