

## Экспериментальное и расчетное определение механических характеристик образцов АБС-пластика при растяжении, изготовленных методом 3D-печати

© А.В. Шмелёв, В.И. Ивченко, А.В. Талалуев

ОИМ НАН Беларуси, Минск, 220072, Республика Беларусь

*Приведены результаты экспериментального исследования механических характеристик при растяжении образцов материала из АБС-пластика ABSplus-P430. Эти образцы, изготовленные методом 3D-печати, отличаются ориентацией слоев материала, формируемой расположением образцов при печати и ориентацией растра печати. В ходе испытаний материал проявил изотропные свойства по значениям модуля Юнга и анизотропные для относительного удлинения при разрыве, предела текучести и предела прочности. Выявлено существенное влияние на прочность испытанных образцов ориентации печати относительно направления прикладываемой нагрузки. Проведена идентификация указанных параметров билинейной модели материала путем выполнения серии расчетных исследований с применением компьютерных конечно-элементных моделей образцов материала. Найденные параметры билинейной модели материала могут быть использованы при проведении расчетных оценок показателей прочности и несущей способности изделий из АБС-пластика, изготовленных методом 3D-печати. Полученные результаты позволяют также разрабатывать рекомендации по ориентации изделий в области печати по критерию обеспечения наибольшей прочности с учетом режима нагружения изделия.*

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, АБС-пластик, конечно-элементная модель, механические характеристики, прочность при растяжении, билинейная модель материала

**Введение.** Аддитивные технологии широко применяются в производстве деталей машин, приборов и различного оборудования. Одними из первых возможности реализовать новые решения, раздвинуть конструктивные и технологические ограничения при создании новой техники оценили авиа- и автомобилестроители. Доля распечатанных металлических и пластиковых деталей в некоторых прототипах легковых автомобилей уже достигает 85 % [1, 2].

Все больше предприятий переходят к промышленному применению данной технологии. В частности, компания Daimler Buses использует 3D-печать для создания отдельных компонентов автобусов. С помощью 3D-принтеров было распечатано порядка 780 компонентов и 150 видов запасных деталей [3]. Трехмерную печать также внедряют в технологический процесс изготовления деталей легковых и грузовых автомобилей компании Volkswagen, Mercedes-Benz, Ford и др. Применение 3D-принтеров на предприятиях обеспечивает высокую гибкость производства, снижение затрат на технологическую

оснастку и транспортировку деталей, позволяет уменьшить складские запасы комплектующих и запасных частей [3, 4]. В результате развития, распространения и удешевления технологии число таких примеров с каждым годом значительно увеличивается.

Одним из наиболее доступных и распространенных методов 3D-печати полимеров является FDM (Fused Deposition Modeling), использующий в качестве материала АБС-пластик [5, 6]. Такая печать обеспечивается непрерывной подачей разогретого материала через движущееся по заданной траектории сопло экструдера (печатающую головку) на платформу 3D-принтера. Построение изделия происходит за счет последовательного укладывания слоев (наращивания) материала. При печати деталей сложной формы используется материал поддержки, формирующий при необходимости опорные поверхности для слоев основного материала.

Нанесение материала таким способом может формировать ортогональную анизотропию механических свойств изготавливаемого изделия. При этом, кроме механических свойств исходного материала и схемы его укладки, существенное влияние на прочностные характеристики напечатанных изделий оказывают такие технологические параметры процесса изготовления, как температура печатной головки, скорость подачи материала, толщина слоя, расстояние между линиями укладки и т. п.

При проектировании конструкций важно обеспечить требуемые характеристики их безопасности и работоспособности, которые, как правило, определяются показателями прочности или жесткости. Для проведения расчетов по оценке таких показателей требуется наличие данных по механическим характеристикам используемого материала, определенных с учетом технологии его изготовления. В отношении 3D-печати последнее непосредственно связано с оборудованием и его настройками, применяемыми для производства изделия, а также ориентации слоев и раstra печати к направлению действующей нагрузки.

Результаты исследований материалов, изготавливаемых методом 3D-печати [6–14], показывают, что основными анализируемыми механическими характеристиками являются традиционные: предел прочности, предел текучести, относительное удлинение при разрыве, а также оценивается плотность энергии деформации.

Цель настоящей статьи — определить параметры соответствующей модели материала, изготовленного методом 3D-печати, для последующего применения при оценке показателей прочности на основе численных методов расчета. Последнее требует определения комплекса механических характеристик материала по результатам натурных испытаний его образцов. При этом должна быть обеспечена достаточная достоверность математического описания поведения

материала в ходе нагружения, включая его разрушение при достижении предельных нагрузок.

**Описание методов исследований, оборудования и материалов.** Экспериментальное исследование характеристик при растяжении выполнялось с использованием плоских пропорциональных образцов материала типа IV по стандарту ASTM D-638 [15]. Эскиз образцов толщиной 4 мм представлен на рис. 1.

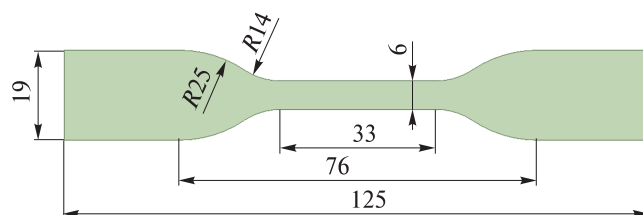


Рис. 1. Размеры пропорциональных плоских образцов материала типа IV по ASTM D-638

Для определения зависимости механических характеристик при растяжении от ориентации слоев материала изготавливались четыре группы образцов, различающихся направлением формирования слоев и раstra печати в сечении испытательного образца. Графическое пояснение к описанию особенностей структуры групп образцов приведено на рис. 2.

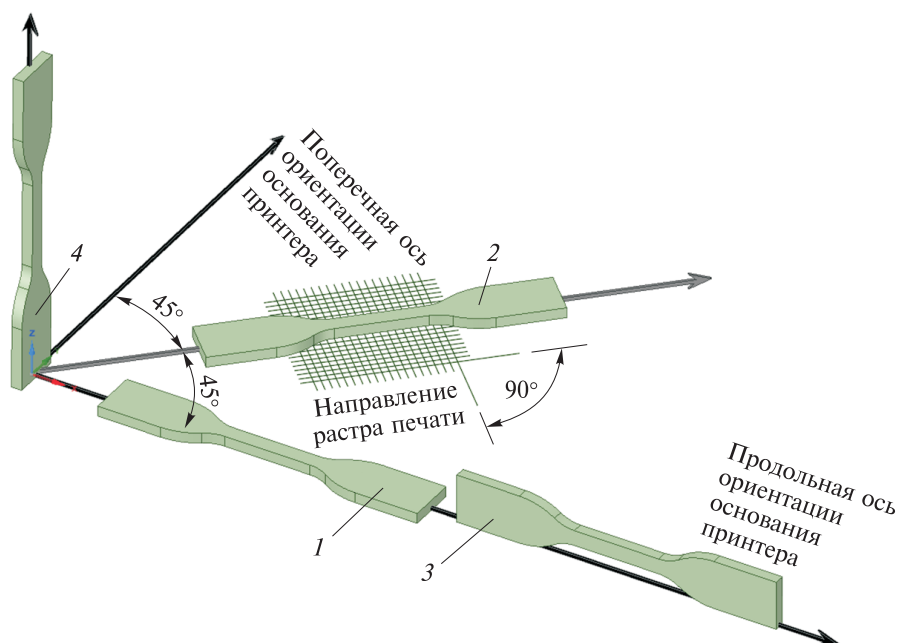


Рис. 2. Формирование структуры групп образцов материала при 3D-печати:  
1 — I (на плоскости,  $+45^\circ/-45^\circ$ ); 2 — II (на плоскости,  $0^\circ/90^\circ$ );  
3 — III (на ребре,  $+45^\circ/-45^\circ$ ); 4 — IV (вертикально,  $+45^\circ/-45^\circ$ )

Для печати образцов использовались материал ABSplus-P430 и 3D-принтер Fortus 250mc производства компании Stratasys (США). Основные параметры настройки печати 3D-принтера приведены ниже:

Дискретность слоя, мм .....	0,178
Толщина контура, мм .....	0,178
Заполнение, % .....	100
Температура головки экструдера, °С .....	310
Температура камеры, °С .....	78
Цвет нити .....	Слоновая кость

Испытания на растяжение образцов материала проводились на универсальной разрывной машине Instron Satec 300LX (рис. 3), обеспечивающей погрешность измерения деформации и нагрузки не более 0,5 %. Скорость перемещения захватов испытательной машины в ходе испытаний составляла 1 мм/мин при относительной погрешности установки скорости  $\pm 0,25$  %. Измерение деформаций рабочей зоны образца выполнялось экстензометром Instron 2630-107 GL25MM, имеющим погрешность измерения не более 0,1 %.

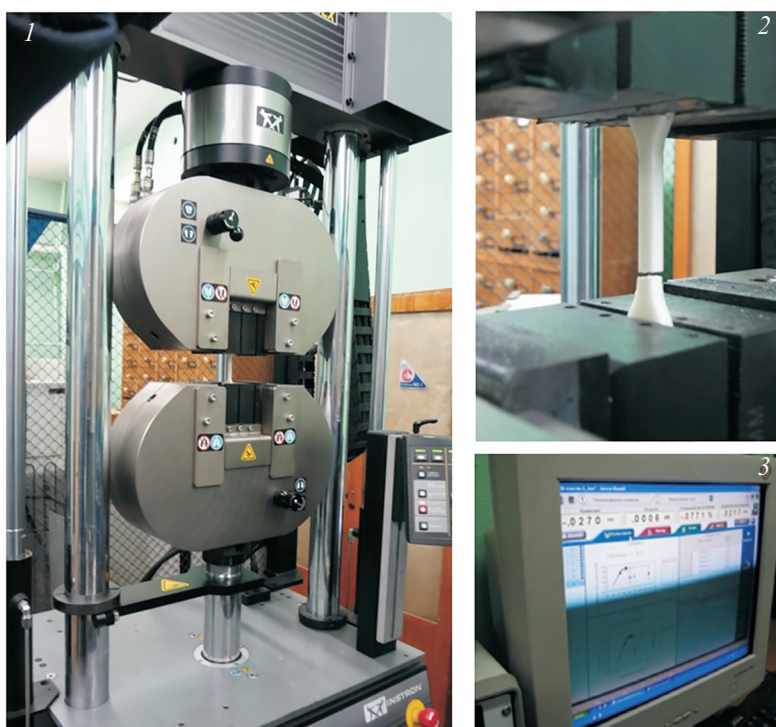


Рис. 3. Оборудование для испытания на растяжение образцов из материала ABSplus-P430:

- 1 — разрывная машина; 2 — процесс растяжения образца материала;  
3 — дисплей ПК, на котором регистрируются результаты испытаний

Поскольку АБС-пластик не имеет площадки текучести, для него определили условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ . Плотность энергии деформации рассчитывали путем интегрирования процесса изменения напряжений образца до разрушения. Испытанию подвергали по шесть образцов каждой группы. В соответствии с требованиями ГОСТ 11262–2017 испытанию подвергается не менее пяти образцов. По результатам испытаний один образец первой группы из дальнейшего анализа был исключен по причине повреждения данных в ходе регистрации.

**Анализ результатов испытаний.** Определен комплекс механических характеристик шести (1–6) образцов групп I–IV материала ABSplus-P430, полученных методом 3D-печати по FDM-технологии на 3D-принтере Fortus 250mc. Образцы материала после испытаний представлены на рис. 4. Структура материала в зонах разрушения образцов показана на рис. 5. Диаграммы разрушения образцов при растяжении приведены на рис. 6. Значения механических характеристик материала ABSplus-P430 для рассматриваемых групп образцов даны в табл. 1.

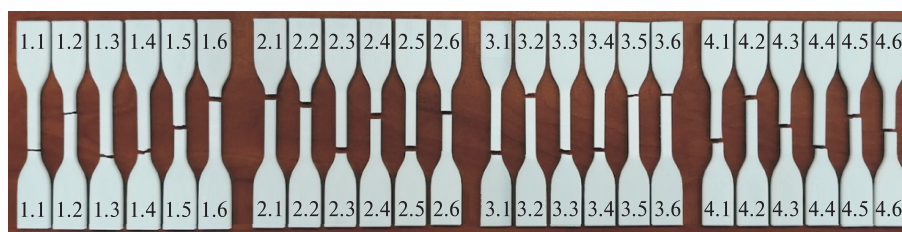


Рис. 4. Пропорциональные плоские образцы материала после испытаний на растяжение

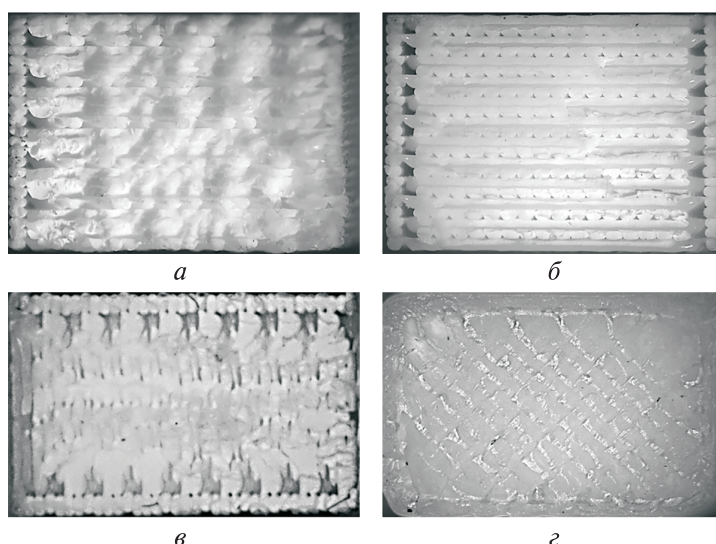


Рис. 5. Структура в зоне разрушения материала групп образцов: а — I; б — II; в — III; г — IV

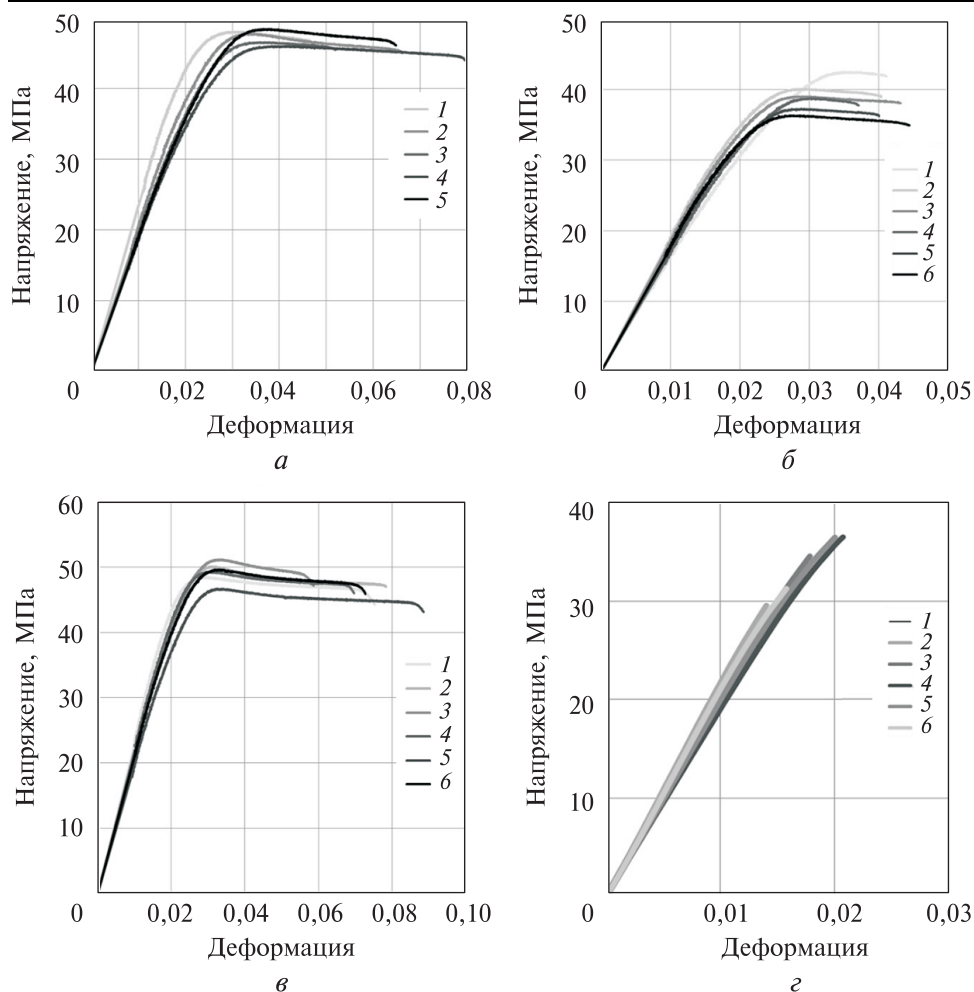


Рис. 6. Диаграммы разрушения при растяжении групп образцов:  
 а — I; б — II; в — III; г — IV

Таблица 1

**Значения механических характеристик**

Параметр		Номер группы образцов				Коэффициент вариации
		I	II	III	IV	
Модуль Юнга, МПа	Среднее значение	2010	1759	2137	2025	0,08
	Среднеквадратическое отклонение	203,1	99,5	106,3	102,8	—
Предел текучести, МПа	Среднее значение	39,9	34,5	44,5	—	0,127
	Среднеквадратическое отклонение	1,98	0,89	2,31	—	—
Предел прочности, МПа	Среднее значение	47,3	39,0	49,2	33,8	0,17
	Среднеквадратическое отклонение	1,03	2,18	1,53	2,89	—

Параметр		Номер группы образцов				Коэффициент вариации
		I	II	III	IV	
Относительное удлинение при разрыве, %	Среднее значение	6,1	4,1	7,4	1,8	0,5
	Среднеквадратическое отклонение	1,23	0,26	0,93	0,25	–
Плотность энергии деформации, МДж/м <sup>3</sup>	Среднее значение	2,36	1,14	2,96	0,30	0,708
	Среднеквадратическое отклонение	0,54	0,10	0,39	0,067	–

На основании проведенных испытаний на растяжение напечатанных по FDM-технологии на 3D-принтере Fortus 250mc образцов АБС-пластика ABSplus-P430 можно сделать следующие выводы. Исследуемый материал по ряду характеристик проявляет анизотропные свойства, присущие различным вариантам формирования его структуры, вызванным ориентацией как растра печати, так и слоев печати относительно направления прикладываемой нагрузки. При этом наибольшая анизотропия отмечается в направлении слоев печати. Поэтому рассмотрим основные отличия образцов группы IV от остальных.

Образцы материала группы IV, в отличие от образцов групп I–III, характеризуются хрупким разрушением. Причиной этого является ориентация слоев печати, которые перпендикулярны направлению прикладываемой нагрузки. Разрушение происходит при деформации около 1,8 % без выраженной пластической составляющей. При этом плотность энергии деформации отличается практически

в 8,9 раза от группы III образцов;

в 2,8 раза от группы II.

Следствием такого поведения является самый низкий предел прочности, который в среднем ниже значений самой прочной группы III образцов на 45,5 % и группы II на 15,4 %. Такое поведение обусловлено недостаточно высоким качеством межслойного спекания материала.

Из рассматриваемых показателей всех четырех групп образцов наименьшую вариативность имеют значения модуля Юнга, что позволяет сделать допущение о наличии у материала изотропии по данной характеристике. Это очень важно для определения подходов и применяемых моделей в ходе описания материала при расчетных исследованиях.

Среди образцов групп I–III наибольшее различие имеют значения относительного удлинения при разрыве, которые характеризуются значением коэффициента вариации 0,28. Наименьшее значение отно-

сительной деформации (около 4,1 %) у образцов группы II с ориентацией раstra печати 0°/90°. В условиях испытаний это соответствует ориентации линий укладки одного слоя материала вдоль направления прикладываемой нагрузки, а другого — перпендикулярно к нему. Такие условия приводят к наименьшим плотности энергии деформации и прочности образцов данной группы. Значения коэффициентов вариации для этих показателей в рассматриваемых трех группах составляют 0,43 и 0,12 соответственно. Предел текучести варьируется с коэффициентом 0,127.

Наиболее высокими показателями прочности, сопоставимыми с показателями прочности исходного материала, обладают образцы групп I и III, напечатанные на плоскости и на ребре с растровой ориентацией +45°/-45°. Для сравнения в табл. 2 приведены данные, характеризующие снижение основных прочностных характеристик для образцов групп I, II и IV по отношению к аналогичным значениям для образцов группы III.

Таблица 2

**Отклонение от значений прочностных характеристик**

Параметр	Отклонение от значений для группы III значений образцов значений групп, %		
	I	II	IV
Предел прочности	3,8	20,7	31,3
Предел текучести	10,3	22,5	–
Относительное удлинение при разрыве	17,7	44,6	75,7

Таким образом, способ печати на плоскости или на ребре не оказывает существенного влияния на механические характеристики образцов. Преобладающее влияние оказывают ориентация плоскости слоев печати и ориентация линий укладки слоев материала относительно направления прикладываемой нагрузки.

**Определение параметров модели материала.** Полученные значения механических характеристик материала можно использовать при расчетах прочности изделий, получаемых методом 3D-печати на 3D-принтере Fortus 250mc либо на других принтерах с аналогичными условиями процесса печати. При выполнении расчетов в линейной области диаграммы деформирования достаточно информации по значениям модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Последний в ходе проведенных экспериментов не определялся. Поэтому в качестве расчетного можно использовать значение  $\nu = 0,36$ , полученное в работе [10]. Это значение получено по результатам подобных исследований по определению свойств образцов из ABS-пластика, напеча-

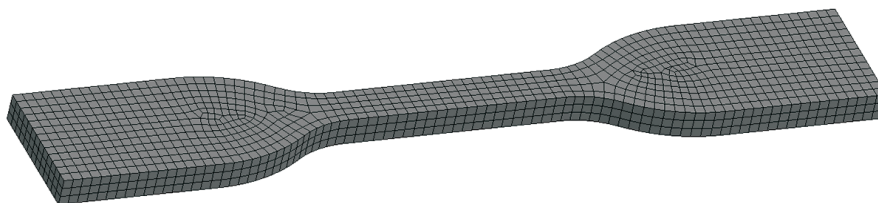


танных на 3D-принтере Ultimaker. Результаты показали, что изотропное поведение модуля Юнга и коэффициента Пуассона не зависит от ориентации слоев и раstra печати. Аналогичное заключение для значений модуля Юнга было сделано после анализа результатов испытаний в рамках настоящего исследования (см. табл. 1).

Для проведения более сложных расчетов, в которых требуется учет пластического деформирования материала, а также оценки возможности наступления разрушения, необходимо использование соответствующих моделей материала. Одна из наиболее распространенных в инженерной практике моделей, учитывающая указанные свойства, — билинейная модель с кинематическим упрочнением. Недостающими параметрами для ее описания являются тангенциальный модуль упрочнения и критерий разрушения, в качестве которого можно принять значение пластической деформации, соответствующее началу разрушения образца в ходе испытаний.

Идентификация обозначенных параметров билинейной модели материала выполнялась для групп I–III образцов с использованием средних значений механических характеристик каждого рассматриваемого типа образца. Для каждой группы образцов материала были разработаны конечно-элементные модели с геометрическими размерами поперечного сечения рабочей части, соответствующими средним значениям толщины и ширины рабочей части, определенным по результатам обмеров образцов соответствующей группы. Проведены серии расчетов, по результатам которых методом последовательных приближений были определены требуемые параметры модели материала.

Конечно-элементные модели образцов разработаны в программном комплексе ANSYS Workbench. Расчетные исследования проводились с использованием решателя LS-DYNA. Компьютерная модель образца приведена на рис. 7. При создании модели использовались элементы первого порядка гексагональной формы. По толщине образца создавалось три элемента. В рабочей части образца длина элемента не превышала 1,5 мм, а ширина — 1,2 мм.



**Рис. 7.** Конечно-элементная модель испытательного образца

Найденные значения тангенциального модуля упрочнения и пластической деформации при разрушении для каждой группы образцов материала приведены в табл. 3. В наименованиях параметров в скобках указаны обозначения параметров согласно описанию карты свойств модели \*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC программы LS-DYNA. Во всех расчетах использовано одно и то же значение коэффициента Пуассона (PR), равное 0,36 [10].

Таблица 3

Значения параметров билинейной модели материала

Наименование показателя	Номер группы образцов		
	I	II	III
Модуль Юнга (E), МПа	2010	1759	2137
Предел текучести (SIGY), МПа	39,9	34,5	44,5
Тангенциальный модуль упрочнения (ETAN), МПа	175,0	205,0	82,5
Пластическая деформация при разрушении (FS)	0,0386	0,0197	0,0550
Отличие от экспериментальных расчетных значений, %:			
относительного удлинения при разрыве	0,1	1,0	0,9
нагрузки при разрыве	1,9	1,9	3,7
плотности энергии деформации	7,6	1,2	0,8

Для сопоставления в табл. 3 также приведены результаты основных расчетных и экспериментальных значений для проверки достоверности расчетных оценок поведения материала. Для всех параметров, кроме одного — плотности энергии деформации, отличие не превысило 2 %. Расчетное значение плотности энергии деформации в группе I образцов имеет наибольшее отличие — 7,6 %. Вероятной причиной этого является наибольший разброс значений модуля Юнга для данной группы образцов. Среднеквадратическое отклонение значений в группе I практически в 2 раза больше, чем значения в других группах образцов при близких значениях самого модуля (203,1 МПа по сравнению с 99,5 и 106,3 МПа соответственно).

**Заключение.** Проведено экспериментальное исследование механических характеристик четырех групп образцов из полимерного материала, полученных методом 3D-печати по FDM-технологии на 3D-принтере Fortus 250mc, которые были подвергнуты испытанию на растяжение на разрывной машине Instron Satec 300LX. Образцы различались ориентацией расположения слоев, а также ориентацией растра печати относительно направления прикладываемой в ходе испытаний нагрузки.

Анализ результатов испытаний показал, что значения модуля Юнга для всех четырех групп образцов имели наименьшую и относительно небольшую вариативность (коэффициент вариации 0,08), т. е. по данному показателю можно считать поведение материала изотропным.

Наибольшая анизотропия свойств проявилась для относительного удлинения при разрыве. Наименьшее значение относительного удлинения имели образцы, у которых ориентация плоскости слоев печати перпендикулярна направлению приложения нагрузки. Отличие от наибольшего значения для данного параметра составило 75,7 %. Такие образцы характеризовались также хрупким разрушением и наименьшим пределом прочности, величина которого ниже наибольшего значения на 31,3 %.

Следующим по важности условием печати и нагружения является ориентация раstra печати (схема укладки линий слоев материала) относительно направления прикладываемой нагрузки. Это подтверждается тем, что образцы группы II показали снижение значений прочности и относительного удлинения по сравнению с другими наиболее прочными вариантами, отличающимися по данному свойству на 20,7 и 44,6 % соответственно.

Наибольшей и относительно равной прочностью обладали образцы, имеющие параллельное направление слоев печати и ориентацию раstra печати  $+45^\circ/-45^\circ$  к прикладываемой нагрузке.

Полученные результаты позволяют разрабатывать рекомендации по ориентации изделия в области печати при изготовлении по FDM-технологии в соответствии с критерием обеспечения наибольшей прочности с учетом режима его нагружения.

Найденные параметры билинейной модели материала могут быть использованы при проведении расчетных оценок показателей прочности и несущей способности изделий из АБС-пластика, изготовленных методом 3D-печати, при относительно простых случаях нагружения. При выборе применяемых для расчета параметров модели материала или критериев оценки прочности необходимо учитывать направление действия нагрузки в наиболее нагруженных зонах конструкции к ориентации слоев и раstra печати.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] 10 крутых автомобилей, которые были отпечатаны на 3D-принтере. *Novate.ru* URL: <http://www.novate.ru/blogs/230916/38135/> (дата обращения 20.11.2020).
- [2] Первый напечатанный на 3D-принтере миниавтобус. *Fishki.net* URL: <https://fishki.net/auto/1996051-pervyj-napechatannyj-na-3d-printere-miniavtobus.html> (дата обращения 22.12.2017).
- [3] Пелевин Н. Daimler Buses внедряет 3D-печать для изготовления деталей. *3d-daily.ru* URL: <https://3d-daily.ru/cars/daimler-bus-3dp.html> (дата обращения 26.11.2020).
- [4] Казьмина Я. В *Volkswagen* начали использовать 3D-принтеры в производстве автомобилей. URL: [https://infostart.ru/journal/news/tekhnologii/v-volkswagen-nachali-ispolzovat-3d-printery-v-proizvodstve-avtomobiley\\_640398/](https://infostart.ru/journal/news/tekhnologii/v-volkswagen-nachali-ispolzovat-3d-printery-v-proizvodstve-avtomobiley_640398/) (дата обращения 26.11.2020).

- [5] Абрамова И.А., Полков Д.А. Технология послойного наплавления Fused Deposition Modeling. *Наука и военная безопасность*, 2016, № 3, с. 111–114.
- [6] Mohamed O.A., Masood S.H., Bhowmik J.L. Optimization of fused deposition modelling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, 2015, no. 3, pp. 42–53. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>
- [7] Somireddy M., Czekanski A., Veer Singh C. Development of constitutive material model of 3D printed structure via FDM. *Materials Today Communications*, 2018, no. 15. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.03.004>
- [8] Балашов А.В., Маркова М.И. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью. *Инженерный вестник Дона*, 2019, № 1. URL: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_150\\_Balachov\\_Markova.pdf\\_b4469f3dc9.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_150_Balachov_Markova.pdf_b4469f3dc9.pdf) (дата обращения 20.11.2020).
- [9] Zalohin M.Yu., Skliarov V.V., Dovzhenko J.S., Brega D.A. Experimental Determination and Comparative Analysis of the PPH030GP, ABS and PLA Polymer Strength Characteristics at Different Strain Rates. *Science & Technique*, 2019, no. 18, pp. 233–239. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-233-239>
- [10] Cantrell J., Rohde S., Damiani D., Gurnani R., DiSandro L., Anton J., Young A., Jerez A., Steinbach D., Kroese C., Ifju P. Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D Printed ABS and Polycarbonate Parts. *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*, 2017, vol. 3, pp. 89–105. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-41600-7\\_11](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-41600-7_11) (дата обращения 15.10.2020). DOI: 10.1007/978-3-319-41600-7\_11
- [11] Wu W., Geng P., Li G., Zhao D., Zhang H., Zhao J. Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. *Materials*, 2015, vol. 8, pp. 5834–5846. DOI: 10.3390/ma8095271
- [12] Ziemian C., Sharma M., Ziemian S. Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling. *Mechanical Engineering*, 2012, pp. 159–180. URL: <http://www.intechopen.com/books/mechanical-engineering/anisotropicmechanical-properties-of-abs-parts-fabricated-by-fused-deposition-modeling> (дата обращения 05.11.2020). DOI: 10.5772/34233
- [13] Letcher T., Waytashek M. Material property testing of 3D-Printed specimen in PLA on an entry-level 3D printer. *ASME*, 2014, pp. 1–8. URL: <https://www.researchgate.net/publication/272623242> (дата обращения 15.10.2020). DOI: 10.1115/IMECE2014-39379
- [14] Zarybnicka L., Dvorak K., Dostalova Z., Vojackova H. Study of Different Printing Design Type Polymer Samples Prepared by Additive Manufacturing. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 2020, no. 64, pp. 255–264. <https://doi.org/10.3311/PPch.13991>
- [15] ASTM D638-14. Стандартный метод испытаний свойств пластмасс на растяжение. *ASTM International*, 2014, pp. 17.

Статья поступила в редакцию 10.02.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Шмелёв А.В., Ивченко В.И., Талалуев А.В. Экспериментальное и расчетное определение механических характеристик образцов АБС-пластика при растяжении, изготовленных методом 3D-печати. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-4-2070>

**Шмелёв Алексей Васильевич** — канд. техн. наук, заместитель генерального директора по научной работе, ОИМ НАН Беларуси. e-mail: shmeliov.alexei@gmail.com

**Ивченко Вадим Иванович** — заместитель начальника Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля, ОИМ НАН Беларуси.  
e-mail: ivchenkovad@mail.ru

**Талалуев Алексей Валентинович** — начальник Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля, ОИМ НАН Беларуси.  
e-mail: taval@tut.by

## Experimental and estimated determination of mechanical characteristics of 3D printed ABS plastic samples under tension

© A.V. Shmelev, V.I. Ivchenko, A.V. Talaluev

The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

*The paper introduces the results of an experimental study of the mechanical characteristics of 3D printed ABS plastic ABSplus-P430 samples under tension. These 3D printed samples differ in the orientation of the material layers, formed by the position of the samples when printed, and the print raster pattern. During the tests, the material showed isotropic properties in terms of Young's modulus and anisotropic properties for elongation at break, yield strength, and ultimate strength. We revealed that the print orientation relative to the direction of the applied load significantly affects the strength of the tested samples. Using the obtained test results, the specified parameters of the bilinear model of the material were identified by performing a series of computational studies using computer finite element models of material samples. The found parameters of the bilinear model of the material can be used to carry out computational estimation of the strength and bearing capacity of ABS plastic products manufactured by 3D printing. The results obtained also make it possible to develop recommendations for the orientation of products in the printing area according to the criterion of ensuring the greatest strength, taking into account the loading mode of the product.*

**Keywords:** additive technologies, ABS plastic, finite element model, mechanical characteristics, tensile strength, bilinear material model

### REFERENCES

- [1] 10 krutykh avtomobiley, kotorye byli otpechatany na 3D-printere [10 cool cars that were 3D printed]. Available at: <http://www.novate.ru/blogs/230916/38135/> (accessed November 20, 2020).
- [2] Pervy napechatanny na 3D-printere miniavtobus [First 3D printed minibus]. Available at: <https://fishki.net/auto/1996051-pervyj-napechatannyj-na-3d-printere-miniavtobus.html> (accessed December 22, 2017).
- [3] Pelevin N. Daimler Buses vnedryaet 3D pechat dlya izgotovleniya detaley [Daimler buses introduces 3D printing to manufacturing parts]. Available at: <https://3d-daily.ru/cars/daimler-bus-3dp.html> (accessed November 26, 2020).
- [4] Kazmina Ya. V Volkswagen nachali ispolzovat 3D-printery v proizvodstve avtomobiley [Volkswagen began to use 3D printers in car production]. Available at: [https://infostart.ru/journal/news/tehnologii/v-volkswagen-nachali-ispolzovat-3d-printery-v-proizvodstve-avtomobiley\\_640398/](https://infostart.ru/journal/news/tehnologii/v-volkswagen-nachali-ispolzovat-3d-printery-v-proizvodstve-avtomobiley_640398/) (accessed November 26, 2020).
- [5] Abramova I.A., Polkov D.A. *Nauka i voennaya bezopasnost (Science and military security)*, 2016, no. 3, pp. 111–114.
- [6] Mohamed O.A., Masood, S.H., Bhowmik, J.L. Optimization of fused deposition modelling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, 2015, no. 3, pp. 42–53. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>
- [7] Somireddy M., Czekanski A., Veer Singh C. Development of constitutive material model of 3D printed structure via FDM. *Materials Today Communications*, 2018, no. 15. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.03.004>

- [8] Balashov A.V., Markova M.I. *Inzhenerny vestnik Dona — Engineering journal of Don*, 2019, no. 1. Available at: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_150\\_Balachov\\_Markova.pdf\\_b4469f3dc9.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_150_Balachov_Markova.pdf_b4469f3dc9.pdf) (accessed November 20, 2020).
- [9] Zalohin M.Yu., Skliarov V.V., Dovzhenko J.S., Brega D.A. Experimental Determination and Comparative Analysis of the PPH030GP, ABS and PLA Polymer Strength Characteristics at Different Strain Rates. *Science & Technique*, 2019, no. 18, pp. 233–239. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-233-239>
- [10] Cantrell J., Rohde S., Damiani D., Gurnani R., DiSandro L., Anton J., Young A., Jerez A., Steinbach D., Kroese C., Ifju P. Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D Printed ABS and Polycarbonate Parts. *Advances of Optical Methods in Experimental Mechanics*, 2017, vol. 3, pp. 89–105. Available at: [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-41600-7\\_11](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-41600-7_11) (accessed October 15, 2020). DOI: 10.1007/978-3-319-41600-7\_11
- [11] Wu W., Geng P., Li G., Zhao D., Zhang H., Zhao J. Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. *Materials*, 2015, vol. 8, pp. 5834–5846. <https://doi.org/10.3390/ma8095271>
- [12] Ziemian C., Sharma M., Ziemian S. Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling. *Mechanical Engineering*, 2012, pp. 159–180. Available at: <http://www.intechopen.com/books/mechanical-engineering/anisotropicmechanical-properties-of-abs-parts-fabricated-by-fused-deposition-modeling> (accessed November 05, 2020). DOI: 10.5772/34233
- [13] Letcher T., Waytashek M. Material property testing of 3D-Printed specimen in PLA on an entry-level 3D printer. *ASME*, 2014, pp. 1–8. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/272623242> (accessed October 15, 2020). DOI: 10.1115/IMECE2014-39379
- [14] Zarybnicka L., Dvorak K., Dostalova Z., Vojackova H. Study of Different Printing Design Type Polymer Samples Prepared by Additive Manufacturing. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 2020, no. 64, pp. 255–264. <https://doi.org/10.3311/PPch.13991>
- [15] *ASTM D638–2014. Standartny metod ispytaniy dlya opredeleniya svoystv plastmass pri rastyazhenii* [Standard test method for tensile properties of plastics]. ASTM International, 2014, pp. 17.

**Shmelev A.V.**, Cand Sc. (Eng.), Deputy General Director for Research, The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus. e-mail: [shmeliiov.alexei@gmail.com](mailto:shmeliiov.alexei@gmail.com)

**Ivchenko V.I.**, Deputy Head of the Republican Computer Center for Mechanical Engineering, The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus. e-mail: [ivchenkovad@mail.ru](mailto:ivchenkovad@mail.ru)  
SPIN-code: 2639-6637, ORCID: 0000-0002-1146-5343.

**Talaluev A.V.**, Head of the Republican Computer Center for Mechanical Engineering, The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus. e-mail: [taval@tut.by](mailto:taval@tut.by)