

МАШИНОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.24412/2077-8481-2025-2-4-13

УДК 691.175, 620.172

И. А. ЛЕОНОВИЧ¹, канд. техн. наук, доц.

Д. Д. АДИНЦОВ²

Д. И. ЕВМЕНЕНКО¹

¹Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

²ОАО «Могилевлифтмаш» (Могилев, Беларусь)

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ СРЕДНЕЙ ПЛОТНОСТЬЮ ABS-ПЛАСТИКА АДДИТИВНОЙ СТРУКТУРЫ И ЕГО ПРОЧНОСТНЫМИ И УПРУГИМИ СВОЙСТВАМИ

Аннотация

Обобщены результаты экспериментальных исследований по определению механических характеристик ABS-пластика, полученного по технологии FFF/FDM на принтере VSHAPER PRO при его статическом растяжении. Получены линейные зависимости между пределом прочности при растяжении (а также модулем упругости при растяжении) и средней плотностью ABS-пластика, выполненного стилем «линии», и аналогичные линейные зависимости для стиля «сетка». Экспериментально подтверждена полученная зависимость для стиля «линии» в образцах, выполненных на принтере Hercules Strong, для которого доказана несущественная разница по структуре материала, выполненного стилями «линии» и «сетка», что дает право рекомендовать опираться при анализе полученных результатов на среднюю плотность материала, а не на стиль печати.

Ключевые слова:

ABS-пластик, аддитивные технологии, предел прочности при растяжении, модуль упругости при растяжении, средняя плотность материала.

Для цитирования:

Леонович, И. А. Взаимосвязь между средней плотностью ABS-пластика аддитивной структуры и его прочностными и упругими свойствами / И. А. Леонович, Д. Д. Адинцов, Д. И. Евмененко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 2 (87). – С. 4–13.

Введение

Целью исследований является анализ обширного набора полученных экспериментальных данных для определения закономерностей, связывающих механические характеристики материала с особенностями его формирования при 3D-печати.

В работе представлены обобщающие результаты статических испытаний на растяжение образцов типа 1В из ABS-пластика согласно [1, 2].

Для изготовления основного количества образцов по технологии FFF/FDM использовался 3D-принтер VSHAPER PRO (производитель VeraShape, Польша). Для подтверждения полученных закономерностей некоторое количество образцов было выполнено на 3D-принтере Hercules Strong (производитель Imprinta, РФ). Формирование образцов производилось из проволоки ABS Eco (black) от белорусской компании Alfa-Filament диаметром 1,75 мм с расположением образцов плоской стороной на

подложке.

Для указанных принтеров параметры печати были одинаковыми:

- диаметр сопла экструдера – 0,4 мм;
- скорость печати – 45...50 мм/с;
- температура головки экструдера – 235 °С...240 °С;
- температура нагрева камеры – 60 °С...65 °С;
- температура нагрева стола – 90 °С...95 °С.

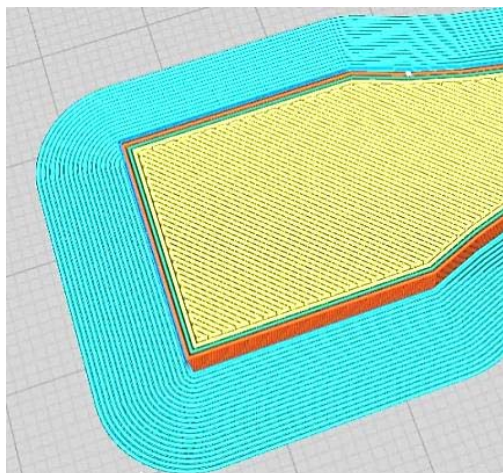
Варьировалась плотность укладки нитей и стиль заполнения объема:

«линии» (образцы серии «Л») и «сетка» (образцы серии «С»).

Методика проведения исследований и анализ результатов

На принтере VSHAPER PRO образцы изготавливались в шести сериях по пять образцов с разной степенью заполнения (100 %, 90 %, 80 %) и стилями заполнения («линии» и «сетка») (рис. 1). По периметру образцов печатался контурный слой, состоящий из трех филаментов.

а)



б)

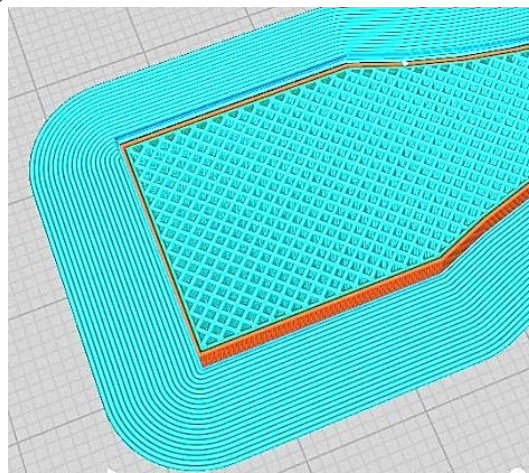


Рис. 1. Стили заполнения образцов (тип 1В): а – «линии»; б – «сетка»

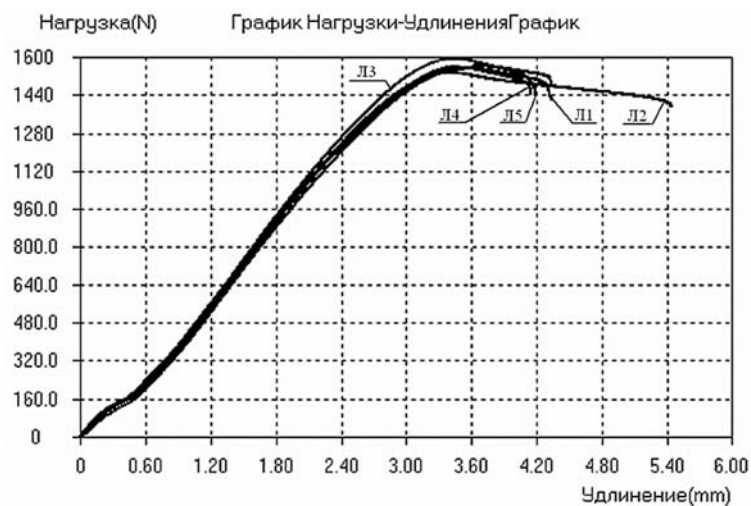
В стиле «линии» (серия образцов «Л») филаменты укладываются под углом 45° к оси образца попеременно то в одну, то в другую сторону послойно (см. рис. 1, а). Нити в соседних слоях при осевом растяжении образца будут в одинаковой степени испытывать действие растягивающей силы. В стиле «сетка» (серия образцов «С») нити также направлены под углом 45° к оси образца (см. рис. 1, б).

При испытании ABS-пластика на универсальной машине Kason WDW-5 при скорости нагружения 1 мм/мин автоматически определялись его механические характеристики в соответствии

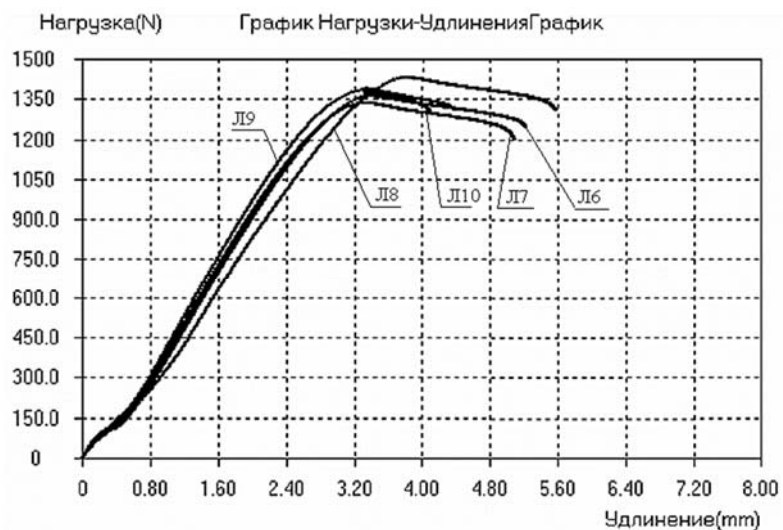
с [1, 2]. Механические диаграммы растяжения в координатах «растягивающая сила – абсолютное удлинение контрольной длины» показаны на рис. 2 и 3.

ABS-пластик не имеет площадки текучести, а автоматическое определение условного предела текучести $\sigma_{рту}$ вызывало трудности: он часто совпадал с пределом прочности или не определялся. Поэтому для дальнейшего анализа был выбран только предел прочности материала при растяжении $\sigma_{рм}$ и относительное удлинение при разрыве $\epsilon_{рр}$. Модуль продольной упругости при растяжении E_p рассчитывался по [1, 2].

а)



б)



в)

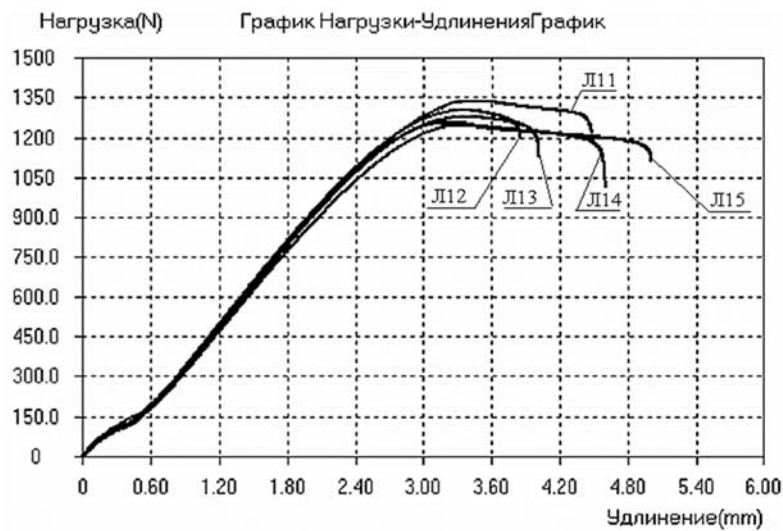
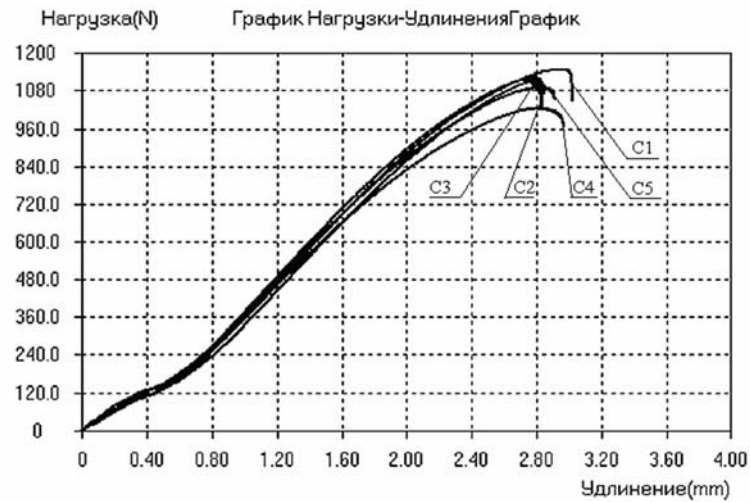
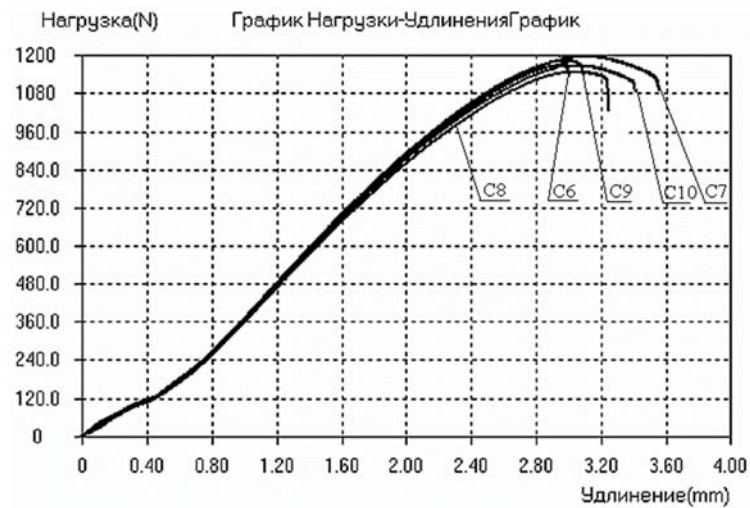


Рис. 2. Диаграммы растяжения ABS-пластика, выполненного стилем «линии»: а – образцы Л1...Л5 при 100-процентном заполнении; б – образцы Л6...Л10 при 90-процентном заполнении; в – образцы Л11...Л15 при 80-процентном заполнении

а)



б)



в)

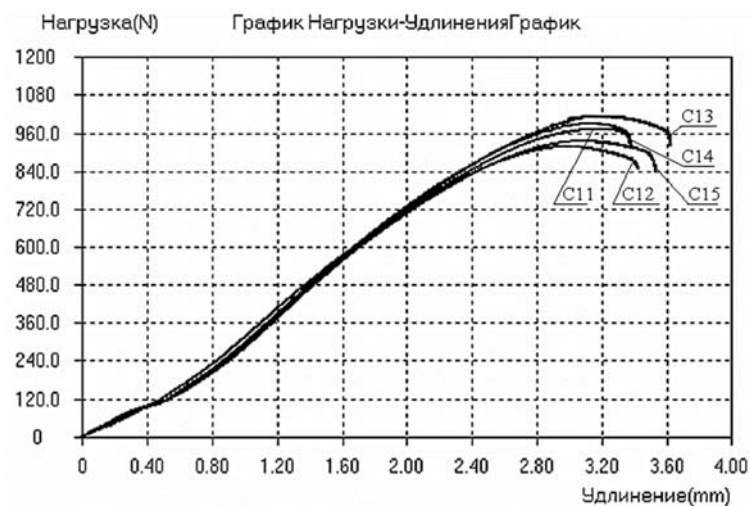


Рис. 3. Диаграммы растяжения ABS-пластика, выполненного стилем «сетка»: а – образцы C1...C5 при 100-процентном заполнении; б – образцы C6...C10 при 90-процентном заполнении; в – образцы C11...C15 при 80-процентном заполнении

Большинство образцов разрушилось в пределах контрольной длины, несколько образцов разрушились за пределами контрольной длины (С3, Л10, Л12, Л13) (рис. 4). Механические

характеристики этих образцов учитывались при статистической обработке, т. к. их показатели не выделялись существенно в своей серии образцов.



Рис. 4. Образцы серии «Л» и серии «С» после испытаний

После изучения разломов оказалось, что внутри внешнего контура равномерно сформированы только образцы серии «Л» при 100-процентном заполнении (рис. 5, *а*). В образцах этой же серии меньшая плотность заполнения (90 % и 80 %) была только в середине образца (рис. 5, *б*, *в*): нижняя и верхняя поверхность сформированы при 100-процентном заполнении.

Строение образцов серии «С» было аналогичным: сеточная структура размещалась только в средней части образца. Верхняя и нижняя плоскости образца формировались из трех слоев в стиле «линии» (рис. 6, *а*). Таким образом, в сериях «С» получились смешанные стили заполнения: из 18 слоев только 12 были заполнены стилем «сетка».

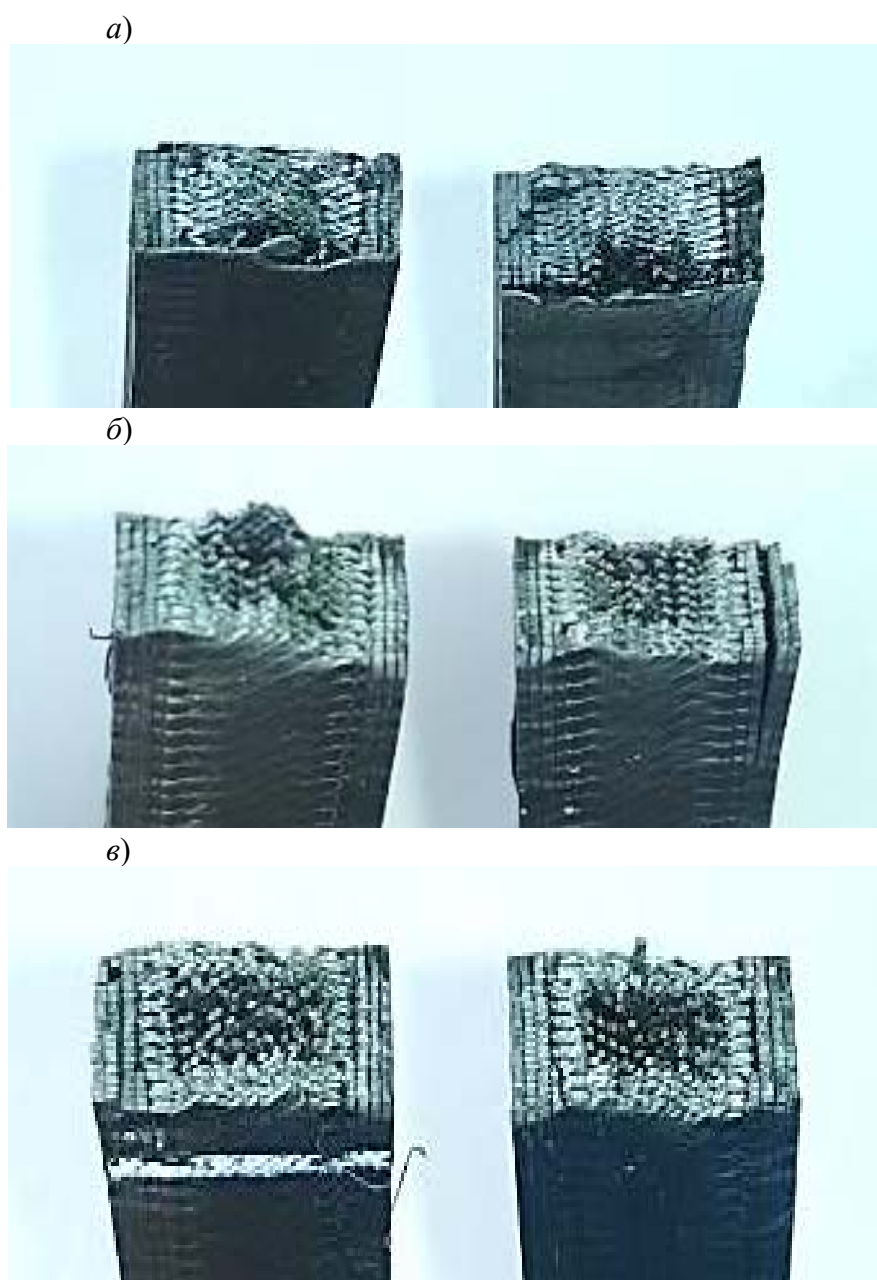


Рис. 5. Структура образцов серии «Л» в разломах: *а* – заполнение 100 %; *б* – заполнение 90 %; *в* – заполнение 80 %

а)



б)



Рис. 6. Структура образцов серии «С» в разломах: а – печать на принтере VSHAPER PRO при 100-процентном заполнении; б – печать на принтере Hercules Strong при 60-процентном заполнении

Как отмечалось ранее [3], степень неравномерности структуры материала зависит также от размеров образца: чем больше размеры образца в поперечном сечении, тем большую его часть будет занимать «рыхлая» середина, т. е. тем больше образец будет приближаться к заданному проценту заполнения.

Аналогичные серии образцов предполагалось выполнить на принтере Hercules Strong для выявления взаимосвязи прочностных и упругих характеристик материала от процента и стиля заполнения объема. Обнаружилось существенное различие в структуре полученных образцов, напечатанных на разных принтерах при одинаковых условиях печати. При 100-процентном заполнении на принтере Hercules Strong расплавление проволоки происходило в такой сильной степени, что материал получался как литой, без какой-либо структуры. В дальнейшем формирование материала производилось стилями «линии» (серия образцов Л21...Л25) и «сетка» (серия образцов С21...С25) только при 60-процентном заполнении. На этих образцах не видно было, каким стилем они сформированы, т. к. верхняя и нижняя поверхности в стиле «сетка»

заполнялись стилем «линии». Разломы образцов показали, что стилем «сетка» были заполнены только четыре (из десяти) внутренних слоя (рис. 6, б).

С учетом того, что каждый 3D-принтер формирует структуру детали согласно заложенному программному продукту, сравнивать результаты работы разных авторов только по проценту заполнения можно лишь приблизительно. Так, в [4] боковой, верхний и нижний слои состоят только из одного ряда филаментов, внутри которых формируется заданная структура. В толщине образца (4 мм, как и в наших испытаниях) укладывается 22 слоя нитей. Поэтому целесообразно при сравнении результатов испытаний собственных и других авторов ориентироваться на условную плотность, предполагая, что материал распределен по объему равномерно.

Для определения средней плотности материала образцы взвешивались на весах с точностью 0,01 г. Опираясь на размеры виртуального образца с площадью поперечного сечения 40 мм² и объемом 8,34 см³, объемы реальных образцов корректировались пропор-

ционально изменению их площади поперечного сечения по сравнению с виртуальным образцом. Результаты измерений и расчетов для образцов серий «Л»

и «С», выполненных на принтере VSHAPER PRO, показаны в табл. 1.

Табл. 1. Средняя плотность материала в сериях

Серия образцов	Средняя площадь поперечного сечения A_0 , мм ²	Масса m , г	Плотность ρ , г/см ³	Заполнение, %
Л1...Л5	43,3	8,31	1,00	100
Л6...Л10	42,13	8,02	0,96	90
Л11...Л15	42,02	7,62	0,91	80
С1...С5	46,13	8,12	0,97	100
С6...С10	41,13	7,86	0,94	90
С11...С15	43,16	7,42	0,89	80

Графики, показанные на рис. 7, демонстрируют линейную зависимость между пределом прочности на растяжение и средней плотностью материала [5]. Показатели прочности варьируются в пределах 22,4...36,1 МПа при плотности ABS-пластика 0,89...1,00 г/см³. Образцы, выполненные стилем «линии», показывают более высокую прочность по сравнению с образцами, выполненными стилем «сетка». При одинаковой заданной плотности печати стиль «сетка» создает более рыхлую структуру с меньшей плотностью.

Модуль упругости при растяжении для образцов, выполненных на принтере VSHAPER PRO, находился в пределах 667,3...780,4 МПа при плотности ABS-пластика 0,89...1,00 г/см³ (рис. 8). Прослеживается линейная зависимость в сериях «Л» и «С» по отдельности. Обработка экспериментальных данных позволила получить линейные уравнения регрессии, адекватные при 95-процентной доверительной вероятности.

На графиках не показаны результаты серий образцов, выполненных на принтере Hercules Strong при 60-процентном заполнении. Образцы серии

Л21...Л25 при средней плотности 0,85 г/см³ показали предел прочности при растяжении 29,2 МПа, что приблизительно на 9 % выше ожидаемой величины по соответствующему уравнению регрессии (см. рис. 7). Модуль упругости при растяжении этих же образцов составил 602,6 МПа, что на 13 % ниже ожидаемой величины по указанному на рис. 8 уравнению регрессии.

Образцы серии С21...С25 при средней плотности 0,78 г/см³ показали предел прочности при растяжении 25,1 МПа, что значительно ближе к образцам серии «Л» (погрешность по уравнению регрессии составила всего 11,7 %). Модуль упругости при растяжении этих же образцов составил 648,8 МПа, что также соответствует закономерности для образцов серии «Л» (погрешность по соответствующему уравнению регрессии составила всего 5 %). Таким образом, показатели образцов, полученных на принтере Hercules Strong, подтвердили вышесказанное утверждение, что в их смешанной структуре стиль «линии» занимают подавляющую часть объема, что позволяет их отнести в группу «Л».

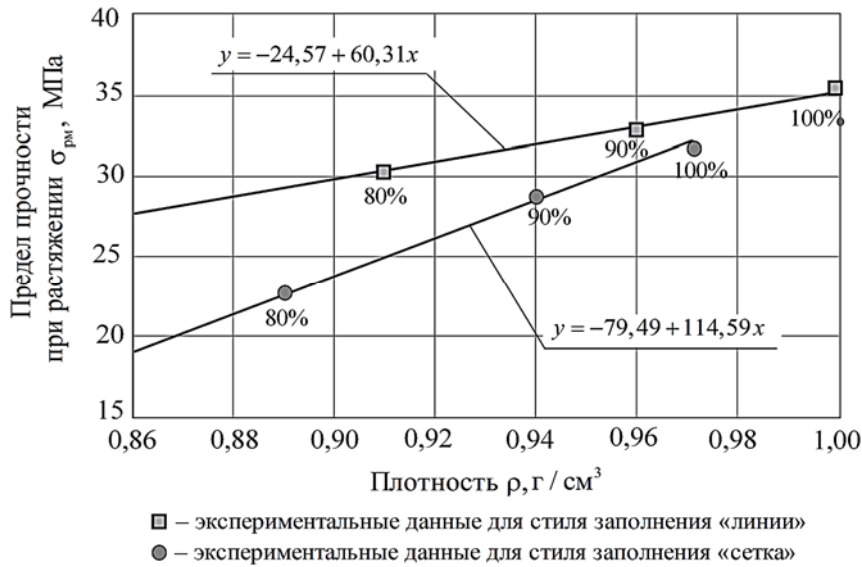


Рис. 7. Зависимость предела прочности при растяжении от средней плотности ABS-пластика, полученного на принтере VSHAPER PRO

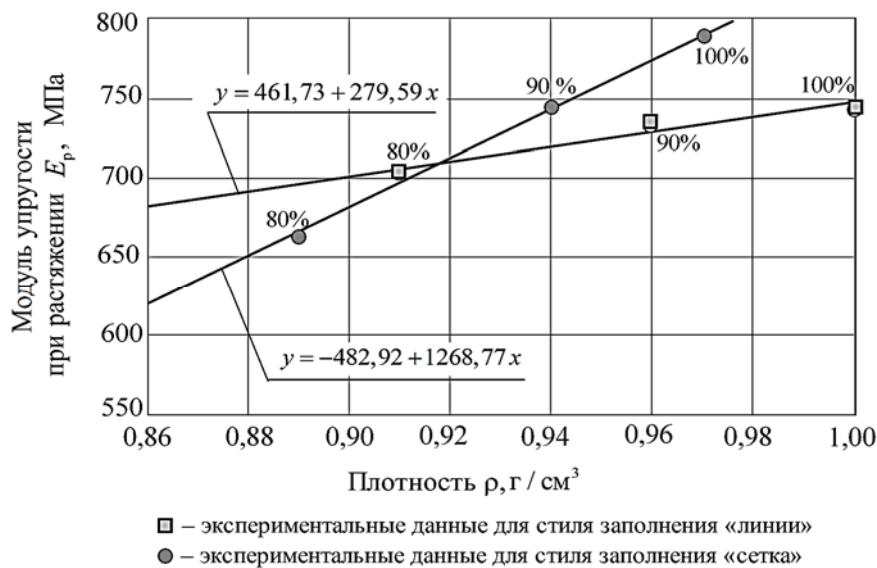


Рис. 8. Зависимость модуля упругости при растяжении от средней плотности ABS-пластика, полученного на принтере VSHAPER PRO

Заключение

В работе обобщены результаты экспериментальных исследований по определению механических характеристик ABS-пластика, полученного по технологии FFF/FDM на принтере VSHAPER PRO при его статическом растяжении. Получены линейные зависимости между пределом прочности при

растяжении (а также модулем упругости при растяжении) и средней плотностью ABS-пластика, выполненного стилем «линии», и аналогичные линейные зависимости для стиля «сетка». Экспериментально подтверждена математическая зависимость для стиля «линии» в образцах, выполненных на принтере Hercules Strong. Показатели образцов в

стиле «сетка» не подтвердили предложенную закономерность, т. к. они по структуре более близки к стилю «линии». Если эти образцы считать выполненными по стилю «линии», то они ложатся с небольшим процентом расхождения в соответствующую зависимость.

Таким образом, для разных принтеров следует учитывать особенности печати того или иного стиля. Рекомендуется использовать полученные математические зависимости для прогнозирования свойств ABS-пластика.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пластмассы. Метод испытания на растяжение: ГОСТ 11262–2017 (ISO 527–2:2012). – Введ. 01.10.2018. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2018. – 24 с.
2. Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Часть 1. Общие принципы: ГОСТ 34370–2017 (ISO 527–1:2012). – Введ. 01.10.2018. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2018. – 27 с.
3. **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. – С. 13–21.
4. **Шмелев, А. В.** Экспериментальное и расчетное определение механических характеристик образцов АБС-пластика при растяжении, изготовленных методом 3D-печати / А. В. Шмелев, В. И. Ивченко, А. В. Талалуев // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – Вып. 4. – URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-4-2070> (дата обращения: 14.04.2022).
5. **Леонович, И. А.** Предел прочности при растяжении как функция плотности ABS-пластика, полученного наплавлением нитей / И. А. Леонович, Д. Д. Адинцов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2024. – С. 117.

Статья сдана в редакцию 10 марта 2025 года

Контакты:

loleonia@gmail.com (Леонович Ирина Анатольевна);
adintsov.daniil@mail.ru (Адинцов Даниил Дмитриевич);
danikevmenenko@gmail.com (Евмененко Даниил Игоревич).

I. A. LEANOVICH, D. D. ADZINTSOU, D. I. EVMENENKO

RELATIONSHIP BETWEEN AVERAGE DENSITY OF ABS PLASTIC WITH ADDITIVE STRUCTURE AND ITS STRENGTH AND ELASTIC PROPERTIES

Abstract

The paper summarizes the results of experimental studies to determine the mechanical characteristics of ABS plastic produced under its static tension using FFF/FDM technology on a VSHAPER PRO printer. Linear dependences between the ultimate tensile strength (as well as the tensile modulus of elasticity) and the average density of ABS plastic made in the «line» style, and similar linear dependences for the «grid» style have been obtained. The obtained dependence for the «line» style has been experimentally confirmed in the samples made on the Hercules Strong printer, which has a proven insignificant difference in the structure of the material made in the «line» and «grid» styles, and it allows recommending the reliance on the average density of the material rather than on the printing style when analyzing the results obtained.

Keywords:

ABS plastic, additive technologies, tensile strength, modulus of elasticity under tension, average material density.

For citation:

Leanovich, I. A. Relationship between average density of ABS plastic with additive structure and its strength and elastic properties / I. A. Leanovich, D. D. Adzintsov, D. I. Evmenenko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2025. – № 2 (87). – P. 4–13.