



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 691.175.5/.8

Научная специальность ВАК – 1.3.8. Физика конденсированного состояния;

1.4.15. Химия твердого тела

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13588>

**Микроструктурные и гидрофильные свойства образцов из сополимера акрилонитрил-бутадиен-стирол ABS с различными модельными рисунками 3D-печати**

А. С. Леньшин<sup>1</sup>, В. Е. Фролова<sup>1</sup>, В. А. Макагонов<sup>2</sup>, А. К. Пелагина<sup>1</sup>, Э. П. Домашевская<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»,  
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,  
Московский пр., 14, Воронеж 394026, Российская Федерация

**Аннотация**

Целью работы является исследование влияния различной геометрии модельного рисунка 3D-печати, при одинаковых параметрах тепловых и механических воздействий самого процесса 3D-печати, на микроструктурные и гидрофильные свойства образцов из аморфного сополимера ABS, напечатанных с пятью различными модельными рисунками 3D-печати путем последовательного наложения слоев способом FDM (Fused Deposition Modeling).

**Выводы:** Результаты исследования напечатанных образцов методами СЭМ, РФА, ИК-спектроскопии и измерениями краевого угла смачивания поверхности показали, что совокупность тепловых и механических воздействий в процессе 3D-печати в исследуемом режиме экструзии не вызывает заметной ориентации полимерных цепей исходного аморфного сополимера ABS, не разрушают его внутримолекулярные химические связи, и поверхность всех напечатанных образцов с пятью различными модельными рисунками является гидрофильной.

При этом напечатанный образец с наиболее сложной геометрией модельного рисунка 1\_Hilbert, наиболее искаженной морфологией и дефектами поверхности, показывает наибольшее значение угла смачивания ( $\varphi = 67^\circ$ ), превосходящее на 10 % соответствующие значения в образцах с другими модельными рисунками ( $\varphi \approx 60^\circ$ ), и имеет гидрофильную поверхность.

**Ключевые слова:** сополимер акрилонитрил-бутадиен-стирол ABS, различные модельные рисунки 3D-печати, напечатанные образцы, морфология поверхности, аморфное состояние, ИК-спектры, краевые углы смачивания, гидрофильная поверхность

**Источник финансирования:** Работа выполнена при частичной поддержке Минобрнауки РФ в рамках госзадания для университетов в области научной деятельности, проект №. ФЗГУ-2026-0009 и Передовой Инженерной Школы ВГУ.

**Для цитирования:** Леньшин А. С., Фролова В. Е., Макагонов В. А., Пелагина А. К., Домашевская Э. П. Микроструктурные и гидрофильные свойства образцов из сополимера акрилонитрил-бутадиен-стирол ABS с различными модельными рисунками 3D-печати. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2026;28(1): 69–80. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13588>

**For citation:** Lenshin A. S., Frolova V. E., Makagonov V. A., Pelagina A. K., Domashevskaya E. P. Microstructural and hydrophilic properties of acrylonitrile-butadiene-styrene ABS copolymer samples with different 3D-printing patterns. *Condensed Matter and Interphases*. 2026;28(1): 69–80. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13588>

✉ Домашевская Э. П., e-mail: [ftt@phys.vsu.ru](mailto:ftt@phys.vsu.ru)

© Леньшин А. С., Фролова В. Е., Макагонов В. А., Пелагина А. К., Домашевская Э. П., 2026



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## 1. Введение

Термопластичные полимеры играют важную роль в различных инженерно-технических областях деятельности благодаря своим превосходным функциональным и технологическим свойствам. Наряду с другими термопластиками сополимер акрилонитрил-бутадиен-стирол ABS (acrylonitrile-butadiene-styrene) широко используется в качестве конструкционного материала. ABS состоит из различных количеств полиакрилонитрила (15–30 %), полибутадиена (5–35 %) и полистирола (40–60 %) и находит широкое применение в аэрокосмической и оборонной отраслях, автомобилестроении, используются в электротехнических, телекоммуникационных, компьютерных технологиях [1]. К преимуществам ABS-сополимера также можно отнести возможность изготовления различных изделий с матовыми и зеркальными поверхностями.

ABS обладает хорошей ударопрочностью, ударной вязкостью и жесткостью, теплостойкостью, эластичностью и безопасностью для окружающей среды. Он толерантен к влаге, воздействию неорганических кислот и солей, растворителей, смазочных масел и щелочей.

Существенным достоинством термопластика ABS является возможность его переработки.

Химическая формула сополимера акрилонитрил-бутадиен-стирола ABS состоит из трех частей  $(C_8H_8)_x \cdot (C_4H_6)_y \cdot (C_3H_3N)_z$  [2]. Структурная формула сополимера ABS [3, 4] приведена на рис. 1.

Температура плавления полимера ABS находится в диапазоне от 220 до 260 °С, но начинает он размягчаться при температуре около 105 °С. Различные марки ABS могут немного отличаться по температуре плавления, но в целом этот диапазон является типичным. Следует также принимать во внимание, что в интервале температур около 60–65 °С происходит стеклование сополимера ABS.

Изделия из ABS рекомендуется использовать в интервале температур от –20 до 80 °С, поскольку

ку его механические свойства меняются в зависимости от температуры [3]. При этом материал легко выдерживает кратковременное воздействие температуры до +100 °С, а также длительный нагрев в пределах +75–80 °С.

Показатели жесткости, механической прочности и долговечности ABS значительно превышают характеристики ударопрочного полистирола и других полимеров. Для повышения ударопрочности, вязкости и термостойкости можно изменять соотношение сополимеров полибутадиена, полистирола и полиакрилонитрила в составе ABS, и таким образом, изменяя пропорции компонентов, изготавливать ABS различных марок [3].

Свойства изделий из ABS в некоторой степени зависят и от условий, при которых материал перерабатывается в конечный продукт. Например, формование при высокой температуре улучшает блеск и термостойкость изделий, в то время как самая высокая ударопрочность достигается при формовании при низкой температуре. Волокна (обычно стекловолокно) и добавки могут быть смешаны с гранулами смолы, чтобы придать конечному продукту прочность и повысить максимальную рабочую температуру. Также можно в ABS добавлять пигменты, так как его исходный цвет варьируется от полупрозрачного цвета слоновой кости до белого. От воздействия ультрафиолетового излучения также используют соответствующие добавки [2].

ABS-полимеры устойчивы к воздействию водных кислот, щелочей, концентрированных соляной и фосфорной кислот, а также животных, растительных и минеральных масел. Они растворимы в сложных эфирах, ацетоне, хлороформе и дихлорметане этилена, обладают низкой стойкостью к хлорированным растворителям, спиртам и альдегидам [2].

Несмотря на то, что термопластик ABS используется в основном в механических устройствах, он также обладает электрическими свойствами, которые достаточно стабильны в широком диапазоне частот. Температура и влажность воздуха практически не влияют на эти свойства в допустимом рабочем диапазоне температур [4].

Однако при воздействии высоких температур, например, при горении древесины, ABS-пластик легко воспламеняется. Он плавится, а затем кипит, после чего пары превращаются в интенсивное горячее пламя, выделяющее токсичные продукты разложения. Токсичность термопластика ABS охарактеризована в работе [5].

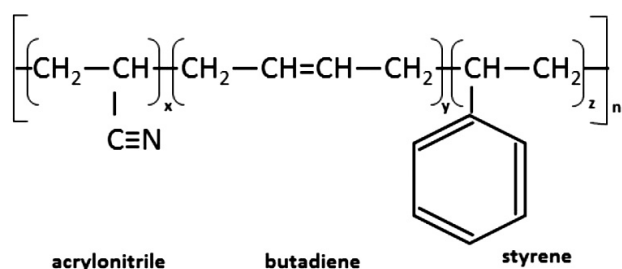


Рис. 1. Структурная формула сополимера акрилонитрил-бутадиен-стирол ABS [3, 4]

Очень важным для современного материаловедения является то обстоятельство, что наряду с другими термопластиками, акрилонитрил-бутадиен-стирол является распространенным материалом, используемым в 3D-принтерах [6] в качестве нити Filament ABS, поскольку он дешёв, прочен, обладает высокой стабильностью и может подвергаться последующей обработке различными способами при шлифовке, покраске, склеивании, заливке и химическом разглаживании. Известно [6], что при использовании в 3D-печати ABS деформируется из-за усадки, возникающей при охлаждении в процессе печати. Однако усадку можно уменьшить, печатая образцы на нагретой поверхности для печати, используя клей, чтобы обеспечить хорошее сцепление первого слоя отпечатка с поверхностью для печати, или печатая с краями/плотиком у основания отпечатка, чтобы повысить адгезию к поверхности для печати [6].

Целью настоящей работы является исследование влияния различной геометрии модельного рисунка 3D-печати при одинаковых параметрах тепловых и механических воздействий самого процесса 3D-печати на микроструктурные и гидрофильные свойства образцов из сополимера ABS, напечатанных с пятью различными модельными рисунками 3D-печати путем последовательного наложения слоев способом FDM (Fused Deposition Modeling).

Структурные и оптические методы исследования позволяют быстро исследовать и сравнивать полимерные соединения из акрилонитрил-бутадиен-стирола [7]. Кроме того, калибровочные кривые в инфракрасном диапазоне чрезвычайно полезны при анализе состава ABS-пластика. Анализы, основанные на этом методе, предоставляют информацию, на основе которой можно прогнозировать физические свойства сформированного пластика [7–12]. Поэтому для достижения поставленной нами цели по исследованию влияния процесса 3D-печати на микроструктурные и гидрофильные свойства напечатанных из ABS образцов мы использовали методы сканирующей электронной микроскопии СЭМ, рентгенофазового анализа РФА, ИК-спектроскопии и метод измерений краевого угла для определения смачиваемости поверхности.

Предпосылками для исследования в данной работе влияния разной геометрии модельных рисунков на свойства образцов ABS являются отличия химической формулы ABS и особенно его структурной формулы (с большим периодом по-

вторяемости) от соответствующих параметров двух других термопластиков PETG и PLA и обнаруженная нами тенденция увеличения краевого угла смачивания (уменьшение гидрофильности) в напечатанных образцах с самой сложной геометрией модельного рисунка 1\_Hilbert: в образце из PETG до 4 % [13] и в образце из PLA до 10 % [14].

Ранее мы проводили подобные исследования влияния процесса 3D-печати на микроструктурные и гидрофильные свойства образцов с теми же модельными рисунками, напечатанных из двух других термопластичных полимеров: полиэтилентерефталат-гликоля PETG (polyethylene terephthalate-glycol) и полилактида PLA (Polylactic Acid), и поэтому при обсуждении полученных в данной работе результатов будем сравнивать их с подобными результатами для двух других полимеров, опубликованными в наших работах [13] и [14].

Несмотря на наличие в современных научных журналах работ, посвященных моделированию свойств, компьютерному дизайну и усовершенствованию моделей и компьютерных программ полимеров, исследований о возможном влиянии модельных рисунков на свойства полимеров мы не нашли. Лишь в одной теоретической работе по моделированию влияния структуры аморфно-кристаллического полимера на деформационные свойства показано [15], что деформационные характеристики полимера существенно зависят от взаимного расположения кристаллической и аморфной фаз полимера в соответствии с пятью рассмотренными структурными моделями: 1 – идеальное смешение фаз; 2 – квадратная решетка кристаллической фазы; 3 – квадратная решетка аморфной фазы; 4 – шахматное расположение фаз; 5 – случайное расположение фаз.

Однако в рамках проведенного теоретического моделирования в работе [15] деформационные и структурные перестройки аморфной фазы не учитывались.

В то время как в следующих разделах статьи мы покажем, что исследуемый нами полимер и в исходном состоянии filament ABS, и в напечатанных образцах содержит только одну аморфную фазу. Именно это обстоятельство определяет новизну и актуальность нашего экспериментального исследования возможного влияния различной геометрии модельного рисунка 3D-печати на микроструктурные и гидрофильные свойства образцов из аморфного сополимера ABS, напечатанных с пятью различными модельными рисунками

## 2. Экспериментальная часть. Объекты и методы исследования

Образцы для исследования были изготовлены из бесцветной нити Filament ABS марки «МАКО 1.75 Натуральный» диаметром 1.75 мм на 3D-принтере Hercules Original методом послойного наложения слоев полимера FDM (Fused Deposition Modeling) при температуре экструдера 240 °С и мощности 500 Вт. В табл. 1 представлены значения параметров 3D-принтера, при которых были напечатаны образцы с пятью различными модельными рисунками.

С указанными в табл. 1 параметрами были напечатаны 5 образцов цилиндрической формы, которые отличались модельными рисунками 3D-печати. На рис. 2 представлены пять типов исследуемых модельных рисунков. Типы модельных рисунков, представленные на рис. 2, были взяты из программы для моделирования Prusa Slicer. После построения пяти моделей с различными рисунками 3D-печати, по этим моделям были напечатаны пять образцов с пятью различными модельными рисунками 3D-печати (1\_Hilbert, 2\_Concentric, 3\_Archimedian, 4\_Rectilinear, 5\_Octagram). Напечатанные бесцветные образцы имеют одинаковую цилиндрическую форму с диаметром 20 мм и толщиной 5 мм.

Наряду с напечатанными образцами исследу-

довался исходный нитевидный образец акрилонитрил-бутадиен-стирола (Filament ABS), поэтому в следующем разделе будут представлены результаты исследования микроструктурных свойств для шести образцов.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) поверхности пяти напечатанных образцов с разными модельными рисунками проводилась на растровом электронном микроскопе JSM 6510LV в ЦКПНО ВГУ. Для получения лучшего контраста на микрофотографиях СЭМ исследования морфологии поверхности напечатанных образцов проводились на поверхностях образцов, покрытых тончайшим слоем золота толщиной несколько нанометров при разном увеличении  $\times 40$ ,  $\times 1000$ ,  $\times 5000$ .

Рентгенофазовый анализ (РФА) напечатанных образцов и исходной нити ABS проводился в Воронежском государственном техническом университете на дифрактометре BRUCKER D2 Phaser (с медным анодом), при высоком напряжении  $U = 30$  кВ и анодном токе рентгеновской трубки  $I = 10$  мА в интервале брэгговских углов  $2\theta = 5-80^\circ$ .

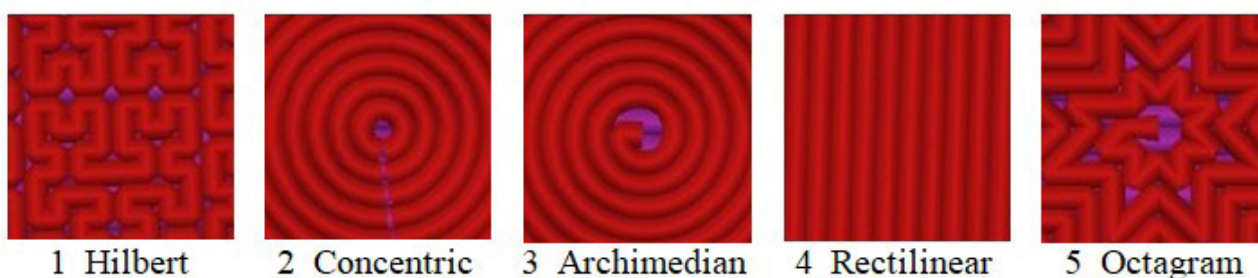
ИК-спектроскопия является универсальным методом получения информации о молекулярной структуре веществ и позволяет установить характер атомных группировок, природу химических связей и их изменений под действием внешних условий [16, 17].

Исследования молекулярной структуры ABS исходной нити (Filament ABS) и пяти 3D напечатанных образцов с различными модельными рисунками проводили путем измерения ИК-спектров пропускания на ИК-Фурье спектрометре Brucker Vertex 70 в ЦКПНО ВГУ в интервале  $400-4000$  см<sup>-1</sup>.

Определение смачиваемости поверхности пяти плоских напечатанных образцов с различными модельными рисунками 3D-печати проводили на оригинальной установке для измере-

**Таблица 1.** Параметры 3D-печати на принтере Hercules Original

Параметр 3D-печати	Значение
Толщина слоя/диаметр сопла экструдера	0.8 мм
Плотность заполнения	20 %
Скорость заполнения	50 мм/с
Шаблоны заполнения	5 типов
Толщина образцов	5.0 мм
Температура сопла экструдера	240 °С



**Рис. 2.** Пять типов модельных рисунков 3-D печати на исследуемых образцах из полимера ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирола): 1\_Hilbert, 2\_Concentric, 3\_Archimedian, 4\_Rectilinear, 5\_Octagram

ния краевых углов смачивания (рис. 3), которую мы изготовили на 3D-принтере Hercules Original. Установка представляет собой подставку с держателем образца, на которую помещается плоский образец. На подставку помещен каплемер, с помощью которого создаются капли на поверхности образца для измерения краевого угла смачивания. Напротив подставки с исследуемым образцом устанавливается веб-камера, которая выводит изображение капли на экран. Краевой угол смачивания образца  $\varphi^\circ$  измеряется с помощью программы графического редактора Pic-pic.

Капля жидкости на поверхности твердого тела, в зависимости от природы образца, жидкости и среды, в которой она находится, может растекаться полностью или частично и приобрести такой вид, как на рис. 4. Угол  $\varphi$  между касательной к поверхности капли и поверхностью твердого тела, отсчитываемый в сторону поверхности капли, называется краевым углом смачивания  $\varphi^\circ$  [18,19].

Смачивают твердую поверхность только те жидкости, которые понижают поверхностное натяжение данного твердого тела на границе с воздухом ( $\varphi < 90^\circ$ ). Поверхности твердых тел, смачиваемые водой, называются гидрофильными. Для гидрофобных поверхностей краевой угол  $\varphi > 90^\circ$ .

С использованием перечисленных методов мы отвечаем на вопросы о влиянии технологического процесса и геометрии модельного рисунка на морфологию поверхности напечатанных образцов, их микроструктуру и смачиваемость поверхности. Ответы на поставленные вопросы содержатся в следующих разделах статьи.



**Рис. 3.** Оригинальная установка для измерения краевых углов смачивания, напечатанная на 3D-принтере Hercules Original

### 3. Результаты и их обсуждение

#### 3.1. Морфология образцов по данным сканирующей электронной микроскопии СЭМ

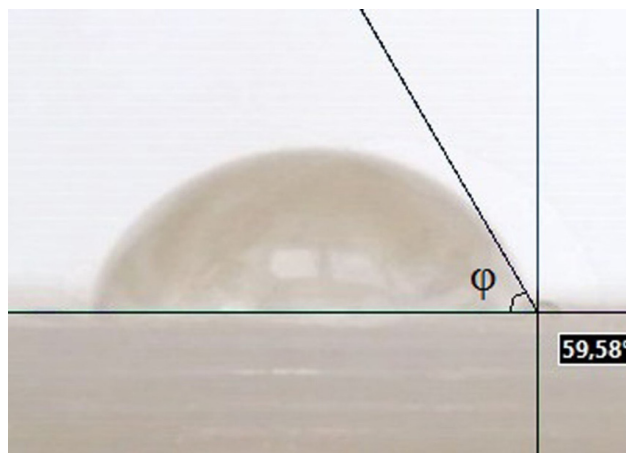
На рис. 5 представлены микрофотографии СЭМ, полученные с разными увеличениями  $\times 40$ ,  $\times 1000$  и  $\times 5000$  для пяти образцов, напечатанных из нити ABS с различными модельными рисунками.

Результаты СЭМ пяти напечатанных образцов в сравнении с модельными типами на рис. 2 показывают, что заполнение объемов образцов полимером в процессе 3D-печати происходит не сплошными гладкими слоями, а слоями с морфологией, структурированной в большем или меньшем соответствии с его модельным рисунком и низкой плотностью заполнения объемов образцов около 20 %.

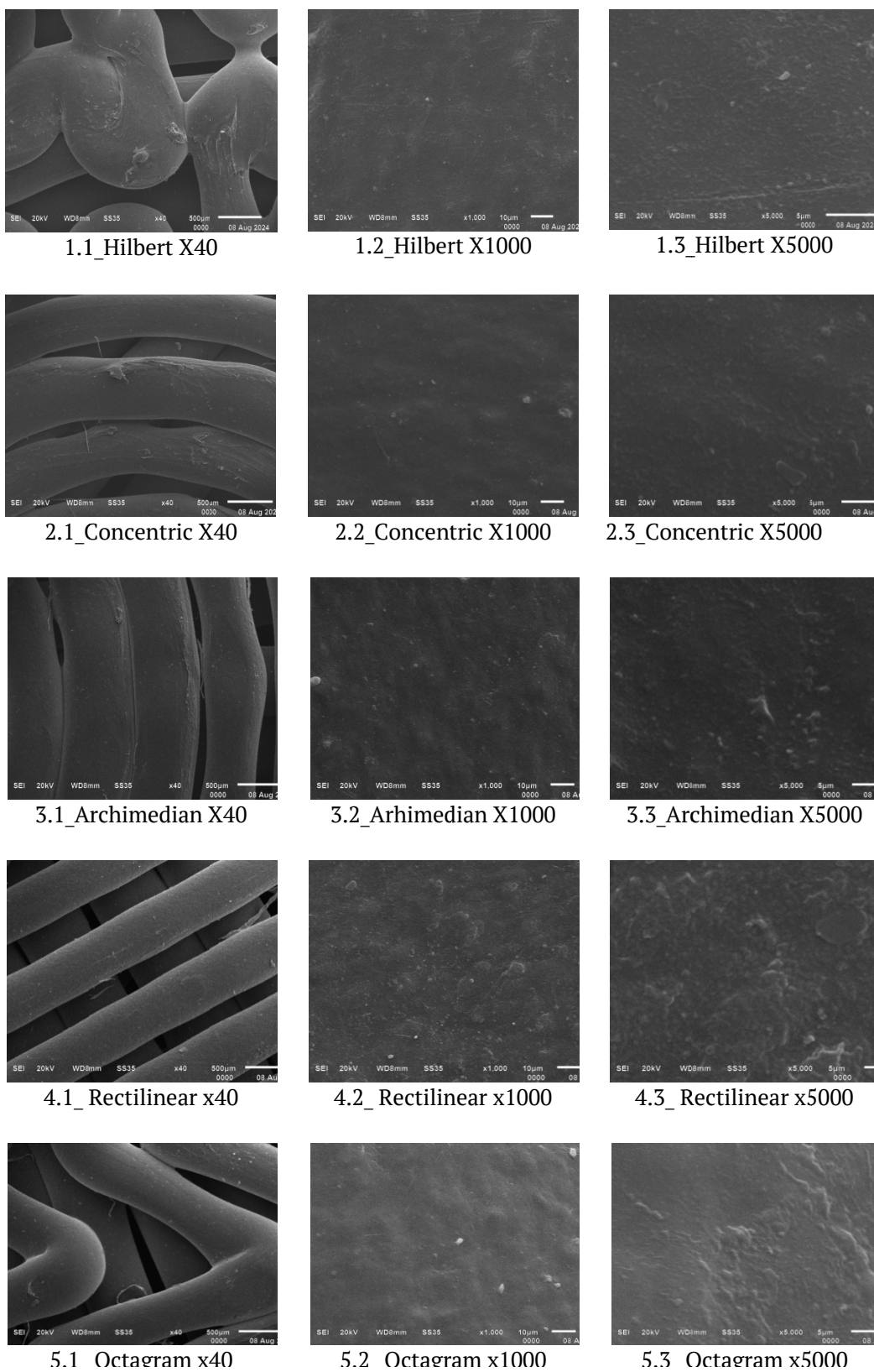
Образец 1\_Hilbert с наиболее сложной геометрией модельного рисунка показывает самое большое искажение этой геометрии в процессе 3D-печати. Так, на рис. 2 модельный рисунок 1\_Hilbert показывает наличие в его сложной геометрии только прямых углов, тогда как в напечатанном по этой модели образце на микрофотографии СЭМ (рис. 5. 1.1\_Hilbert X40) искаженные прямоугольные формы отсутствуют.

Наиболее адекватно и контрастно отражают геометрию модельных рисунков 3D-печати микрофотографии образцов с рисунками 4\_Rectilinear и 5\_Octagram.

Сравнение рис. 5 и 2 показывает, что микрофотографии поверхности двух образцов с модельными рисунками близкой геометрии в виде окружностей 2\_Concentric и 3\_Archimedean



**Рис. 4.** Краевой угол смачивания  $\varphi$  на гидрофильной поверхности одного из напечатанных образцов с модельным рисунком 3\_Archimedean



**Рис. 5.** СЭМ микрофотографии с увеличением  $\times 40$ ,  $\times 1000$  и  $\times 5000$  для образцов, напечатанных из ABS с различными модельными рисунками: 1\_Hilbert, 2\_Concentric, 3\_Archimedian, 4\_Rectilinear, 5\_Octagram

(рис. 2) адекватно отражают криволинейную геометрию дуги окружностей в двух напечатанных образцах с этими рисунками в более или менее равной степени (рис. 5).

### 3.2. Результаты рентгенофазового анализа РФА

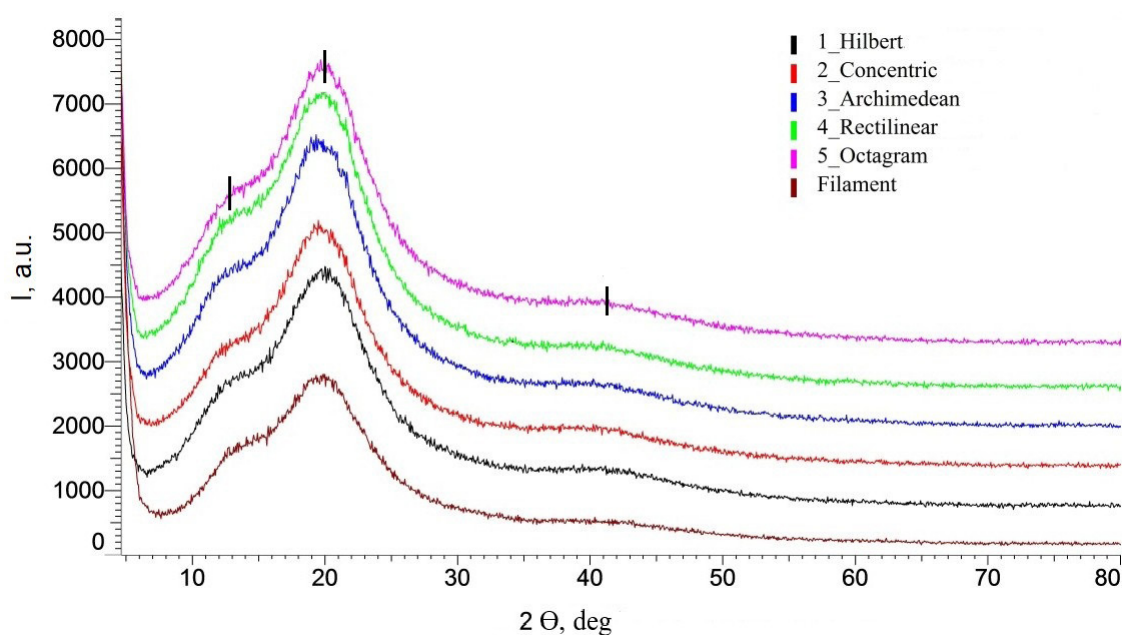
Дифрактограммы пяти напечатанных образцов с различными рисунками 3D-печати и исходной нити из полимера ABS приведены на рис. 6. Результаты рентгеновской дифракции РФА, полученные в интервале брэгговских углов  $2\theta = 5-80^\circ$ , показали, что все пять образцов с различными рисунками 3D-печати из аморфной полимерной нити ABS являются аморфными, так же как и сама исходная нить Filament ABS. Все дифрактограммы содержат две широкие полосы дифракционных отражений: главную полосу с максимумом около  $2\theta \approx 20^\circ$  и плечом при  $2\theta \approx 12^\circ$  и вторую слабоинтенсивную полосу с максимумом  $2\theta \approx 43^\circ$ . При этом следует отметить, что полученные нами формы дифракционных полос хорошо согласуются с рентгеноструктурными данными РФА, приведенным для ABS в известных нам литературных источниках [10–12].

Кроме того, сравнение полученных нами данных РФА для ABS с нашими же результатами для двух других полимеров PETG [13] и PLA [14] указывает на некоторые отличия формы и положения дифракционных полос РФА исходных

аморфных нитевидных образцов и различную степень влияния процесса 3D-печати на микроструктурные свойства образцов, напечатанных из трех разных полимеров.

Так, в нашей предыдущей работе мы установили, что отличия дифрактограмм напечатанных образцов из PETG от дифрактограммы исходной нити filament PETG обусловлены большей упорядоченностью полимерных цепей в напечатанных образцах с различными рисунками, которая происходит при тепловом и механическом воздействиях на исходный нитевидный образец в процессе 3D-печати и проявляются в увеличении на порядок относительной интенсивности главного дифракционного максимума аморфного полимера PETG во всех напечатанных образцах по сравнению с исходной аморфной нитью [13].

Ещё большие отличия дифрактограмм напечатанных образцов от дифрактограммы исходной аморфной нити мы обнаружили в процессе 3D-печати из полимера PLA в виде частичной кристаллизации первоначально разориентированных полимерных цепей аморфного PLA с образованием орторомбической фазы  $\alpha$ -Poly(L-lactide), которая происходит в экструдере при тепловом и механическом воздействиях на исходный аморфный нитевидный образец [14]. При этом наиболее заметная кристаллизация с возникновением орторомбической  $\alpha$ -фазы PLA происходит в напечатанных образцах с



**Рис. 6.** Дифрактограммы, полученные в интервале брэгговских углов  $2\theta = 5-80^\circ$ , для исходной нити Filament и пяти образцов, напечатанных из нити ABS Filament с различными модельными рисунками: 1\_Hilbert, 2\_Concentric, 3\_Archimedean, 4\_Rectilinear, 5\_Octagram

теми рисунками 3\_Archimedean и 5\_Octagram, которые экструдер выполняет безотрывно в пределах каждого слоя при непрерывном послойном наборе полной толщины образцов 5 мм.

Таким образом, сравнительный анализ формы и относительной интенсивности рентгенограмм образцов из трех разных термопластичных полимеров указывает на наибольшую устойчивость аморфной микроструктуры сополимера ABS по отношению к тепловым и механическим воздействиям в процессе печати на 3D-принтере Hercules Original и сохранение исходного аморфного состояния во всех напечатанных образцах с пятью модельными рисунками.

### 3.3. ИК-спектры исходного нитевидного образца ABS и напечатанных образцов из сополимера ABS

ИК-спектроскопия – неразрушающий оптический метод, используемый для решения конкретных задач, включая определение фундаментальных характеристик молекулы, количественный анализ известных фаз в веществе,

идентификацию химических соединений и выяснение их структуры [18–20]. Этот оптический метод основан на измерении интенсивности инфракрасного (ИК) излучения, поглощаемого или отражаемого определенным материалом, которое связано с колебательными и вращательными колебаниями фрагментов молекул и проявляется в распределении интенсивности в полосах поглощения в зависимости от длины волны ( $\lambda$ ) или ее обратной величины, которая известна как волновое число ( $\nu$ ). На рис. 7 представлены ИК-спектры пропускания для исходного нитевидного образца (Filament ABS) и пяти изготовленных 3D-печатью образцов с различными модельными рисунками.

В табл. 2 представлена идентификация всех мод колебаний фрагментов молекул ABS исходной нити (Filament ABS) и пяти напечатанных образцов из ABS.

Результаты ИК-спектроскопии показывают, что волновые числа и относительные интенсивности полос поглощения всех пяти напечатанных образцов с различными рисунками имеют близ-

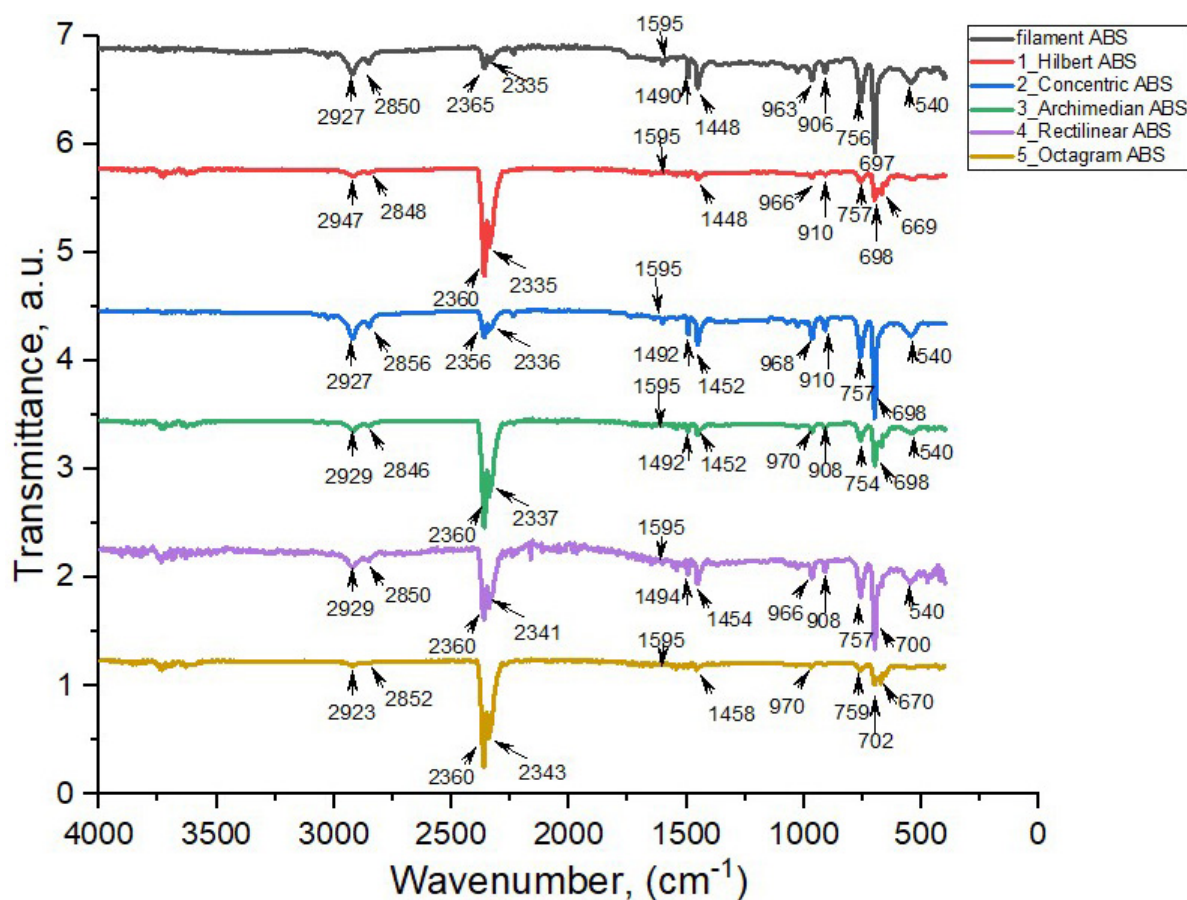


Рис. 7. ИК-спектры пропускания сополимера ABS от исходной нити (filament ABS) и пяти напечатанных образцов с различными модельными рисунками

**Таблица 2.** Моды колебаний ИК-спектров исходного нитевидного образца Filament ABS и напечатанных образцов с различными модельными рисунками

Идентификация мод колебаний	Моды колебаний образцов ABS, см <sup>-1</sup>						
	Исходная нить	1_Hilbert	2_Concentric	3_Archimedian	4_Rectilinear	5_Octagram	Моды ABS [ссылка]
нитрил	540	539	540	540	540	539	539 [10]
С-Н связь вне плоскости	697	700	698	698	700	702	696 [10]
=С-Н связь вне плоскости	756	757	757	754	757	759	757 [10]
Изгиб С-Н для атомов Н, присоединенных к алкеновым угле родам в бутадиене	906	910	910	908	908	–	911 [12]
	963	966	968	970	966	970	967 [12] 955 [10]
Асимметрия изгиба С-Н Ножничная мода групп СН <sub>2</sub>	1448	1448	1452	1452	1454	1458	1453 [12] 1450 [10]
Асимметрия изгиба С-Н Ароматическое кольцо в стироле	1490	–	1492	1492	1494	–	1494 [11] 1492 [10]
С=С (стирол)	1595	1595	1595	1595	1595	1595	1589[10]
N-Сакрилонитрил Изгиб связи N-С	2365	2360	2356	2360	2360	2360	2356 [10]
	2335	2335	2336	2337	2341	2343	2238 [12]
Ароматические и алифатические моды растяжения С-Н	2850	2848	2856	2846	2850	2852	2800– 3200 [12]
	2927	2947	2927	2929	2929	2923	2922 [10]

кие значения и совпадают в пределах точности измерения с соответствующими значениями основных полос поглощения исходной нити ABS, используемой при 3D-печати наших образцов и литературными данными для сополимера ABS [9–11]. Это означает, что его внутримолекулярные химические связи не подвержены механическим и тепловым воздействиям в процессе 3D-печати, так же как не подвержена этим воздействиям и его аморфная микроструктура, рассмотренная нами выше на основании рентгеноструктурных данных.

#### 3.4. Смачиваемость поверхности напечатанных из ABS образцов с различными модельными рисунками

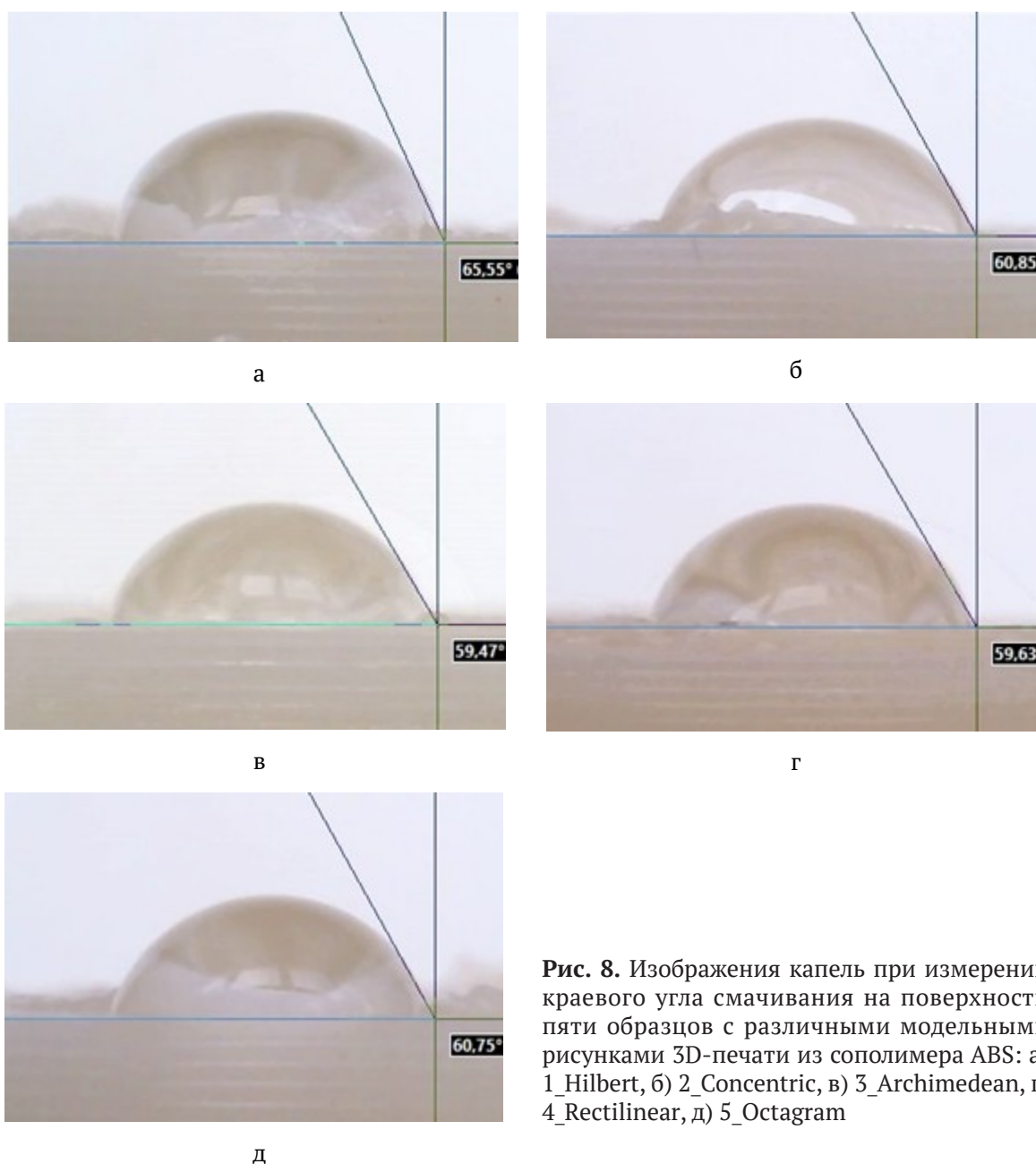
Смачиваемость поверхности образца является проявлением межмолекулярного взаимодействия на границе соприкосновения трех фаз: твердого тела, жидкости и газа, выражающегося в растекании жидкости на поверхности твердого тела [19–21]. Поскольку измерение краевого угла смачивания поверхности образцов проводится только на плоских образцах, то в данном разделе приведены результаты исследования смачиваемости для пяти напечатанных образцов.

На рис. 8 представлены фотографии капель, сделанные на оригинальной установке для измерения краевого угла смачивания на поверхности пяти напечатанных образцов из полимера ABS с различными модельными рисунками 3D-печати.

Измерения краевых углов смачивания капель воды на поверхности образцов проводились в шести точках для каждого образца, которые затем усреднялись с точностью до одного градуса. В табл. 3 приведены средние значения краевых углов смачивания для пяти напечатанных образцов.

Сравнительный анализ величин краевых углов смачивания поверхности образцов в табл. 3 и на рис. 8 показывает, что средние значения краевых углов смачивания всех напечатанных образцов изменяются в пределах  $\varphi = 59–67^\circ$ . Большое отклонение всех средних значений углов смачивания в сторону меньших величин по отношению к прямому углу  $90^\circ$  показывает, что поверхности всех пяти напечатанных образцов из сополимера ABS с различными рисунками являются гидрофильными.

При этом образец 1\_Hilbert с наиболее сложной геометрией модельного рисунка и наиболее искаженной морфологией показывает наиболь-



**Рис. 8.** Изображения капле при измерении краевого угла смачивания на поверхности пяти образцов с различными модельными рисунками 3D-печати из сополимера ABS: а) 1\_Hilbert, б) 2\_Concentric, в) 3\_Archimedean, г) 4\_Rectilinear, д) 5\_Octagram

**Таблица 3.** Средние значения величины краевых углов смачивания ( $\varphi^\circ$ ) на поверхности образцов, напечатанных из ABS с разными модельными рисунками 3D-печати

Номер образца и тип рисунка	Средние значения краевых углов смачивания $\varphi^\circ$
1_Hilbert	67
2_Concentric	60
3_Archimedean	63
4_Rectilinear	59
5_Octagram	59

шее среднее значение краевого угла смачивания  $\varphi = 67^\circ$ , т. е. является менее гидрофильным по сравнению с другими. Четыре образца с другими рисунками, микрофотографии поверхности которых на рис. 5 отражают геометрию их модельных рисунков в менее искаженной степени, имеют близкие значения краевых углов смачивания около  $\varphi \approx 60^\circ$ .

Таким образом, можно увидеть некоторое влияние наиболее сложной геометрии модельного рисунка 1\_Hilbert при 3D-печати образца, проявляемой в искаженной морфологии поверхности на рис. 5, также и на смачиваемость

его поверхности в сторону уменьшения гидрофильности (табл. 3).

В напечатанных образцах с теми же модельными рисунками из другого термопластичного полимера полилактида PLA мы ранее обнаружили [14], что образец с той же геометрией модельного рисунка 1\_Hilbert также показывает наибольшее значение краевого угла смачивания  $\varphi = 59^\circ$  по сравнению с другими образцами ( $\varphi = 50\text{--}55^\circ$ ). А поскольку смачиваемость поверхности твердого тела является проявлением межмолекулярных взаимодействий на границе соприкосновения жидкости с поверхностью твердого тела, то следует предположить, что одним из механизмов такого взаимодействия может быть участие полярных групп полимера ABS в образовании на поверхности всех пяти образцов водородных связей с молекулами воды, приводящему к значительному понижению краевых углов смачивания относительно  $90^\circ$  и гидрофильности всех напечатанных из ABS образцов. При этом образец 1\_Hilbert с наиболее сложной геометрией модельного рисунка, наиболее искаженной морфологией и дефектами поверхности, показывает наибольшее среднее значение краевого угла смачивания ( $\varphi = 67^\circ$ ), т. е. является менее гидрофильным ввиду наибольших трудностей в образовании на его поверхности водородных связей с молекулами воды.

#### 4. Заключение

Полученные результаты при исследовании влияния процесса 3D-печати на микроструктурные и гидрофильные свойства образцов сополимера ABS, полученных путем последовательного наложения слоев сополимера способом FDM на 3D-принтере Hercules Original с пятью различными модельными рисунками, показали:

– Все пять образцов, напечатанных с различными рисунками 3D-печати из аморфной полимерной нити Filament ABS, сохраняют исходное аморфное состояние нитевидного образца.

– Сравнительный анализ формы и относительной интенсивности дифрактограмм образцов из ABS с данными РФА двух других полимеров, PETG и PLA, указывает на наибольшую устойчивость аморфной микроструктуры исследуемого сополимера ABS по сравнению с двумя другими полимерами к тепловым и механическим воздействиям в процессе 3D-печати.

– Внутрискруктурные химические связи ABS также не подвержены механическим и тепловым воздействиям процесса 3D-печати, и поэтому волновые числа и относительные интенсивно-

сти полос ИК-спектров всех пяти напечатанных образцов с различными модельными рисунками имеют близкие значения, которые совпадают в пределах точности измерения с соответствующими значениями основных полос поглощения исходной нити ABS и литературными данными.

– Средние значения краевых углов смачивания поверхности напечатанных образцов из сополимера ABS с пятью различными модельными рисунками изменяются в пределах  $\varphi = 59\text{--}67^\circ$ , значительно меньших прямого угла, и поэтому поверхности всех напечатанных образцов являются гидрофильными.

– Напечатанный образец с наиболее сложной геометрией модельного рисунка 1\_Hilbert, наиболее искаженной морфологией и дефектами поверхности показывает наибольшее значение угла смачивания ( $\varphi = 67^\circ$ ), превосходящее на 10 % соответствующие значения в образцах с другими модельными рисунками ( $\varphi \approx 60^\circ$ ), и имеет менее гидрофильную поверхность в результате возможного уменьшения на его более дефектной поверхности водородных связей с молекулами воды.

Таким образом, полученные результаты показывают, что тепловые и механические воздействия 3D-печати в исследуемом режиме экструзии не вызывают заметной ориентации полимерных цепей исходного аморфного сополимера ABS, не разрушают его внутрискруктурные химические связи, и поверхность напечатанных образцов с пятью различными модельными рисунками является гидрофильной.

#### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов, интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

#### Список литературы

1. Kumar R. M., Rajini N. T., Kumar S. M., Mayandi K., Siengchin S., Ismail S. O. Thermal and structural characterization of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) copolymer blended with polytetrafluoroethylene (PTFE) particulate composite. *Materials Research Express*. 2019;6(8): 085330. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab250f>

2. Peters E. N. *Plastics: thermoplastics, thermosets, and elastomers*. Handbook of Materials Selection. Kutz M. (ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2002. p. 363–365. <https://doi.org/10.1002/9780470172551.ch11>

3. Kutnjak-Mravlinčić S., Sutlovic A., Glogar M. I., Ercegovic Ražić S., Godec D. Innovative development of batch dyed 3D printed acrylonitrile-butadiene-styrene objects. *Molecules*. 2021;26: 6637. <https://doi.org/10.3390/molecules26216637>
4. Kulich D. M., Gaggari S. K., Lowry V., Stepien R. Acrylonitrile-butadiene-styrene polymers. In: *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons; 2001. p. 174–201. <https://doi.org/10.1002/0471440264.pst011>
5. Мухамедьянов Э. Р., Орлова Н. Ю. Токсичность не инженерных пластиков при экструзии. *Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции. 22–23 декабря 2020 г.* М.: НИЯУ МИФИ; Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ; 2020: 56–59.
6. Harper C. A. *Handbook of plastic and elastomers*. New York: McGraw-Hill; 1997. p. 1–62. ISBN 0070266816
7. Rutkowski J. V., Levin B. C. Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymers (ABS): pyrolysis and combustion products and their toxicity- a review of the literature. *Fire and Materials*. 1986;10(3-4): 93–105. <https://doi.org/10.1002/fam.810100303>
8. Steeman P. A., Meier R. J. The structure of styrene-acrylonitrile/butadiene polymer studied by 2D-i.r. spectroscopy. *Polymers*. 1997;38(21): 5435–5462. [https://doi.org/10.1016/s0032-3861\(97\)00074-8](https://doi.org/10.1016/s0032-3861(97)00074-8)
9. Bandeira L. C., Campos B. M., Ciuffi K. J., ... Maia I. A. Calcium phosphate coatings by sol-gel on acrylonitrile-butadiene-styrene substrate. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 2017;28(6): 943–949. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20160244>
10. Boricha A. G., Murthy Z. V. P. Acrylonitrile-butadiene-styrene/chitosan blend membranes: preparation, characterization and performance for the separation of heavy metals. *Journal of Membrane Science*. 2009;339(1): 239–249. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.04.057>
11. Desrousseaux C., Cuffe R., Aumeran C., ... Sautou V. Fabrication of acrylonitrile-butadiene-styrene nanostructures with anodic alumina oxide templates, characterization and biofilm development test for staphylococcus epidermidis. *PLOS ONE*. 2015;10(8): e0135632. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135632>
12. Neher B., Gafur Md. A., Al-Mansur M. A., Bhuiyan Md. M. R., Qadir Md. R., Ahmed F. Investigation of the surface morphology and structural characterization of palm fiber reinforced acrylonitrile butadiene styrene (PF-ABS) composites. *Materials Sciences and Applications*. 2014;5: 378–386. <https://doi.org/10.4236/msa.2014.56043>
13. Леньшин А. С., Фролова В. Е., Ивков С. А., Домашевская Э. П. Микроструктурные и гидрофильные свойства образцов полимера полиэтилентерефталат-гликоля с различными рисунками 3D-печати. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(1): 78–87. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11810>
14. Lenshin A. S., Frolova V. E., Kannykin S. V., Domashevskaya E. P. Microstructural and hydrophilic properties of polylactide polymer samples with various 3D printing patterns. *Polymers*. 2024;16: 1281. <https://doi.org/10.3390/polym16091281>
15. Ошмян В. Г., Тиман С. А., Шамаев М. Ю. Моделирование влияния структуры аморфно-кристаллического полимера на деформационные свойства. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2003;45(10): 1699–1706. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17258689>
16. Гремlich Г. У. *Язык спектров. Введение в интерпретацию спектров органических соединений*. Брукер. Оптик.; 2002. 94 с.
17. Hollas J. M. *Modern Spectroscopy. Fourth Edition*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.; 2004. 452 p.
18. Tolstoy V. P., Chernyshova I. V., Skryshevsky V. A. *Handbook of infrared spectroscopy of ultrathin films*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.; 2003. 739 p. <https://doi.org/10.1002/047123432x>
19. Киселев М. Г., Савич В. В., Павич Т. П. Определение краевого угла смачивания на плоских поверхностях. *Вестник БНТУ*. 2006;1: 38–41. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21398120>
20. Елесина В. В. *Краевой угол смачивания. Методические рекомендации*. Издательство Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова. 2019; 22 с.
21. Павлов И. Н., Ринкевичюс Б. С., Толкачев А. В. Установка для визуализации испарения капли жидкости методом нарушенного полного внутреннего отражения лазерного пучка. *Приборы и техника эксперимента*. 2013;2: 130–135. <https://doi.org/10.7868/S0032816213020134>

## Информация об авторах

Леньшин Александр Сергеевич, д. ф.-м. н., в. н. с. кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-1939-253X>  
lenshinas@mail.ru

Фролова Вера Евгеньевна, к. ф.-м. н., доцент кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0000-2880-8958>  
ternovaya@phys.vsu.ru

Макагонов Владимир Анатольевич, к. ф.-м. н., доцент кафедры физики, Воронежский государственный технический университет (Воронеж, Российская Федерация). <https://orcid.org/0000-0002-4024-4064>

vlad\_makagonov@mail.ru

Пелагина Александра Константиновна, аспирант кафедры общей физики, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-2597-3602>  
pisliaruk@phys.vsu.ru

Домашевская Эвелина Павловна, д. ф.-м. н., профессор, профессор-консультант кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-6354-4799>  
ftt@phys.vsu.ru

Поступила в редакцию 12.08.2025; одобрена после рецензирования 17.09.2025; принята к публикации 15.10.2025; опубликована онлайн 01.04.2026.