

Свойства пластика PETG после 3D-печати по технологии FFF

Часть 2*

П. А. Петров, Д. Р. Агзамова, Н. С. Шмакова, В. А. Пустовалов, Б. Ю. Сапрыкин, И. А. Чмутин, Е. Д. Жихарева

Рассмотрено влияние режима 3D-печати на комплекс механических, оптических и тепловых свойств термопластичного прозрачного полимерного материала PETG (полиэтилентерефталат-гликоль), обработанного по аддитивной технологии FFF (Fused Filament Fabrication). Показано наличие зависимости между коэффициентом пропускания света, толщиной образца и его ориентацией во время 3D-печати.

Ключевые слова:

термопластичный прозрачный пластик, PETG, аддитивная технология FFF, 3D-печать, механические свойства, тепловые свойства, оптические свойства, коэффициент пропускания света

УДК 621.74.045 | ВАК 2.6.17

DOI: 10.22184/2499-9407.2022.27.2.58.64

Результаты исследования механических свойств

Проанализируем характер изменения механических свойств у исследуемых композиций пластика PETG. Рассмотрим два свойства – предел прочности при растяжении и относительное удлинение при растяжении. Результаты испытаний для всех композиций представлены в табл. 4. На рис. 12–14 отображены зависимости механических свойств от температуры стеклования и композиции пластика.

Изменение угла ориентации образца при 3D-печати с 0 на 90° приводит к повышению прочности образца материала при увеличении температуры стеклования. Такое изменение прочности может быть обусловлено тем, что при ориентации 90° сказывается влияние неравномерного распределения температуры по высоте образца. На этот эффект и его последствия указывается в ряде исследований зарубежных авторов, например в работе [10].

Для предела прочности наблюдается достаточно большой разброс значений, в зависимости от температуры стеклования композиции (рис. 12) и композиции пластика (рис. 13). Так, например, для ПЕТГ-8 получено наибольшее значение предела прочности – 64,77 МПа, а минимальное значение – для композиции ПЕТГ-3 51,67 МПа.

* Начало см.: Станкоинструмент, 2022, № 1

Угол ориентации образца во время 3D-печати несущественно влияет на прочностные свойства исследуемого материала. Относительное удлинение (рис. 14) у ПЕТГ-3 достигает максимального значения как при 0°, так и при 90°. При этом температура стеклования данной композиции стремится к минимальному значению (см. табл. 4) среди значений всех исследованных композиций.

ДСК анализ показывает, что композиция ПЕТГ-3 характеризуется небольшим пиком энтальпии релаксации при первом нагреве и достаточно широким пиком тепловых процессов (рис. 15). Наличие пика энтальпии может свидетельствовать о присутствии в полимере аморфной структуры, приводящей к тому, что механические свойства композиции ПЕТГ-3 одинаковы или практически одинаковы во всех направлениях (см. рис. 14 а и б).

Результаты исследования оптических свойств

Оптические свойства изделия, получаемого по аддитивной технологии, в нашем случае – экструзионной технологии 3D-печати, оцениваются для композиций полимера тип PETG. Методом спектрофотометрии оценивался показатель пропускной способности образцов полимера каждой композиции. С учетом того, что образцы изготавливались разной толщины, от 0,4 до 1,2 мм (см. табл. 3), количество слоев, формируемых соплом печатающей

Таблица 5. Значения удельной теплоемкости по результатам ДСК-анализа

Номер композиции	Температура стеклования (средняя), °С	Температура начала теплового процесса (предполагаемой кристаллизации), °С	Удельная теплоемкость (по первому нагреву), Дж/(г·К)
ПЕТГ-6	67,06	193	0,353
ПЕТГ-2	71,26	127	0,319
ПЕТГ-3	71,51	195	0,320
ПЕТГ-8	72,47	215	0,347
ПЕТГ-9	72,75	260	0,367
ПЕТГ-7	73,98	240	0,343
ПЕТГ-5	74,12	213	0,359
ПЕТГ-10	74,57	192	0,315
ПЕТГ-4	75,30	219	0,351
ПЕТГ-1	76,68	200	0,373

головки при 3D-печати, было также различно.

При ориентации 0° – толщина одного слоя составляет 0,1 мм. Толщина образца при 3D-печати формируется за счет набора необходимого количества слоев. Для образца толщиной 0,4 мм – количество слоев 4; для образца толщиной 0,6 мм – 6 слоев; для образца толщиной 1,2 мм – 12 слоев.

При ориентации 90° толщина образца формировалась за счет других параметров настройки 3D-принтера – толщины стенки (оболочки), диаметра сопла и ширины линии, формируемой соплом. Для образца толщиной 0,4 мм – количество слоев 1; для образца толщиной 0,6 мм – 1,5 слоя; для образца толщиной 1,2 мм – 3 слоя.

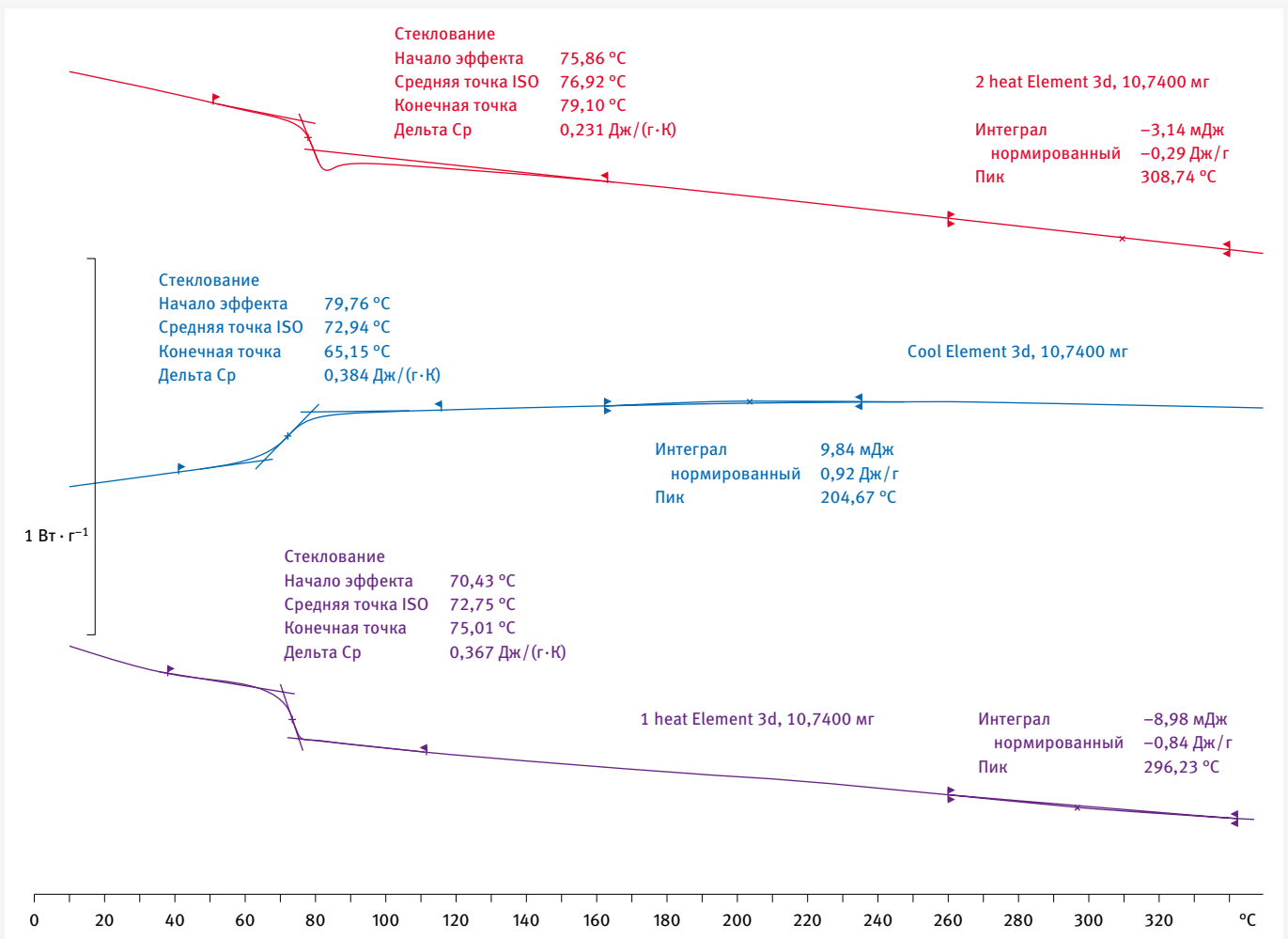


Рис. 11. Термограмма полимерного пластика композиции ПЕТГ-9

На рис. 16–19 представлены результаты испытаний направленных на оценку коэффициента пропускания света при ориентации образца 0° и 90° полимера тип PETG. Вновь, в качестве независимого параметра выбрана температура стеклования (рис. 16–17) и композиция полимера (рис. 18–19).

Ориентация образца при 3D-печати, как ранее упоминалось, оказывает влияние на распределение температуры по объему изготавливаемого изделия. Для образцов полимера с одной и той же композицией, но с разной ориентацией, коэффициент пропускания уменьшается. При ориентации

образца 0° коэффициент пропускания имеет большие значения (см. рис. 16 и 17). Здесь также следует учитывать количество слоев, за счет которых набирается толщина образца. Количество слоев как геометрический параметр, формирующий толщину образца, влияет на потери при прохождении световой волны сквозь материал. При ориентации 0° увеличение количества слоев в два раза приводит к снижению коэффициента пропускания от 10 до 70%, в зависимости от композиции полимера.

При ориентации 90° увеличение количества слоев в два раза приводит к снижению коэффициента пропускания

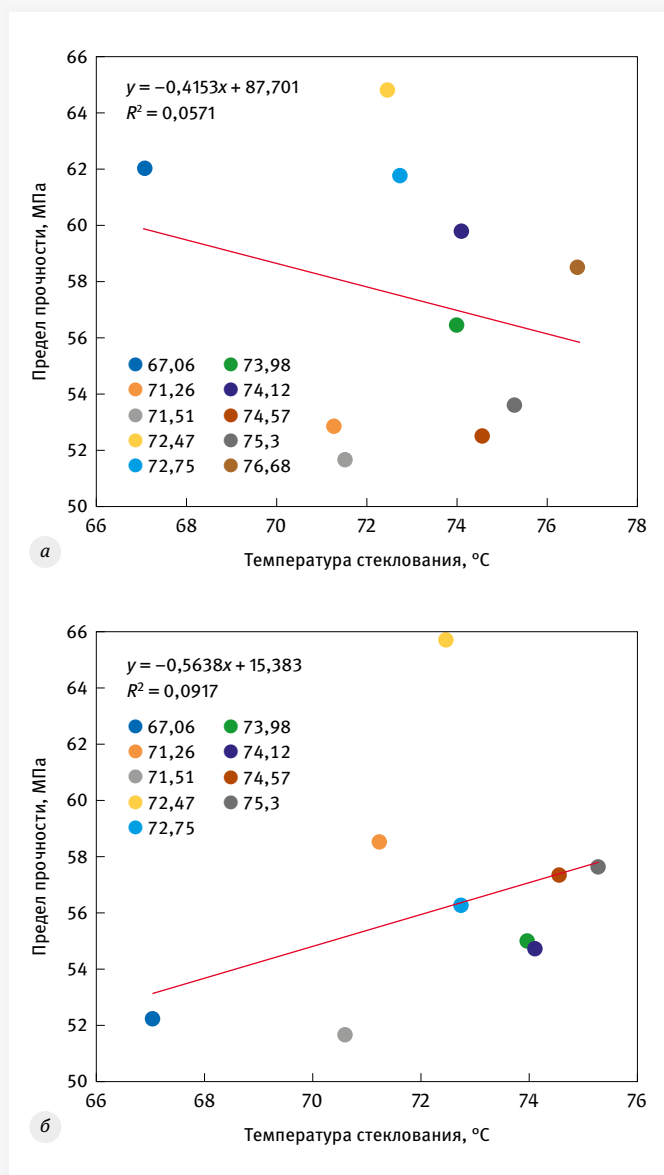


Рис. 12. Зависимость предела прочности от температуры стеклования при различной ориентации образца во время 3D-печати: а – ориентация образца при печати 0°; б – ориентация образца при печати 90°

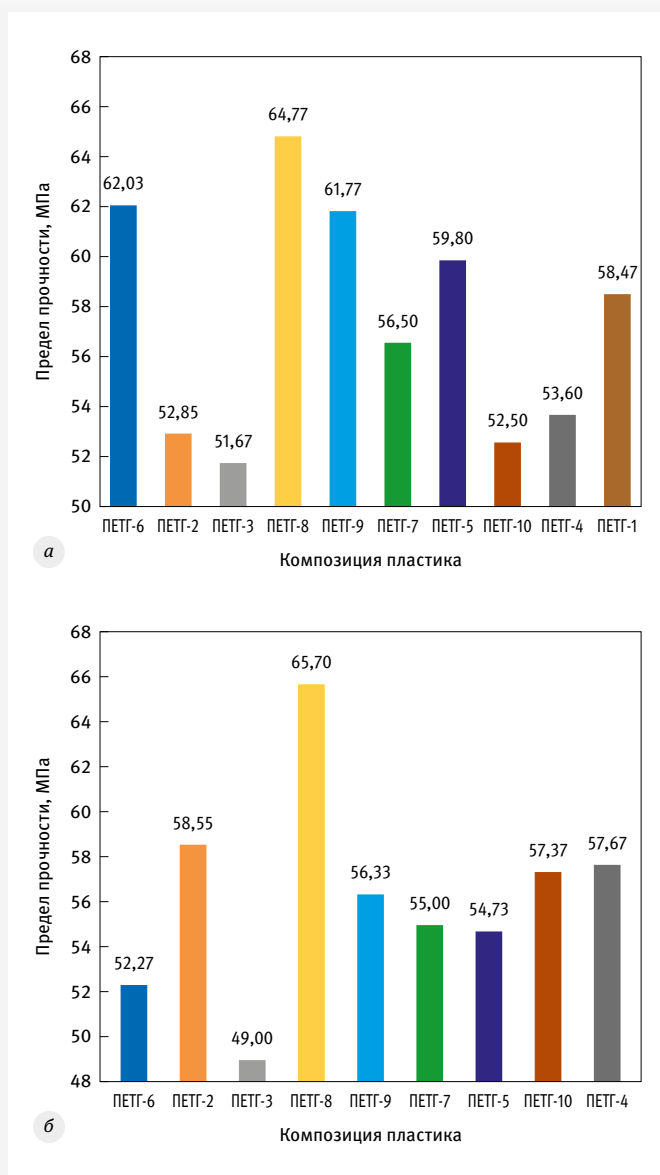


Рис. 13. Зависимость предела прочности от композиции пластика для образцов с различной его ориентацией во время 3D-печати; а – ориентация образца при печати 0°; б – ориентация образца при печати 90°

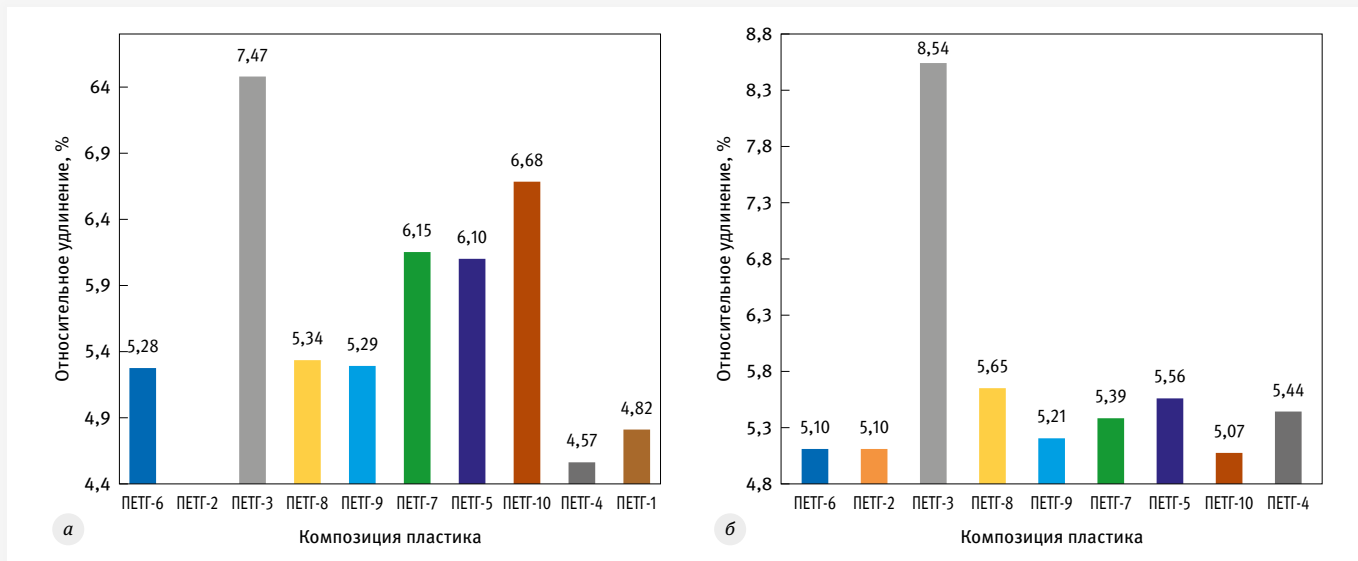


Рис. 14. Зависимость относительного удлинения от температуры стеклования при различной ориентации образца во время 3D-печати; а – ориентация образца при печати 0°; б – ориентация образца при печати 90°

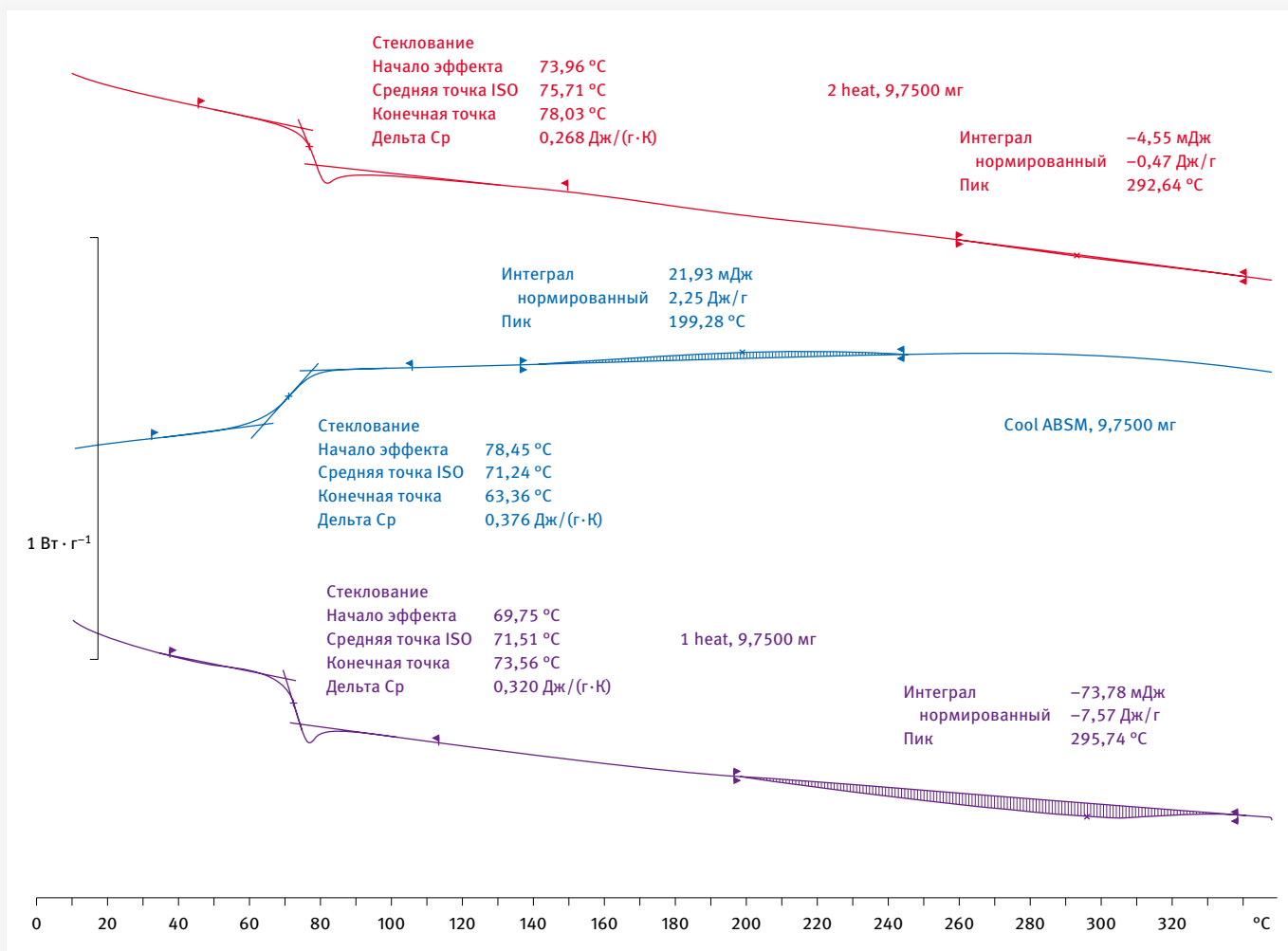


Рис. 15. Термограмма полимерного пластика композиции ПЕТГ-3

от 36 до 90%, в зависимости от композиции полимера (рис. 16 а и б; табл. 4). Если за базовое значение принять коэффициент пропускания света при минимальном количестве слоев, из которых формируется толщина образца, то полученные результаты показывают, что в пределах каждой ориентации образца – 0° или 90° – коэффициент пропускания света снижается примерно на одну и ту же долю относительно базы.

При сравнении характера изменения коэффициента пропускания света при ориентации 0° и 90° выявилось, что при ориентации 90° уменьшение оптической характеристики наиболее сильное. Предположительно, полученный

результат связан с формированием градиента температуры в изготавливаемом образце, несмотря на то что 3D-принтер, с помощью которого производилась 3D-печать, имеет пассивную термокамеру. Возможность формирования градиента при ориентации 90° подтверждается результатами, представленными в других исследовательских работах, например в работе [10].

Выводы и заключение

Проведенное исследование и полученные результаты позволяют сделать следующие выводы. Температура начала теплового процесса зависит от температуры стеклования

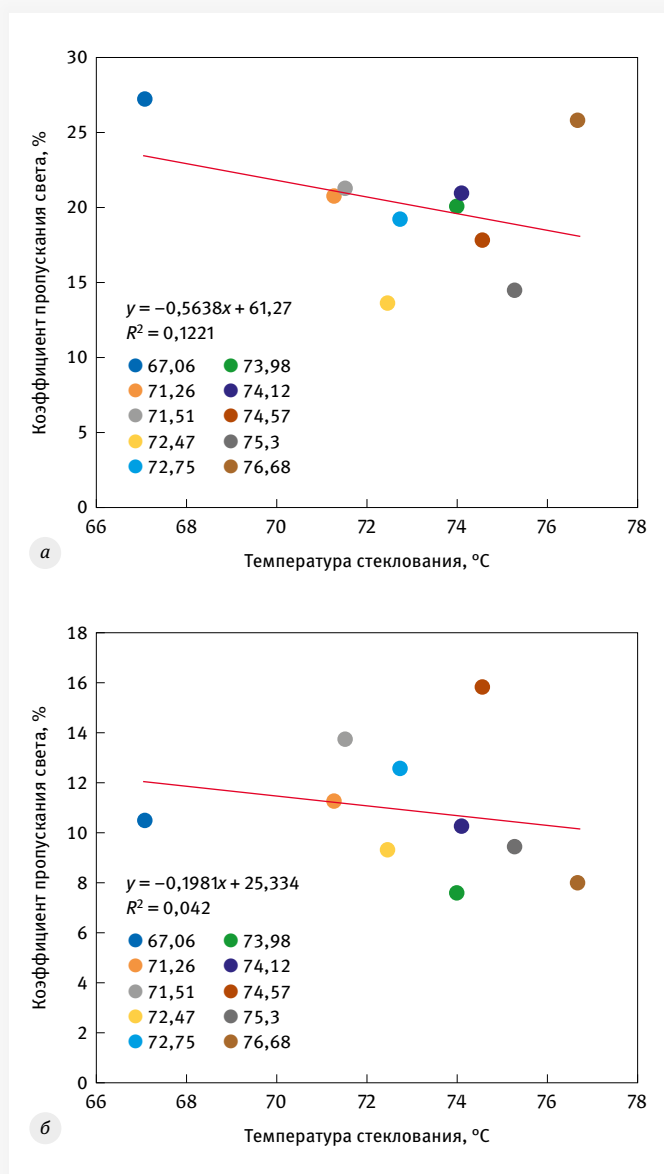


Рис. 16. Влияние температуры стеклования и количества слоев на коэффициент пропускания света на длине волны 650 нм (ориентация 0°); а – толщина 0,6 мм (6 слоев); б – толщина 1,2 мм (12 слоев)

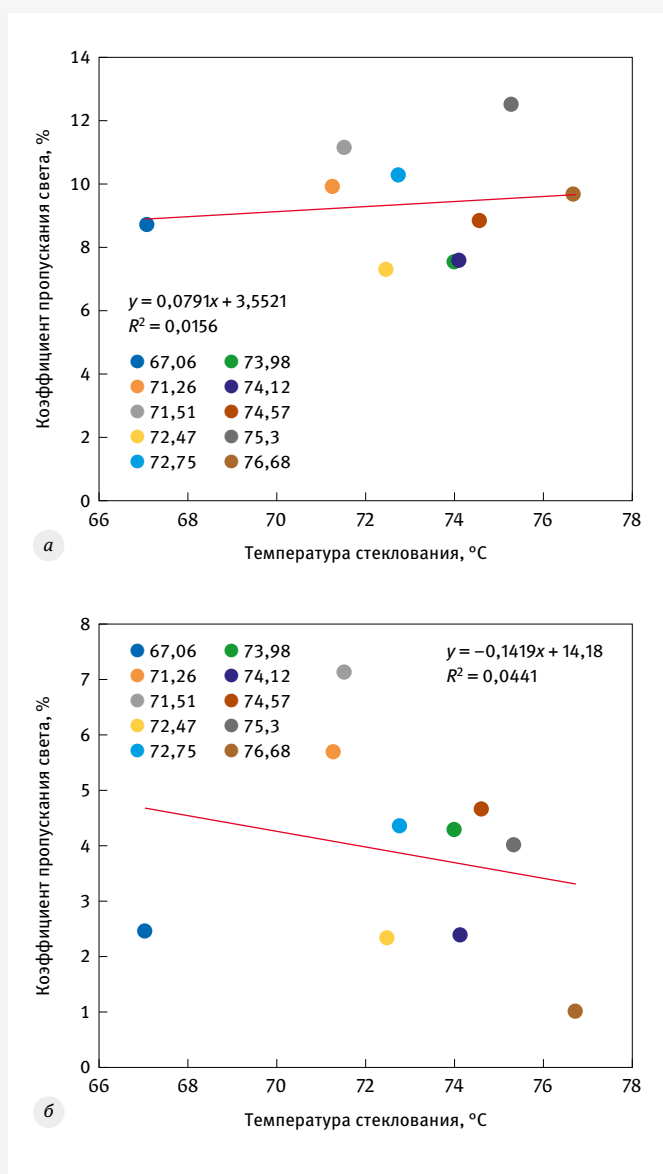


Рис. 17. Влияние температуры стеклования и количества слоев на коэффициент пропускания света на длине волны 650 нм (ориентация 90°); а – толщина 0,6 мм (1,5 слоя); б – толщина 1,2 мм (3 слоя)

композиции прозрачного полимерного материала PETG; причина наблюдаемого разброса значений температуры может быть уточнена за счет определения молекулярной массы каждой композиции, а также проведения дополнительного исследования методом ИК-спектроскопии. Состав композиции пластика определяет температуру стеклования при первом нагреве. 3D-печать из нити пластика соответствует первому нагреву материала.

Предел прочности исследуемого материала меняется при изменении температуры стеклования и угла ориентации образца при 3D-печати. Одна из причин такого изменения механических свойств может быть связана с температурным

градиентом, наблюдаемым при ориентации образца под углом 90°. Противоположное свойство – относительное удлинение d – изменяется иначе: чем выше предел прочности, тем меньше значение d .

Оптические свойства пластика PETG имеют более сложный характер изменения, зависящий от ориентации образца при 3D-печати, количества слоев, формирующих толщину образца, состава композиции прозрачного пластика. Предположительно, наиболее существенное влияние оказывают количество слоев и состав композиции. Уточнение данного предположения выходит за рамки данной статьи и требует проведения дополнительных исследований.

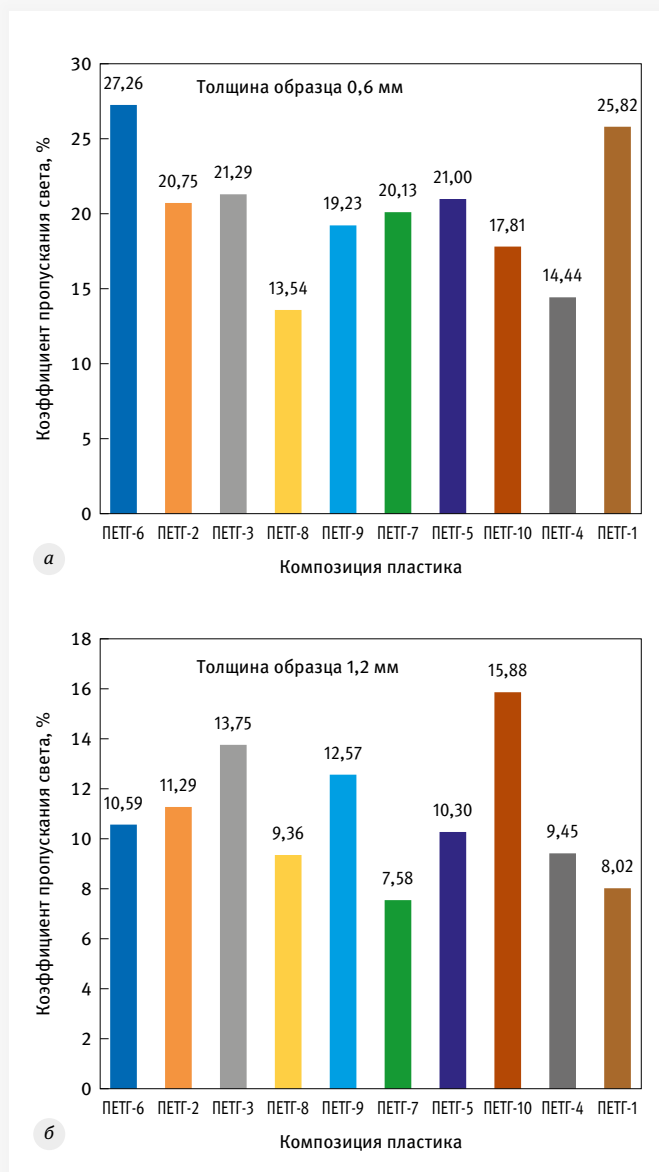


Рис. 18. Влияние состава композиции пластика на коэффициент пропускания света на длине волны 650 нм (ориентация 0°); а – 6 слоев; б – 12 слоев

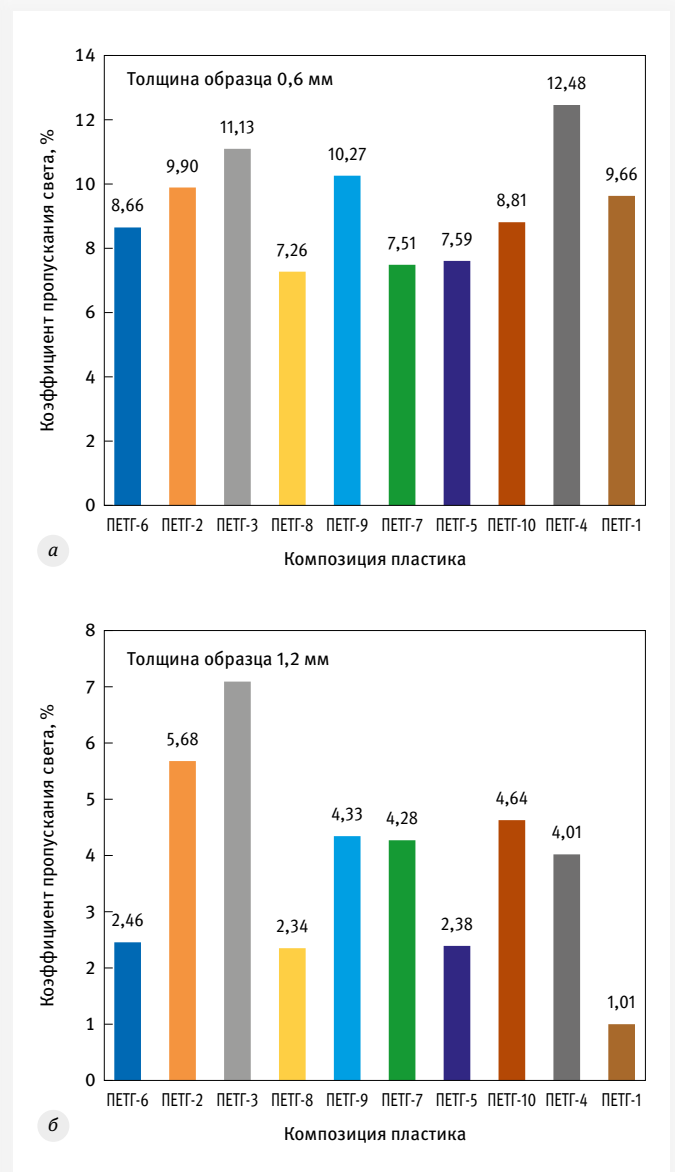


Рис. 19. Влияние состава композиции пластика на коэффициент пропускания света на длине волны 650 нм (ориентация 90°); а – 1,5 слоя; б – 3 слоя

Литература

1. **Dhinakaran V., Manoj Kumarn K. P., Bupathi Ram P. M., Ravichandran M., Vinayagamoorthy M.** A review on recent advancements in fused deposition modeling, *MaterialsToday: Proceedings*, 2020, Volume 27, Part 2, 752–756.
2. **Gao X., Qi, S. Kuang X., Su Yu Li J., Wang D.** Fused filament fabrication of polymer materials: A review of interlayer bond. *Additive Manufacturing*, Available online 10 October 2020, 101658 In Press. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101658>.
3. **Петров П. А., Бронин М. С., Сапрыкин Б. Ю., Долгов М. С.** 3D печать низкотемпературным пластиком // Аддитивные технологии. 2022. № 1. С. 16–19.
4. **Maloch J., Hnátková E., Žaludek M., Krátký P.** Effect of processing parameters on mechanical properties of 3D printed samples. In *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 919. PP. 230–235. Trans Tech Publications
5. **Oliveira de Miranda M. F., Ribeiro F.J.O. Saad, Núbia dos Santos Guarato A. Z.** Experimental analysis on the mechanical properties of PETG parts made with fused deposition modeling manufacturing. 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2019) October 20–25, 2019. <https://doi.org/10.26678/ABCM.COBEM2019.COB2019-1931>.
6. **Szykiedans K., Credo W., Osiński D.** Selected mechanical properties of PETG 3-D prints, *Procedia Engineering*, 2017, 177, 455–461.
7. **Sathish K., Soundararajan R., Shanthosh G., Saravanakumar P., Ratteesh M.** Augmenting effect of infill density and annealing on mechanical properties of PETG and CFPETG composites fabricated by FDM // November 2020 *Materials Today: Proceedings* (в печати)
8. **Kaushal Sharma.** Effect of FFF Process Parameters on Density and Mechanical Properties of PETG and Carbon Fiber Reinforced PETG Composites. Master Thesis, 2021. 134 p.
9. **Blok L. G., Longana M. L., Yu H., Woods B. K.S.** An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites // *Additive Manufacturing*. 2018. Vol. 22. PP. 176–186.
10. **Lepoivre A., Boyard N., Levy A., Sobotka V.** Heat Transfer and Adhesion Study for the FFF Additive Manufacturing Process // *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 47. PP. 948–955, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.291>.

Авторы

- Петров Павел Александрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Московского политехнического университета
- Агзамова Диана Расимовна** – магистрант Московского политехнического университета
- Шмакова Наталья Сергеевна** – руководитель Технологического центра коллективного пользования АО «Технопарк Слава»
- Пустовалов Владимир Андреевич** – магистрант Московского политехнического университета
- Сапрыкин Борис Юрьевич** – старший преподаватель Московского политехнического университета
- Чмутин Игорь Анатольевич** – доцент Центра проектной деятельности Московского политехнического университета
- Жихарева Елена Дмитриевна** – старший преподаватель Центра проектной деятельности Московского политехнического университета

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



ОБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ СТАЛЕЙ, ЖАРОПРОЧНЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С УЧЕТОМ ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ Райхельсон В. А.

В книге освещены основные виды механической обработки резанием современных конструкционных сталей, жаропрочных и титановых сплавов лезвийными инструментами: точение, строгание, сверление, фрезерование, протягивание, разрезка заготовок и прорезка пазов.

Книга содержит большой научно-практический и справочный материал, рассчитана на инженерно-технических работников предприятий машиностроения, авиакосмической отрасли, энерго- и автостроения, оборонной промышленности. Она также послужит учебным пособием для студентов и преподавателей высших и средних учебных заведений машиностроительных специальностей.

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 508 с., ISBN 978-5-94836-476-6

Цена 1210 руб.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru



21-23 ИЮНЯ
МОСКВА
РОССИЯ

2022

Место проведения:



ЛИТМАШ

Международная выставка литейных технологий, материалов и продукции

МЕТАЛЛУРГИЯ

Международная выставка металлургических технологий, процессов и металлопродукции

Специальная экспозиция



**ТРУБЫ
РОССИЯ
2022**

12+

N1
в мире



При поддержке
The Bright World of Metals

www.metallurgy-russia.ru
www.litmash-russia.ru

Металл-Экспо
Тел.: +7 (495) 734-99-66

Messe Düsseldorf GmbH
Тел.: +49 (0) 2 11/45 60-77 93

