

Физико-механические свойства акрилонитрил-стирол-акрилата в зависимости от степени заполнения при аддитивном производстве

Physico-mechanical properties of acrylonitrile styrene acrylate as a function of filling level in additive manufacturing

А.П. ВАСИЛЬЕВ¹, А.А. ДЬЯКОНОВ^{1,2}, А.М. СПИРИДОНОВ¹, А.А. ОХЛОПКОВА¹

A.P. VASILYEV¹, A.A. DIACONOV^{1,2}, A.M. SPIRIDONOV¹, A.A. OHLOPKOVA¹

¹ Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск, Россия

² Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия

¹ M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, RS(Ya), Russia

² V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russia

gtvap@mail.ru

В работе исследованы физико-механические свойства образцов из акрилонитрил-стирол-акрилата (АСА), изготовленных методом аддитивного производства. Изучено влияние степени заполнения (30%, 60%, 80% и 100%) на твердость, плотность и механические свойства. Установлено, что твердость по Шору Д остается постоянной при степени заполнения от 30 до 80%, а при заполнении на 100% увеличивается примерно на 8%. Плотность деталей монотонно возрастает с увеличением степени заполнения, достигая максимума при 100% заполнении. Испытания на трехточечный изгиб показали наибольшие значения прочности и модуля упругости при степени заполнения 100%. Прочность при растяжении образцов с малым сечением значительно повышается при заполнении от 80% до 100% (примерно на 43% и 76%), тогда как для образцов с большим сечением данный параметр практически не зависит от степени заполнения. Удлинение образцов увеличивается с ростом заполнения, достигая максимума при 100% заполнении. Результаты показывают, что степень заполнения и геометрия образцов оказывают существенное влияние на механические свойства, что позволяет оптимизировать параметры 3D-печати для создания изделий с заданными характеристиками.

Ключевые слова: аддитивное производство, акрилонитрил-стирол-акрилат (АСА), степень заполнения, механические свойства

The physical and mechanical properties of acrylonitrile-styrene-acrylate (ASA) samples made by additive manufacturing have been investigated in this work. The influence of the filling degree (30%, 60%, 80% and 100%) on hardness, density and mechanical properties has been studied. It was found that the Shore D hardness remains constant at the degree of filling from 30% to 80 and increases by about 8% at 100 % filling. The density of parts increases monotonically with increasing degree of filling, reaching a maximum at 100% filling. Three-point bending tests showed the highest values of strength and modulus of elasticity at 100% fill. The tensile strength of specimens with small cross-section increases significantly at 80% to 100% filling (by about 43% and 76%), whereas for specimens with large cross-section this parameter is practically independent of the filling degree. The elongation of the specimens increases with increasing filling, reaching a maximum at 100% filling. The results show that the degree of filling and specimen geometry have a significant effect on mechanical properties, which allows us to optimize 3D printing parameters to create products with specified characteristics.

Keywords: additive manufacturing, acrylonitrile-styrene-acrylate (ASA), degree of filling, mechanical properties

DOI: 10.35164/0554-2901-2025-03-10-14

Введение

В настоящее время аддитивное производство (АП, 3D-печать) широко внедряется во все отрасли промышленности благодаря своим многочисленным преимуществам. Изделия и детали, полученные с помощью 3D-принтера, уже широко используются в различных отраслях, от медицины до аэрокосмической промышленности [1, 2]. Преимущества 3D-печати включают в себя простоту изготовления сложных деталей и изделий с уменьшением количества отходов материала, сокращенное время производства и более низкие потребности в энергии. Однако, несмотря на все преимущества, 3D-печать также сталкивается с определенными вызовами. Одним из таких вызовов является необходимость тщательной калибровки и настройки оборудования для достижения оптимальных результатов. Необходимо также учитывать, что не все материалы, используемые в 3D-печати, обладают одинаковыми свойствами, и выбор неподходящего материала может снизить качество конечного изделия [3, 4].

Широко используемой технологией 3D-печати полимерными материалами является метод послойного наплавления нити (FDM/FFF-печать). В данной технологии полимерные материалы в форме нити (филамента) подаются в горячий экструдер и выдавливаются в заданной геометрии со сплавлением нитей между собой при

их послойном наложении. Несмотря на относительную простоту, высокую скорость и низкую стоимость, метод послойного наплавления нитей представляет собой сложный процесс с большим количеством параметров, которые влияют на качество и свойства конечных изделий [5, 6]. Тем не менее, механические свойства изделий, полученных методом послойного наплавления нити, в целом можно контролировать степенью заполнения (конечная плотность) и ориентацией нити [7]. В последние годы технология метода послойного наплавления нити активно изучается [8–11].

В научной литературе одним из малоизученных термопластичных полимеров, используемых в АП, является акрилонитрил-стирол-акрилат (АСА), который по механическим свойствам и условиям 3D-печати схож с АБС-пластиком [12]. Известно, что АСА обладает устойчивостью к нагреванию и воздействию химических продуктов [10, 13]. Отличительной особенностью АСА по сравнению с АБС-пластиком и другими материалами является устойчивость к ультрафиолетовому излучению и к воздействию окружающей среды. Кроме того, полимер АСА характеризуется более низкой температурой стеклования по сравнению с АБС, т.е. имеет лучшие низкотемпературные свойства [14]. Благодаря совокупности приведенных свойств данный полимер используется в аэрокосмической, автомобильной и судостроительной промышленности [15].

В работе [16] исследовали влияние температуры на термические и механические свойства полимера АСА, полученного аддитивным производством. Установили, что при температуре экструзии ниже 240°C возникают проблемы с пригодностью для 3D-печати. Оптимальной температурой печати для АСА выбрали 250°C, тем не менее, выявили очевидное снижение характеристик, которое составляет одну треть от характеристик образцов, полученных экструзией и литьем под давлением. В работе [13] исследовано влияние пяти факторов (ориентация, температура, высота слоя, степень заполнения и угол раstra) в трех уровнях варьирования на механические свойства образцов АСА. Авторами работы установлено, что степень заполнения и высота слоя оказывают наибольшее влияние на механические свойства при изготовлении объектов, напечатанных на 3D-принтере. Похожие результаты получены в работе [17], где оценены механические свойства АСА в зависимости от направления печати, степени заполнения и толщины слоя. Авторами работы показано, что увеличение степени заполнения образца АСА приводит к повышению прочности при растяжении.

Разработка функциональных изделий требует лучшего понимания закономерностей формирования комплекса физико-механических свойств полимерных деталей, полученных на 3D-принтере [18]. Физико-механические характеристики полимерных деталей, напечатанных на 3D-принтере, существенно отличаются от характеристик деталей, изготовленных традиционными методами, например, экструзией и литьем под давлением [19–21]. Как правило, отличие заключается в том, что полимерные детали, полученные на 3D-принтере, отличаются невысокими механическими характеристиками по сравнению с деталями, полученными традиционными методами. Тем не менее, физико-механические свойства деталей, полученных на 3D-принтере, можно изменять в процессе проектирования и 3D-печати, тем самым данная технология может стать альтернативой для производства компонентов изделий в машиностроении. Таким образом, для расширения области применения полимера АСА, перерабатываемого методом аддитивного производства, необходимо комплексное изучение физико-механических свойств в зависимости от параметров 3D-печати и геометрических размеров изделий.

В данном исследовании АСА печатается на 3D-принтере с использованием метода наплавления нити путем изменения степени заполнения и размера испытываемого образца при сохранении других параметров неизменными. Определена плотность деталей в зависимости от степени заполнения и геометрического размера, а также оценена их твердость. В более ранних опубликованных работах по 3D-печати [12, 13, 16] приведенные характеристики в зависимости от степени заполнения и геометрического размера для полимера АСА не рассматривались, что дает новые данные по сравнению с предыдущими работами, выполненными в этой области. Результаты экспериментов дополняют существующие представления о физико-механических свойствах изделий из акрилонитрил-стирол-акрилата, напечатанных на 3D-принтере.

Цель данной работы состоит в установлении связи между степенью заполнения и геометрическими размерами 3D-изделий из АСА с их физико-механическими характеристиками.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является коммерчески доступный инженерный материал в виде филамента eASA (АСА) производства Shenzhen Esun Industrial Co. Ltd (Китай). Диаметр нити составляет $1,75 \pm 0,05$ мм, цвет – черный, плотность – около 1 г/см^3 . Рекомендуемые производителем нити параметры 3D-печати: температура сопла от 240°C до 270°C, температура стола от 90°C до 110°C, скорость подачи от 20 до 90 мм/с.

Образцы для исследования изготовлены с использованием принтера Creatbot PEEK-300 производства Henan Suwei Electronic Technology Co., LTD (Китай) с установленным экструдером (диаметр сопла 0,4 мм). Твердотельные модели образцов из формата STL-файла преобразовывали в G-code в программе CreatWare Version 7.2.0. Оптимизированные параметры печати, определенные экспериментальным путем, приведены в таблице 1.

Изготовлены образцы АСА со следующими фиксированными условиями 3D-печати: диаметр сопла – 0,4 мм, толщина слоя – 0,2 мм, шаблон заполнения – прямолинейный с углом наложения

плюс 45°/минус 45°, толщина верхнего и нижнего слоя составляла 4 (0,8 мм), количество линий стенок – 2 (0,4 мм) и скорость печати – 40 мм/с. Единственным варьируемым параметром 3D-печати является степень заполнения, которая рассматривается в диапазоне значений: 30%, 60%, 80% и 100%. В зависимости от степени заполнения образцы далее обозначены следующим образом: АСА-30, АСА-60, АСА-80 и АСА-100.

Таблица 1. Оптимизированные параметры 3D-печати.

Параметр	Значение
Температура сопла	260°C
Температура стола	110°C
Температура камеры	50°C
Адгезив для стола	поливинилпирролидон (клей ПВП)

Механические испытания на одноосное растяжение образцов АСА проводили на универсальной машине испытания МИМ.2-5-2.1-16.1.2-3.1.1 (Компания «ГОСТ», Россия). Испытания образцов АСА осуществляли согласно ГОСТ Р 56800–2015: использовали двухсторонние лопатки прямоугольного сечения (тип 4 и тип 5), скорость проведения испытаний – 50 мм/мин (тип 4) и 10 мм/мин (тип 5), температура 23°C. Определяемые параметры: прочность при растяжении (МПа) и относительное удлинение при разрыве (%). На рис. 1 приведены геометрические размеры и внешний вид напечатанных на 3D-принтере образцов АСА. Два типа лопаток с разными сечениями были выбраны для изучения размерных эффектов, где расхождение между номинальной и фактической степенью заполнения может быть отличительным. На увеличенных изображениях (справа рис. 1а, вид сбоку; справа рис. 1б, вид сверху) представлены результаты оптической микроскопии экструдированных нитей, формирующих поверхность лопатки.

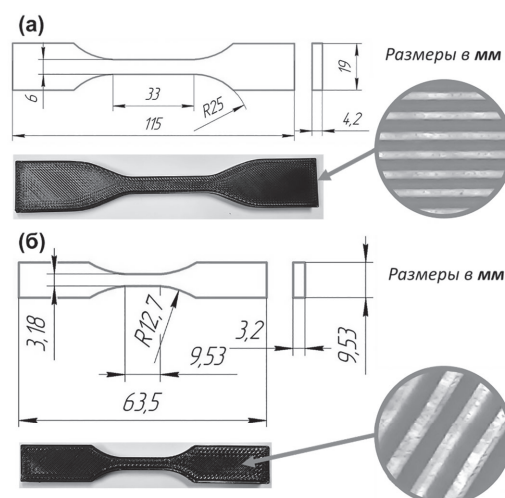


Рис. 1. Геометрические размеры и внешний вид образцов для испытаний: а) образцы тип 4; б) образцы тип 5.

Твердость образцов определена на твердомере ТВР-D (Восток-7, Россия) с аналоговым индикатором для измерения твердости по шкале Шора тип Д согласно ГОСТ 24621–2015 (ISO 868–2003). Испытания проводили при комнатной температуре 23°C.

Испытания на трехточечный статический изгиб проводили согласно ГОСТ 4648–2014: образцы с размерами $80 \times 10 \times 4$ мм, скорость испытания – 2 мм/с, расстояние между опорами – 64 мм.

Плотность образцов определяли по ГОСТ 409-2017 (ISO 845:2006). Испытания проводили при комнатной температуре 23°C и относительной влажности не более 50%. Образцы представляли собой цилиндры с размерами 40×20 мм.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены результаты исследования твердости по Шору Д и плотности деталей из АСА, полученных на 3D-принтере.

Из рис. 2а видно, что при комнатной температуре твердость по Шору Д образцов АСА остается практически неизменной при заполнении от 30% до 80%. Это, прежде всего, связано с тем, что толщина верхнего и нижнего слоя одинакова и составляет 4 слоя (0,8 мм) во всех испытываемых образцах. В случае образца АСА с заполнением 100% твердость по Шору Д повысилась примерно на 8% относительно остальных образцов. Объяснение данного факта

заключается в том, что в АСА-100 все слои заполнены полностью и образец «монолитный». Похожие результаты изменения твердости в зависимости от степени заполнения АСА были получены в работе [22], где наибольшей твердостью характеризовался образец со степенью заполнения 90%, а количество линий стенок образцов составляло – 1. Отличия в значениях твердости объяснили скоростью охлаждения, вызванной различием масс образцов с разной степенью заполнения.

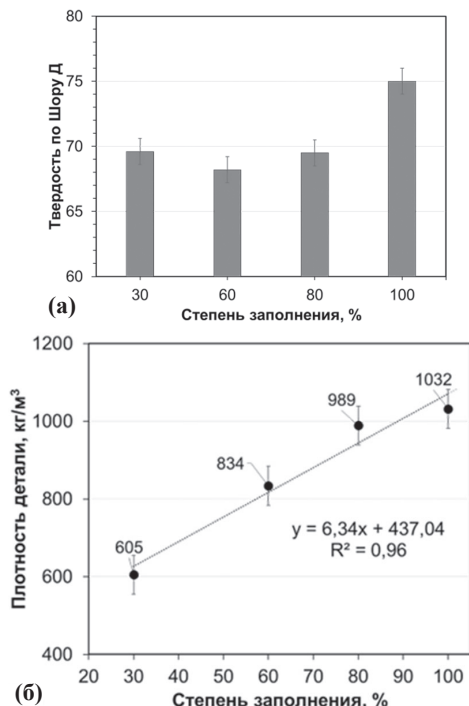


Рис. 2. Зависимость твердости по Шору Д (а) и плотности детали (б) от степени заполнения образцов АСА.

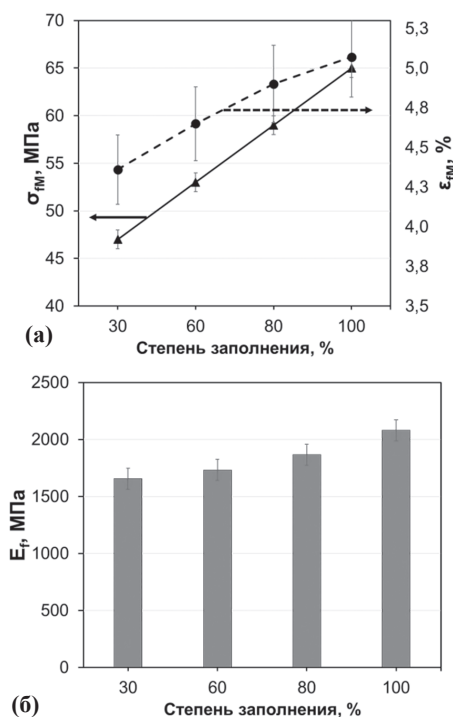


Рис. 3. Влияние степени заполнения образцов АСА на изгибающее напряжение и относительную деформацию изгиба при максимальной нагрузке (а); модуля упругости при изгибе (б).

Одним из важных параметров при проектировании и конструировании деталей является значение плотности материала. Плотность материала АСА по данным литературных источников [15, 16] находится в диапазоне от 1050 до 1070 кг/м³, что является практически недостижимым для 3D-печати методом послойного наплавления. Как правило, детали, полученные методом аддитивных технологий, являются пористыми даже при 100% заполнении. Соответственно, конечная плотность определяется требованиями

к свойствам готового продукта. Кроме того, плотность изделий, полученных методом 3D-печати, в зависимости от размера образца также может быть неоднородной в силу заданных параметров и разрешающей способности принтера. Из рис. 2б видно, что с повышением степени заполнения плотности детали АСА монотонно возрастает. Коэффициент достоверности аппроксимации составляет $R^2 = 0,96$, а р-значение составляет 0,0062, что указывает на статистическую значимость модели, и представленную на рис. 2б формулу можно с высокой достоверностью использовать для расчета плотности при других значениях заполнения, если прочие условия трехмерной печати одинаковы. Таким образом, исследование 3D-образцов из АСА в зависимости от степени заполнения показало, что наибольшие показатели твердости и плотности деталей получены при 100% заполнении.

На рис. 3 приведены результаты исследования образцов АСА на трехточечный изгиб в зависимости от степени заполнения.

Испытания на статический изгиб показали незначительный разброс результатов, так же, как и при определении твердости. Основная причина, скорее всего, – неоднородность структуры напечатанных изделий. Из рис. 3а видно, что с увеличением степени заполнения 3D-образцов АСА повышается их изгибающее напряжение от 47 МПа при 30% степени заполнения до 65 МПа при 100% заполнении. Похожий характер изменения изгибающего напряжения при максимальной нагрузке от степени заполнения образцов отмечен в работе [23] на примере образцов из полилактида. В данной работе также наблюдается увеличение относительной деформации при изгибе от 4,36% до 5,07%, модуля упругости при изгибе с 1656 МПа до 2080 МПа при повышении степени заполнения образцов АСА от 30% до 100%. (рис. 3б). Стоит отметить, что у образцов, напечатанных на 3D-принтере при 100% заполнении, значения напряжения при максимальной нагрузке и модуля упругости при изгибе ниже, чем для образцов, изготовленных традиционным способом (ГОСТ 4648–2014, табл. А1). Показатель относительной деформации изгиба при максимальной нагрузке соответствует значению, приведенному в ГОСТ.

На рис. 4 приведены результаты определения прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве образцов АСА в зависимости от типа лопатки и степени заполнения.

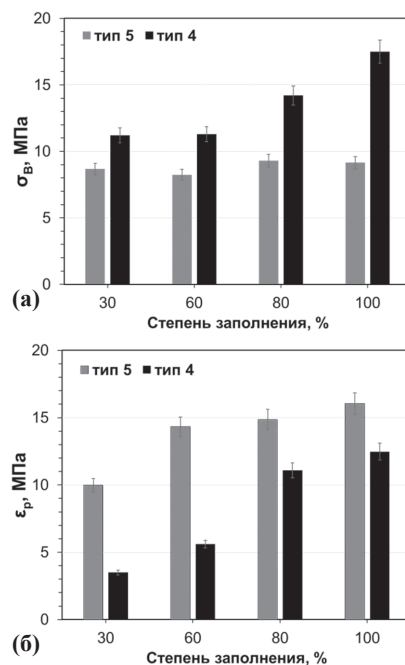


Рис. 4. Зависимость прочности при растяжении (а) и относительного удлинения при разрыве (б) от степени заполнения и типа лопаток АСА.

Из рис. 4а видно, что прочность при растяжении лопаток типа 5 всех образцов АСА находится на одном уровне. Возможно, в образцах АСА малого размера (тип 5) влияние степени заполнения на прочность является несущественным из-за того, что эффект заполнения ограничен возможностями 3D-принтера и размером поперечного сечения образца. В то же время степень заполнения образцов существенно влияет на их деформируемость. Так, наименьшим значением относительного удлинения при разрыве

характеризуется образец АСА-30, а остальные образцы показывают более высокую деформируемость, достигающую максимума при 100% заполнении (рис. 4б).

В случае лопаток типа 4 прочность при растяжении АСА-30 и АСА-60 находится на одном уровне, а при степени заполнения 80% и 100% возрастает примерно на 43% и 76% соответственно. Как видно из рис. 4б, относительное удлинение при разрыве образцов АСА тип 4 показывает такой же тренд, как и для изменения прочности с увеличением степени заполнения. Видно, что относительное удлинение при разрыве АСА-80 и АСА-100 выше примерно на 97% и 122% относительно АСА-60 и АСА-30.

Сравнение результатов для двух типов лопаток АСА показывает, что при степени заполнения 30% и 60% прочность при растяжении находится примерно на одном уровне у лопаток типа 4 и типа 5. Это можно объяснить тем, что в относительно крупных образцах (тип 4) при малой степени заполнения будут иметься большие пустоты, в которых может начаться распространение трещин, вызывающее разрушение [24].

В образцах АСА-80 и АСА-100 лопатки типа 4 характеризуются повышением прочности при растяжении примерно на 52% при степени заполнения 80% и примерно на 91% при степени заполнения 100% по сравнению с лопатками тип 5. В то же время пластичность образцов АСА лопаток типа 4 ниже по сравнению с лопатками типа 5. Полученные данные свидетельствуют о том, что деформационно-прочностные свойства образцов не имеют линейной зависимости от изменения степени их заполнения, а геометрия образцов оказывает значительное влияние.

На кривых «нагрузка–удлинение» (рис. 5) удлинение приведено в абсолютных единицах. Для лопаток типа 4 из АСА отражается разрушение с небольшим относительным удлинением образцов (рис. 5 а). В то же время у образцов типа 5 (с малым сечением) наблюдаются большие значения относительного удлинения при разрыве (рис. 5 б). Похожие результаты по оценке деформируемости в зависимости от поперечного сечения лопаток были показаны в работе [25], где образцы малого размера, напечатанные на 3D-принтере из полилактида, характеризовались более значительной пластической деформацией по сравнению с лопатками большого размера.

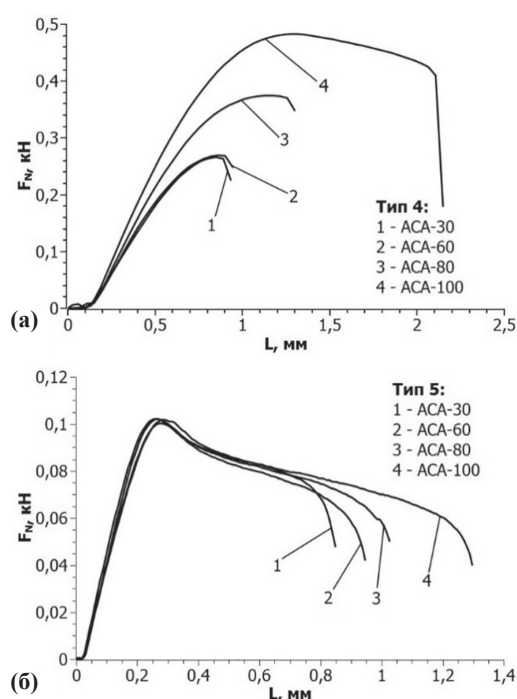


Рис. 5. Кривые «нагрузка–удлинение» 3D-образцов АСА: а) образцы тип 4; б) образцы тип 5.

Из рис. 5 видно, что кривые «нагрузка–удлинение», полученные в данной работе, являются типичными для полимера АСА [12]. Стоит отметить, что в целом результаты были воспроизводимыми. Общие тенденции развития кривых «нагрузка–удлинение» в зависимости от степени заполнения для лопаток обоих типов были схожими, причем образцы с более высокой степенью заполнения

демонстрируют более высокие значения напряжения при растяжении, что указывает на большую устойчивость к деформации. Это ожидаемо, поскольку нагрузка переносится вдоль напечатанных линий, где материал с большей степенью заполнения (более плотный) обеспечивает повышенную прочность 3D-печатного образца.

Для лопаток типа 4 (большие лопатки) наблюдается практически совпадение кривых «нагрузка–удлинение» для образцов АСА-30 и АСА-60, а с увеличением степени заполнения (между АСА-60 и АСА-80, АСА-80 и АСА-100) различия становятся существенными. В то же время для лопаток меньшего размера (тип 5) ход кривых вплоть до удлинения порядка 0,7 мм совпадает.

Выводы

- Твердость по Шору Д образцов остается постоянной при заполнении от 30% до 80%, увеличиваясь примерно на 8% при заполнении на 100% из-за «монолитности» получаемой структуры.
- Плотность деталей возрастает с увеличением степени заполнения, достигая максимума при 100%, но остается ниже значений для образцов, изготовленных традиционными методами.
- Прочность и модуль упругости при трехточечном изгибе образцов АСА повышаются с увеличением степени заполнения, достигая максимума при 100% заполнении.
- Прочность при растяжении образцов с большим сечением значительно повышается при заполнении на 80% и 100% (примерно на 43% и 76%), тогда как для лопаток с малым сечением этот параметр практически не зависит от степени заполнения. Удлинение максимально при заполнении на 100%.
- Геометрия образцов сказывается на уровне механических показателей: лопатки типа 4 с заполнением 80% и 100% прочнее, чем тип 5 на 52% и 91%, но их деформируемость меньше из-за пор при низкой степени заполнения.

Литература

1. Park S. et al. 3D printing of polymer composites: Materials, processes, and applications // *Matter*. 2022. Vol. 5. N1. PP. 43–76. DOI: 10.1016/j.matt.2021.10.018.
2. Mohanavel V. et al. The roles and applications of additive manufacturing in the aerospace and automobile sector // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 47. PP. 405–409. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.596.
3. Ahmed G.H. A review of “3D concrete printing”: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 66. PP. 105863. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.105863.
4. Kechagias J., Chaidas D. Fused filament fabrication parameter adjustments for sustainable 3D printing // *Materials and Manufacturing Processes*. 2023. Vol. 38, N8. PP. 933–940. DOI: 10.1080/10426914.2023.2176872.
5. Çevik Ü., Kam M. A review study on mechanical properties of obtained products by FDM method and metal/polymer composite filament production // *Journal of nanomaterials*. 2020. N1. P. 6187149. DOI:10.1155/2020/6187149.
6. Chacón J.M. et al. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection // *Materials & Design*. 2017. Vol. 124. PP. 143–157. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.03.065.
7. Garzon-Hernandez S. et al. Design of FDM 3D printed polymers: An experimental-modelling methodology for the prediction of mechanical properties // *Materials & Design*. 2020. Vol. 188. P. 108414. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108414.
8. Kristiawan R.B. et al. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters // *Open Engineering*. 2021. Vol. 11, N1. PP. 639–649. DOI: 10.1515/eng-2021-0063.
9. Shanmugam V. et al. Fused deposition modeling based polymeric materials and their performance: A review // *Polymer Composites*. 2021. Vol. 42, N11. PP. 5656–5677. DOI: 10.1002/pc.26275.
10. Solomon I.J., Sevel P., Gunasekaran J. A review on the various processing parameters in FDM // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 37. PP. 509–514. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.484.

11. Doshi M. et al. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 50. PP. 2269–2275. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.10.003.
12. El Magri A., Ouassil S. E., Vaudreuil S. Effects of printing parameters on the tensile behavior of 3D-printed acrylonitrile styrene acrylate (ASA) material in Z direction // *Polymer Engineering & Science*. 2022. Vol. 62, N3. PP. 848–860. DOI: 10.1002/pen.25891.
13. Hameed A.Z. et al. 3D printing parameter optimization using Taguchi approach to examine acrylonitrile styrene acrylate (ASA) mechanical properties // *Polymers*. 2022. Vol. 14, N16. P. 3256. DOI: 10.3390/polym14163256.
14. Breulmann M. Synthesis, Properties and Applications of Acrylonitrile–Styrene–Acrylate Polymers // *Modern Styrenic Polymers: Polystyrenes and Styrenic Copolymers*. 2003. P. 341. DOI: 10.1002/0470867213.ch16.
15. Meyer T.K. et al. Potential of distributed recycling from hybrid manufacturing of 3-D printing and injection molding of stamp sand and acrylonitrile styrene acrylate waste composite // *Sustainable Materials and Technologies*. 2020. Vol. 25. P. e00169. DOI: 10.1016/j.susmat.2020.e00169.
16. Guessasma S., Belhabib S., Nouri H. Microstructure, thermal and mechanical behavior of 3D printed acrylonitrile styrene acrylate // *Macromolecular Materials and Engineering*. 2019. Vol. 304, N7. P. 1800793. DOI: 10.1002/mame.201800793.
17. Kumar S.R. et al. Polymer additive manufacturing of ASA structure: Influence of printing parameters on mechanical properties // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 39. PP. 1316–1319. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.500
18. Ishak I.B., Fleming D., Larochelle P. Multiplane fused deposition modeling: a study of tensile strength // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2019. DOI: 10.1080/15397734.2019.1596127.
19. Amza C.G. et al. Enhancing mechanical properties of polymer 3D printed parts // *Polymers*. 2021. Vol. 13, N4. P. 562. DOI: 10.3390/polym13040562.
20. Jubinville D. et al. A comparative study of the physico-mechanical properties of material extrusion 3D-printed and injection molded wood-polymeric biocomposites // *Journal of Polymers and the Environment*. 2023. Vol. 31, N8. PP. 3338–3350. DOI: 10.1007/s10924-023-02816-y.
21. Foltuț D. et al. The influence of temperature on the mechanical properties of 3D printed and injection molded ABS // *Materials Today: Proceedings*. 2023. Vol. 78. PP. 210–213. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.10.039.
22. Akıncıoğlu G., Aslan E. Investigation of tribological properties of amorphous thermoplastic samples with different filling densities produced by an additive manufacturing method // *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2021. Vol. 8, N3. PP. 540–546. DOI: 10.30855/gmbd.0705041.
23. Álvarez-Blanco M. et al. Influence of material extrusion parameters on fracture mechanisms of polylactic acid under three-point bending // *Engineering Fracture Mechanics*. 2023. Vol. 283. P. 109223. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2023.109223.
24. Wu W. et al. 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, N9. PP. 5834–5846. DOI: 10.3390/ma8095271.
25. Elmrabet N., Siegkas P. Dimensional considerations on the mechanical properties of 3D printed polymer parts // *Polymer Testing*. 2020. Vol. 90. P. 106656. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106656.