

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 691.175.5/.8

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11810>

Микроструктурные и гидрофильные свойства образцов полимера полиэтилентерефталат-гликоля с различными рисунками 3D-печати

А. С. Леньшин, В. Е. Фролова , С. А. Ивков, Э. П. Домашевская

Воронежский государственный университет,
Университетская площадь, 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

Аннотация

Цель работы – исследование влияния процесса 3D печати на принтере Hercules Original путем последовательного наложения слоев полимера способом FDM (Fused Deposition Modeling) на микроструктурные и гидрофильные свойства образцов полиэтилентерефталат-гликоля (ПЭТГ) с различными рисунками печати. Рентгенофазовый анализ обнаружил наличие большей упорядоченности полимерных цепей аморфного ПЭТГ в напечатанных образцах, которая происходит при тепловом и механическом воздействиях на исходный нитевидный образец в процессе 3D-печати. Она проявляется в увеличении на порядок относительной интенсивности главного дифракционного максимума аморфного полимера ПЭТГ в равной степени во всех образцах с пятью различными рисунками печати. При этом данные ИК-спектроскопии обнаруживают сохранение всех внутримолекулярных химических связей полимера.

Близкие значения краевых углов смачивания у всех напечатанных образцов к величине $\theta \approx 50^\circ$, значительно меньшей прямого угла $\theta = 90^\circ$, показывают, что поверхности всех пяти напечатанных образцов ПЭТГ с различными рисунками являются гидрофильными.

Ключевые слова: полиэтилентерефталат-гликоль ПЭТГ, модельные рисунки 3D-печати, рентгенофазовое состояние, ИК-спектры, смачивание поверхности

Источник финансирования: Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ частично в рамках госзадания для университетов в области научной деятельности, проект № ФЗГУ-2023-006, и Соглашения N 075-15-2021-1351 в части РФА исследований.

Для цитирования: 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>

For citation: Lenshin A. S., Frolova V. E., Ivkov S. A., Domashevskaya E. P. Microstructural and hydrophilic properties of polyethylene terephthalate glycol polymer samples with various 3D printing patterns. *Condensed Matter and Interphases*. 2024;26(1): 78–87. 10.17308/kcmf.2024.26/11810

✉ Фролова Вера Евгеньевна, e-mail: ternovaya@phys.vsu.ru

© Леньшин А. С., Фролова В. Е., Ивков С. А., Домашевская Э. П., 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

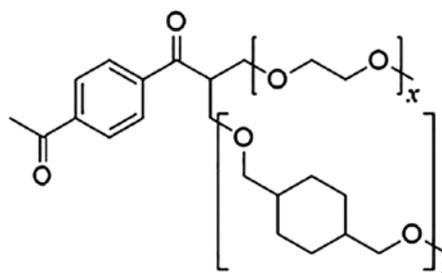
Одной из важнейших задач полупроводниковой микроэлектроники всегда являлось создание высококачественных корпусов для интегральных схем. В настоящее время изготовление качественных и сравнительно недорогих корпусов для интегральных схем из полимеров представляется особенно актуальным.

К таким полимерам в настоящее время относится полиэтилентерефталат-гликоль ПЭТГ (PETG) – высокопрочный, износостойкий материал, обладающий достаточно высокой температурой плавления (230–240 °С), стойкостью к большому числу химических реагентов и ультрафиолету. В совокупности с простотой печати он получил самое широкое применение в аддитивном производстве в виде нитей или гранул [1–4]. Модифицированный на стадии синтеза циклогександиметанолом полиэтилентерефталат ПЭТГ стал популярным материалом для аддитивного производства и используется, в частности, для печати по технологии послойного наложения слоев полимера способом FDM (Fused Deposition Modeling) [1]. ПЭТГ представляет собой аморфный термопластичный сополиэфир [2]. Аморфная природа ПЭТГ обусловлена введением в полимерную цепь полукристаллического полиэтилентерефталата циклогексанового фрагмента, стерически затрудняющего кристаллизацию полукристаллического полиэтилентерефталата (ПЭТ). Механические характеристики ПЭТГ аналогичны характеристикам ПЭТ [6], однако ПЭТГ обычно рассматривается как лучший полимер для 3D-печати [7]. Он очень подходит для экструзии, выдувного формования, литья под давлением, а также термоформования [8]. При этом он обладает превосходной химической стойкостью, хорошей прочностью на растяжение и гибкостью [7]. Благодаря аморфной структуре и относительно прочному межслойному соединению изделия, напечатанные из ПЭТГ, проявляют меньшую анизотропию механических свойств по сравнению с другими материалами, изготовленными по технологии FDM [8].

Кроме того, благодаря хорошей биосовместимости он является подходящим материалом для 3D-печати в инженерии костной ткани [9].

Диэлектрические свойства этого материала позволяют активно применять его в электротехнике и электронике при производстве корпусов и элементов электронных устройств [10]. ПЭТГ является идеальным вариантом для изготовления объектов, которые подвергаются постоянным нагрузкам, систематическим ударам или вибрациям.

ПЭТГ представляет собой термопластик и является продуктом поликонденсации этиленгликоля с терефталевой кислотой (или её диметилловым эфиром) с химической формулой $(C_{10}H_8O_4)_n$. Структурная формула ПЭТГ [2]:



ПЭТГ представляет собой твёрдое, бесцветное, прозрачное вещество в аморфном состоянии и белое, непрозрачное – в полукристаллическом состоянии. Переходит в прозрачное состояние при нагреве до температуры стеклования (85 °С) и остаётся в нём при резком охлаждении и быстром проходе через «зону кристаллизации». Одним из важных параметров ПЭТГ является характеристическая вязкость, определяемая длиной молекулы полимера. С увеличением вязкости скорость кристаллизации снижается. ПЭТГ поддаётся окрашиванию, металлизации, на него может быть нанесена печать.

Целью работы является исследование влияния процесса 3D-печати образцов полиэтилентерефталат-гликоля (ПЭТГ) с различными модельными рисунками на их микроструктурные свойства и смачиваемость поверхности.

2. Экспериментальная часть

Объекты и методы исследования. Образцы для исследования были изготовлены из нити (Filament) полиэтилентерефталат-гликоля ПЭТГ диаметром 1.75 мм на 3D-принтере Hercules Original методом послойного наложения слоев полимера FDM (Fused Deposition Modeling) [1]. Температура экструдера – 260 °С, мощность – 500 Вт. Были напечатаны 5 образцов цилиндрической формы диаметром 20 мм и толщиной 5 мм. Напечатанные образцы отличались рисунками 3D печати (пять модельных типов). На рис. 1 представлены исследуемые типы модельных рисунков.

Наряду с напечатанными образцами исследовался исходный нитевидный образец ПЭТГ, поэтому в следующем разделе статьи будут представлены результаты исследования микроструктурных свойств для шести образцов.

Рентгенофазовый анализ (РФА) всех перечисленных выше образцов ПЭТГ проводился на

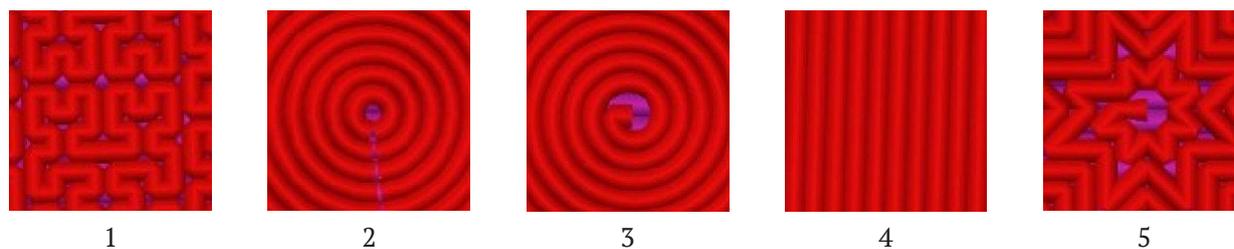


Рис. 1. Пять типов модельных рисунков 3-D печати на образцах из полимера полиэтилентерефталат-гликоль (ПЭТГ): 1_Hilbert, 2_Concentric, 3_Archimedean, 4_Rectilinear, 5_Octagram

дифрактометре ДРОН-4.07 с $\text{CuK}\alpha$ -излучением в режиме пошагового сканирования с вращением образца, на медном излучении $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$) при высоком напряжении и токе накала анода рентгеновской трубки $U = 29 \text{ кВ}$ и $I = 25 \text{ мА}$.

Измерения малоугловой рентгеновской дифракции образцов проводились в ЦКПНО ВГУ на дифрактометре ARLX'TRA в геометрии параллельного пучка в режиме θ - θ в интервале углов $2\theta = 1$ – 10° на $\text{CuK}\alpha_1$ -излучении при наличии монохроматора.

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. Любая молекула имеет свой индивидуальный спектр колебаний, поэтому сравнивая моды полученного экспериментального спектра с известными литературными данными можно идентифицировать исследуемое вещество. Исследования молекулярной структуры образцов ПЭТГ проводили на пяти 3D напечатанных образцах с различными модельными рисунками (рис. 1) и исходной нити путем измерения ИК-спектров

пропускания методом НПВО (нарушенного полного внутреннего отражения) на ИК-Фурье спектрометре Brucker Vertex 70 ЦКПНО ВГУ.

Исследования смачиваемости поверхности плоских напечатанных образцов с различными модельными рисунками 3D-печати (рис. 1) проводили на установке для измерения краевых углов смачивания (рис. 2), которую мы изготовили на 3D-принтере. Установка представляет собой подставку с держателем образца, на которую помещается плоский образец. Сверху установлен 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, и с помощью программы графического редактора Pic-pic измеряется краевой угол смачивания образца ϕ .

Капля жидкости на поверхности твердого тела в зависимости от природы твердого тела, жидкости и среды, в которой она находится, может растекаться полностью или частично и приобрести такой вид, как на рис. 3. Угол ϕ между касательной к поверхности капли и поверхностью



Рис. 2. Установка для измерения краевых углов смачивания

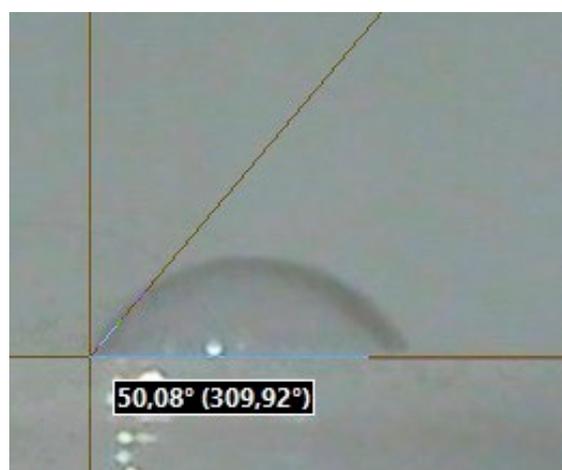


Рис. 3. Краевой угол смачивания ϕ на гидрофильной поверхности

твёрдого тела, отсчитываемый в сторону поверхности капли, называется краевым углом φ [9, 10].

Если капля жидкости полностью или *частично* растекается по поверхности образца и образует с ней острый угол $\varphi < 90^\circ$, как на рис. 3, то жидкость *смачивает* данную поверхность. Смачивают твёрдую поверхность только те жидкости, которые понижают поверхностное натяжение данного твёрдого тела на границе с воздухом. Поверхности твёрдых тел, смачиваемые водой, называются *гидрофильными*. Поверхности, на которых вода не растекается и образует тупой краевой угол $\varphi > 90^\circ$, называются *гидрофобными*.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Рентгенофазовый анализ образцов ПЭТГ

На рис. 4 представлены результаты исследования кристаллического состояния исследуемых образцов с 5-ю различными рисунками 3D-печати, 1_Hilbert, 2_Concentric, 3_Archimedian, 4_Rectilinear, 5_Octogram, и исходной нити (Filament) рентгенографическими методами в двух интервалах брэгговских углов: малых углов $2\theta = 1-10^\circ$ (верхний рис. 4а) и больших углов $2\theta = 10-90^\circ$ (нижний рис. 4б).

Полученные результаты показывают, что на малых углах все исследуемые образцы не дают

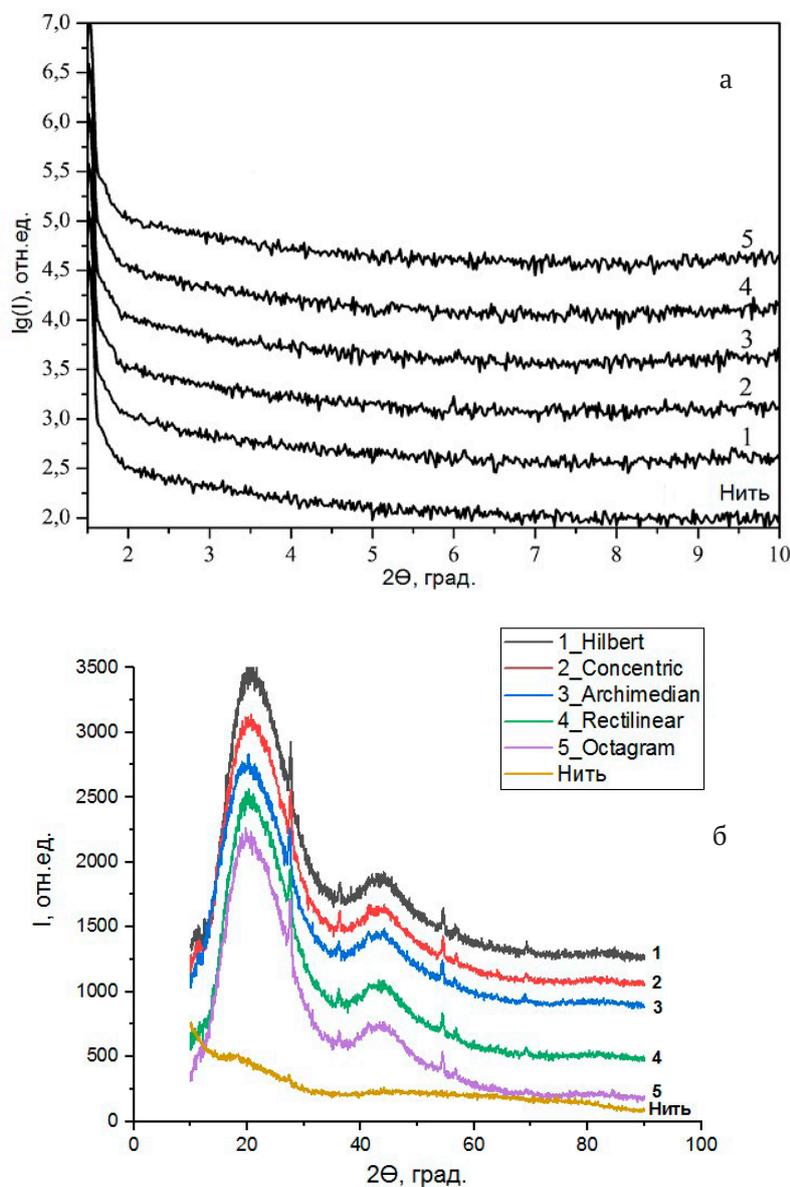


Рис. 4. Дифрактограммы образцов с модельными рисунками 1_Hilbert, 2_Concentric, 3_Archimedian, 4_Rectilinear, 5_Octogram и исходной нити для 3D-печати (Filament) в двух интервалах брэгговских углов: малых углов $2\theta = 1-10^\circ$ (верхний рис. 4а) и больших углов $2\theta = 10-90^\circ$ (нижний рис. 4б)

никаких отражений (рис. 4а), тогда как в интервале больших углов дифрактограммы всех 5-ти напечатанных образцов с различными рисунками содержат по два широких отражения (гало) от аморфной фазы ПЭТГ с самым интенсивным отражением в области углов $2\theta \approx 15\text{--}35^\circ$ и вторым менее интенсивным в области $2\theta \approx 37\text{--}55^\circ$ (рис. 4б). На фоне этих широких полос у всех напечатанных пяти образцов появляются узкие дифракционные линии от кристаллической фазы окрашивающего пигмента полимера ПЭТГ [11], которым является диоксид титана TiO_2 тетрагональной структурой рутила [11, 12].

При этом на дифрактограмме исходной нити (6_Filament, рис. 4б) интенсивность первого гало с максимумом $2\theta \approx 20^\circ$ уменьшается на порядок, а второе гало растягивается в два-три раза в шкале 2θ , по сравнению со всеми напечатанными образцами. И на фоне первого гало исходной нити лишь намечается след от одной самой интенсивной линии пигмента TiO_2 (110). Такие отличия дифрактограмм напечатанных образцов от дифрактограммы исходной нити обусловлены большей упорядоченностью при ориентации жестких полимерных цепей аморфного ПЭТГ в напечатанных образцах с различными рисунками, которая происходит в экструдере при тепловом и механическом воздействиях на исходный нитевидный образец в процессе 3D-печати. Однако следует отметить, что характерная аморфная структура нитевидных образцов ПЭТГ от различных производителей, используемых для 3D-печати, может отличаться степенью упорядочения полимерных цепей, которая отражается на интенсивности первого гало дифрактограмм исходных нитей.

Тем не менее, в работе [11] при исследовании влияния различных скоростей 3D-печати на микроструктуру, морфологию и механические свойства напечатанных образцов размером $20 \times 20 \times 3$ мм, использовали нить ПЭТГ диаметром 1.75 мм производства FUEL INVEST, SE, Prague, Czech Republic, дифрактограмма которой практически не отличалась от дифрактограмм напечатанных образцов с разной скоростью печати и наших образцов с разными рисунками. Однако наблюдаемые на дифрактограмме отличия относительной интенсивности первого гало нашей исходной нити на рис. 4б от исходной нити работы [11] может быть связано с особенностями технологии производителя нитей для 3D-печати.

В табл. 1 приведены значения брэгговских углов 2θ и межплоскостных расстояний d кристаллического пигмента TiO_2 в напечатанных

образцах ПЭТГ, связанных формулой Вульфа-Брэггов:

$$2d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda,$$

где n – порядок отражения, λ – длина волны рентгеновского излучения $\text{CuK}\alpha$ $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$.

Анализ величин межплоскостных расстояний кристаллической фазы пигмента TiO_2 показывает, что их значения, измеряемые в ангстремах $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$, являются практически одинаковыми для всех пяти образцов (с точностью до второго знака). Этот факт вместе с сохранением относительных интенсивностей дифракционных линий на фоне неизменных интенсивных гало от аморфной фазы ПЭТГ напечатанных образцов означает, что исходный нитевидный полимер ПЭТГ испытывает одинаковые тепловые и механические воздействия при послойном нанесении экструдером на плоскую поверхность любого рисунка из пяти исследованных.

3.2. ИК-спектры образцов ПЭТГ

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. 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 (λ) или ее обратной величины, которая известна как волновое число (ν).

На рис. 5 представлены ИК-спектры пропускания для исходной нити и пяти изготовленных 3D-печатью образцов с различными модельными рисунками из полимера ПЭТГ.

В табл. 2 представлены моды колебаний ИК-спектров для всех шести образцов. В последней колонке таблицы приведены для сравнения полосы поглощения полимера полиэтилентерефталата ПЭТиз работы [15].

Результаты ИК-спектроскопии показывают, что волновые числа и относительные интенсивности мод колебаний всех пяти напечатанных образцов с различными рисунками имеют практически одинаковые значения и совпадают в пределах точности измерения с соответствующими значениями основных мод исходной нити ПЭТГ, используемой при 3D-печати образцов,

Таблица 1. Значения брэгговских углов 2θ и межплоскостных расстояний d (Å) кристаллической фазы пигмента TiO_2 в напечатанных образцах ПЭТГ с различными модельными рисунками

Образец ПЭТГ с модельным рисунком	2θ , (°)	d (Å)	Идентификация фазы рутила d_{hkl} TiO_2 [11]
1_Hilbert	27.70	3.222	3.247 (110)
	36.50	2.464	2.487 (101)
	54.65	1.681	1.687 (211)
	56.65	1.628	1.623 (220)
	69.40	1.356	1.359 (301)
2_Concentric	28.0	3.201	3.247 (110)
	36.15	2.489	2.487 (101)
	54.65	1.681	1.687 (211)
	56.85	1.621	1.623 (220)
	69.35	1.356	1.359 (301)
3_Archimedian	27.30	3.269	3.247 (110)
	36.0	2.497	2.487 (101)
	54.50	1.685	1.687 (211)
	56.80	1.621	1.623 (220)
	69.05	1.360	1.359 (301)
4_Rectilinear	27.45	3.256	3.247 (110)
	36.25	2.481	2.487 (101)
	54.55	1,685	1.687 (211)
	56.55	1.628	1.623 (220)
	69.25	1.358	1.359 (301)
5_Octilinear	27.65	3.229	3.247 (110)
	36.05	2.497	2.487 (101)
	54.65	1.681	1.687 (211)
	56.75	1.624	1.623 (220)
	69.55	1.353	1.359 (301)

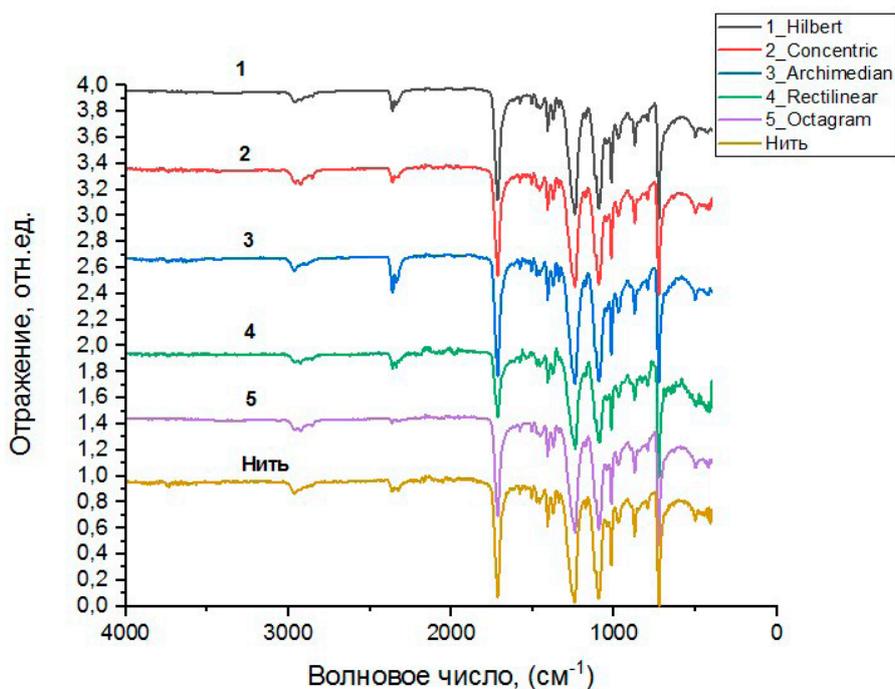
**Рис. 5.** ИК-спектры пропускания для исходного образца нити PETG и пяти образцов с различными модельными рисунками 3D-печати из полимера ПЭТГ

Таблица 2. Моды колебаний ИК-спектров исходной нити и образцов полимера ПЭТГ с различными модельными рисунками 3D-печати в сравнении с литературными данными для ПЭТ [15]

Идентификация мод колебаний	Моды колебаний образцов ПЭТГ, см ⁻¹						
	Исходная нить	1_Hilbert	2_Concentric	3_Archimedian	4_Rectilinear	5_Octagram	Моды ПЭТ[15]
Взаимодействие полярных сложноэфирных групп с бензольными кольцами	723	723	723	725	723	723	712
Колебания соседних ароматических протонов в <i>para</i> -замещенных ароматических кольцах	792	790 1978	791 1965	797 1965	791 1975	795 1987	795 1960
1,2,4,5-тетразамещенные бензольные кольца	871 972	875 974	872 968	876 968	874 975	872 972	872 972
Метиленовая группа и колебания сложноэфирной связи С-О	1043 1093	1043 1093	1043 1094	1047 1096	1045 1092	1043 1094	1050 1096
Терефталатная группа (ООСС ₆ H ₄ -НСОО)	– 1238	1112 1244	1114 1244	– 1234	1116 1238	1116 1240	1124 1240
Валентные колебания С-О в С-О-Н фрагменте этиленгликоля идеформационные колебания этого сегмента	1406 1460	1407 1454	1408 1458	1406 1458	1406 1458	1407 1454	1410 1453
Валентные колебания С=C связей в ароматическом кольце	1504 1575	1506 1577	1506 1577	1535 1574	1502 1578	1502 1576	1504 1577
Валентные колебания С=О связей в карбонильной группе	1716	1714	1713	1716	1717	1717	1730
Симметричное растяжение связи С-Н	2918 2952	2922 2964 3068	– 2954 3051	2932 2955 –	2928 2966 3049	2922 2961 3060	2908 2969 3054

и литературными данными для мод полимера ПЭТ [13]. Это означает, что внутримолекулярные химические связи полимера ПЭТГ не подвержены механическим и тепловым воздействиям в процессе 3D-печати. Эти воздействия оказывают влияние только на степень упорядочения полимерных цепей и проявляются в изменении относительной интенсивности главного дифракционного максимума аморфного полимера ПЭТГ в напечатанных образцах по сравнению с исходной нитью, наблюдаемые на рис. 4б.

3.3. Смачиваемость поверхности напечатанных образцов с различными модельными рисунками

Смачиваемость поверхности твердого тела является проявлением межмолекулярного вза-

имодействия на границе соприкосновения трех фаз: твердого тела, жидкости и газа, выражающееся в растекании жидкости на поверхности твердого тела. Поскольку измерение краевого угла смачивания поверхности проводится только на плоских образцах, то в данном разделе приведены результаты исследования смачиваемости только для пяти напечатанных образцов. На рис. 6 представлены изображения на экране установки для измерения краевого угла смачивания капель на поверхности пяти образцов с различными рисунками 3D-печати из полимера ПЭТГ.

Измерения краевых углов смачивания проводилось в пяти точках каждого образца, и в табл. 3 приведены средние значения этих углов.

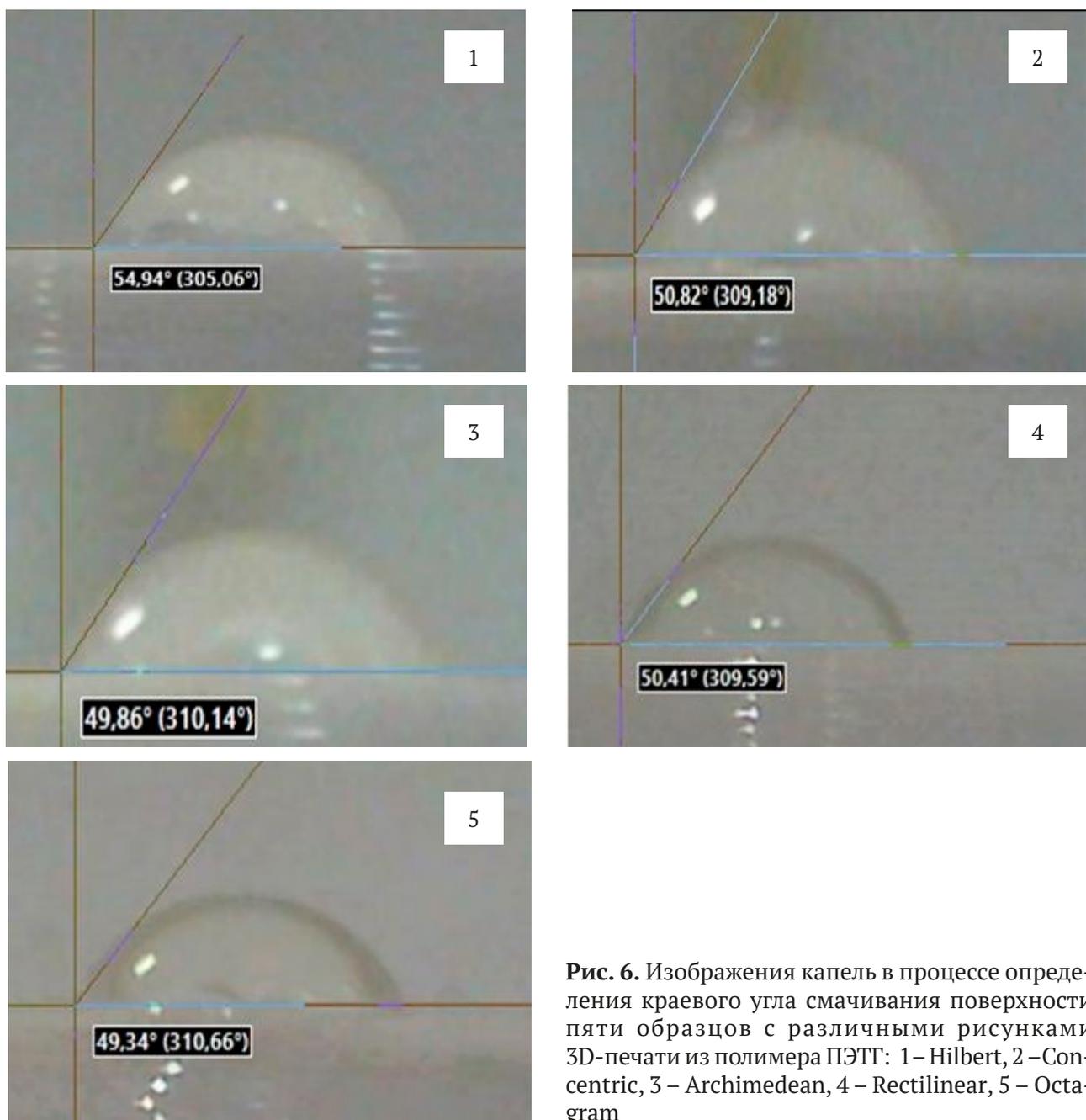


Рис. 6. Изображения капель в процессе определения краевого угла смачивания поверхности пяти образцов с различными рисунками 3D-печати из полимера ПЭТГ: 1 – Hilbert, 2 – Concentric, 3 – Archimedean, 4 – Rectilinear, 5 – Octagram

Таблица 3. Средние значения краевых углов смачивания на поверхности образцов из полимера ПЭТГ (PETG) с разными рисунками 3D-печати

Тип модельного рисунка при 3D-печати образца	Среднее значение краевого угла смачивания ϕ , град
1_Hilbert	52.84
2_Concentric	50.55
3_Archimedean	49.54
4_Rectilinear	50.10
5_Octagram	50.03

Сравнительный анализ величин краевых углов смачивания показывает, что все они лишь немного отклоняются от угла $\phi \approx 50^\circ$. И только один образец с рисунком 1_Hilbert показывает среднее значение угла смачивания $\phi = 52.84^\circ$, незначительно превосходящее соответствующие значения у образцов с другими рисунками на один-два градуса, т. е. на величину в пределах точности определения краевого угла смачивания.

Однако же результат большого отклонения среднего значения угла смачивания $\phi \approx 50^\circ$ для

всех пяти образцов по отношению к прямому углу 90° показывает, что поверхности всех напечатанных образцов с различными рисунками являются гидрофильными, т. е. смачиваемыми.

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 сложноэфирных групп полимера ПЭТГ в образовании на поверхности всех пяти образцов водородных связей с молекулами воды, проводящему к значительному понижению краевых углов смачивания относительно 90° .

4. Заключение

Полученные результаты при исследовании влияния процесса 3D-печати путем последовательного наложения слоев полимера способом FDM (Fused Deposition Modeling) на 3D-принтере Hercules Original при температуре экструдера 260°C и мощности 500 Вт на микроструктурные и гидрофильные свойства образцов полиэтилентерефталат-гликоля (ПЭТГ) с различными рисунками методами РФА, ИК-спектроскопии и измерения краевого угла смачивания, показали, что:

- отличия дифрактограмм напечатанных образцов от дифрактограммы исходной нити обусловлены большей упорядоченностью полимерных цепей аморфного ПЭТГ в образцах с различными рисунками, которая происходит при тепловом и механическом воздействиях на исходный нитевидный образец в экструдере при 3D-печати и проявляются в увеличении на порядок относительной интенсивности главного дифракционного максимума аморфного полимера ПЭТГ в напечатанных образцах по сравнению с исходной нитью;

- при этом внутримолекулярные химические связи полимера ПЭТГ не подвержены таким воздействиям процесса 3D-печати, и поэтому волновые числа и относительные интенсивности мод колебаний всех пяти напечатанных образцов с различными рисунками имеют практически одинаковые значения и совпадают в пределах точности измерения с соответствующими значениями основных мод исходной нити ПЭТГ, используемой при 3D-печати образцов;

- близкие значения краевых углов смачивания капли воды у всех напечатанных образцов к величине $\varphi \approx 50^\circ$, значительно меньше прямого угла $\theta = 90^\circ$, показывают, что поверхности всех

пяти напечатанных образцов ПЭТГ с различными рисунками являются гидрофильными;

- одним из механизмов межмолекулярного взаимодействия на границе соприкосновения капли воды с поверхностью напечатанных образцов может быть участие полярных сложноэфирных групп полимера ПЭТГ в образовании на поверхности всех пяти образцов водородных связей с молекулами воды, проводящему к значительному понижению краевых углов смачивания относительно 90° .

Таким образом, по результатам нашего исследования ПЭТГ зарекомендовал себя как материал, подходящий для 3D-печати с помощью распространенной модели принтера. При этом 3D-печать вызывает статистически значимую ориентацию полимерных цепей в аморфном материале ПЭТГ, одинаковую для всех пяти рисунков, в результате молекулярного выравнивания, вызванного экструзией, без разрушения внутримолекулярных химических связей полимера.

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. Vidakis N., Petousis M., Velidakis E., Lieb-scher M., Mechtcherine V., Tzounis L. On the strain rate sensitivity of fused filament fabrication (FFF) processed PLA, ABS, PETG, PA6, and PP thermoplastic polymers. *Polymers*. 2022;12: 2924. <https://doi.org/10.3390/polym12122924>
2. Silva A. L., Salvador G. M. da S., Castro S. V. F., Carvalho N. M. F., Munoz R. A. A. 3D printer guide for the development and application of electrochemical cells and devices. *Frontiers in Chemistry*. 2021;9: 684256. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.684256>
3. Vidakis N., Petousis M., Tzounis L., ... Mountakis N. Sustainable additive manufacturing: mechanical response of polyethylene terephthalate glycol over multiple recycling processes. *Materials*. 2021;14: 1162. <https://doi.org/10.3390/ma14051162>
4. Гордеев Е. Г., Анаников В. П. Общедоступные технологии 3D-печати в химии, биохимии и фармацевтике: приложения, материалы, перспективы. *Успехи химии*. 2020;89(12): 1507–1561. <https://doi.org/10.1070/RCR4980>

5. Bex G. J. P., Ingenhut B. L. J., Cate T., Sezen M., Ozkoc G. Sustainable approach to produce 3D-printed continuous carbon fiber composites: A comparison of virgin and recycled PETG. *Polymer Composites*. 2021;42: 4253–4264. <https://doi.org/10.1002/pc.26143>
6. Schneevogt H., Stelzner K., Yilmaz B., Abali B. E., Klunker A., Völlmecke C. Sustainability in additive manufacturing: exploring the mechanical potential of recycled PET filaments. *Composites and Advanced Materials*. 2021;30: 263498. <https://doi.org/10.1177/26349833211000063>
7. Latko-Duralek P., Dydek K., Boczkowska A. Thermal, rheological and mechanical properties of PETG/rPETG blends. *Journal of Polymers and the Environment*. 2019;27(11): 2600–2606. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01544-6>
8. Dolzyk G., Jung S. Tensile and fatigue analysis of 3D-printed polyethylene terephthalate glycol. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2019;19: 511. <https://doi.org/10.1007/s11668-019-00631-z>
9. Hassan M. H., Omar A. M., Daskalakis E., ... B'artolo P. The potential of polyethylene terephthalate glycol as biomaterial for bone tissue engineering. *Polymers*. 2020;12: 3045. <https://doi.org/10.3390/polym12123045>
10. Соболев Д. И., Проявин М. Д., Паршин В. В., Белоусов В. И., Рябов А. В. Широкополосные окна для СВЧ-излучения с малым отражением, изготовленные при помощи 3D-печати. *X Всероссийская научно-техническая конференция "Электроника и микроэлектроника СВЧ". Сборник докладов. Санкт-Петербург. 31 мая – 4 июня 2021 г.* СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; с. 52.
11. Киселев М. Г., Савич В. В., Павич Т. П. Определение краевого угла смачивания на плоских поверхностях. *Вестник БНТУ*. 2006;1: 38. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21398120>
12. Елесина В. В. *Краевой угол смачивания. Методические рекомендации*. Издательство Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова. 2019. 22 с.
13. Loskot J., Jezbera D., Bušovský D., ... Zubko M. Influence of print speed on the microstructure, morphology, and mechanical properties of 3D-printed PETG products. *Polymer Testing*. 2023;123: 108055. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108055>
14. ICDD Card: 04-003-0648 tetragonal TiO₂.
15. Pereira A. P. dos S., da Silva M. H. P., Júnior É. P. L., Paula A. dos S., Tommasini F. J. Processing and characterization of PET composites reinforced with geopolymer concrete waste. *Materials Research*. 2017;20(suppl 2): 411–420. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2017-0734>

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., старший преподаватель кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

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

Ивков Сергей Александрович, к. ф.-м. н., старший электроник кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-1658-5579>
ivkov@phys.vsu.ru

Домашевская Эвелина Павловна, д. ф.-м. н., профессор, профессор 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 27.10.2023; одобрена после рецензирования 18.11.2023; принята к публикации 25.12.2023; опубликована онлайн 25.03.2023.