

Изучение метода повышения прочности филамента PLA

П. А. Петров, И. А. Бурлаков, П. А. Полшков, М. А. Чибизов,
Б. Ю. Сапрыкин

Приведены результаты сравнительного анализа прочностных характеристик заготовок, полученных с применением 3D-печати из филамента PLA фирмы ESUN, которые были подвергнуты отпуску при различных температурах.

Ключевые слова:

филамент PLA, испытание на сжатие и растяжение, 3D-печать, отпуск, прочность

УДК 621.891.669 | ВАК 2.5.6

DOI: 10.22184/2499-9407.2024.34.1.60.63

Введение

В машиностроении, особенно в авиа- и ракетостроении, в больших объемах используются трубопроводы для обеспечения работы топливных, масляных, воздушных и других узлов [1]. Трубопроводы работают в условиях сложного нагружения. Они испытывают действие высокого давления, пульсирующей нагрузки и гидравлических ударов. Поэтому процессы изготовления элементов трубопровода должны обеспечить высокие и стабильные механические свойства материала труб, высокую чистоту внутренней и внешней поверхностей, минимальное утонение и искажение формы сечения трубопровода. Надежность трубопроводов в значительной степени определяет надежность технических конструкций, в которые они монтируются.

В авиационной промышленности уделяется большое внимание разработке способов изготовления трубопроводов из нержавеющей и титановых сплавов, обеспечивающих высокое и стабильное качество. Трубопроводы имеют сложную пространственную форму с большим количеством гибов, для формообразования которых применяют специальные трубогибочные автоматы, управляемые с помощью ЧПУ. Гибка труб металлическим инструментом, особенно труб с малым радиусомгиба, нередко приводит к образованию дефектов в виде вмятин от формообразующего инструмента. Одним из способов избежать таких дефектов является применение инструмента из конструкционного полимерного материала взамен стального. Предварительные работы в этом направлении показали актуальность вопросов, связанных с поиском способов повышения прочностных

свойств материала, в частности полимера PLA, применяемого для экструзионной аддитивной технологии.

С позиции технологии 3D-печати у данного материала есть важное преимущество – малая усадка при остывании, что особенно важно при изготовлении точных или собираемых изделий, а также при изготовлении крупногабаритных моделей [2]. Вторым технологическим преимуществом филамента PLA является низкая температура плавления (170–180 °C) [3–4], что не требует применения дорогостоящих установок для аддитивных технологий.

Несмотря на широкое применение филамента, основные публикации посвящены вопросам, касающимся влияния параметров печати на прочностные характеристики готовых изделий, определяемых испытаниями на растяжение [5] и сжатие [6]; вида и коэффициента заполнения поперечного сечения изделий (образцов) при 3D-печати [7].

По данным компании «Техно 3D» [8] обычно филамент PLA прочный, но несколько хрупкий. У него относительно низкая температура плавления. Низкая температура стеклования данного пластика упрощает его отпуск после 3D-печати. Кроме того, за счет увеличения пластичности в процессе отпуска, снижается склонность готовых изделий из этого пластика к хрупкости. Температура стеклования PLA составляет 60–65 °C. Температура плавления – 173–178 °C. Следовательно, при отпуске обычного PLA температуру печи необходимо выбирать в диапазоне 70–100 °C. В литературе термическую операцию по повышению прочности полимеров часто называют закалкой. Однако технически более правильным названием данной операции является, с нашей точки зрения, отпуск, так как отсутствует быстрое



Рис. 1. Образцы на растяжение (а) и сжатие (б)

охлаждение нагретых заготовок. Поэтому в настоящей статье использован термин «отпуск».

Целью данной работы стало повышение прочности заготовок из филамента PLA путем определения рациональных режимов отпуска.

Методика выполнения работы

Исследование было выполнено с применением полимерного материала типа PLA (полилактида) фирмы ESUN. Изготовление образцов осуществили на принтере Raise 3D Pro2 Plus, причем, в соответствии со стандартами [9, 10], на каждую точку было изготовлено по пять образцов для испытаний на сжатие и растяжение (рис. 1).

Сжатие цилиндрических образцов диаметром и высотой 10 мм выполняли на испытательной машине модели LFM50 со скоростью 2 мм/мин; образцы на растяжение, которые были изготовлены согласно ГОСТ 33693-2015 [11] уменьшенного масштаба (тип A12) (рис. 1 а и 2), испытывались на испытательной установке Tinius Olsen 50ST двухколонного

Таблица 1. Режимы изготовления образцов

Параметр	Значение
Температура сопла, °C	210
Температура рабочего стола, °C	60
Диаметр сопла, мм	0,4
Ширина линии, мм	0,4
Толщина слоя, мм	0,16
Толщина стенки (оболочки), мм	1,2
Обдув	100%
Ретракт	Да
Плотность заполнения, %	100
Стиль заполнения	Прямолинейная
Поддержки	Нет

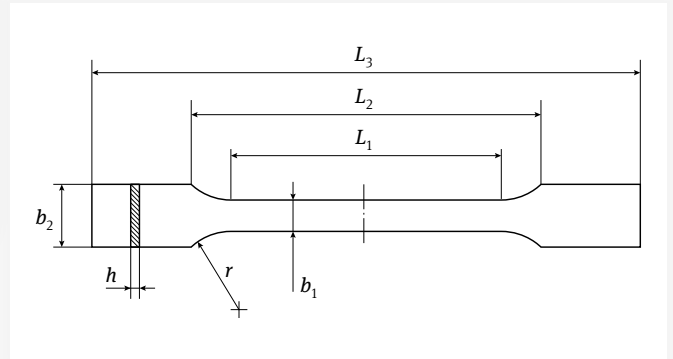


Рис. 2. Уменьшенный образец на растяжение (см. табл. 2)

типа с максимальной нагрузкой 50 кН (5000 кгс) и скоростью 100 мм/мин. Режимы 3D-печати образцов представлены в табл. 1.

Отпуск образцов был выполнен в сушильном шкафу с тремя уровнями нагрева: 70, 85 и 100 °C. Режимы отпуска были следующими:

1. загрузка образцов в сушильный шкаф, предварительно нагретый до требуемой температуры (70, 85 либо 100 °C);
2. выдержка образцов при назначенной температуре (70, 85 либо 100 °C) в течение 20 ± 2 мин;
3. охлаждение образцов до комнатной температуры (20–25 °C) в сушильном шкафу;
4. двукратный повтор операций по п. 1–3.

Результаты испытаний образцов, как без отпуска, так и термообработанных, представлены в виде зависимостей истинных напряжений текучести от деформации, полученных испытаниями на сжатие и растяжение (рис. 3 и 4). Образцы после испытаний на сжатие и растяжение показаны на рис. 5. Полученные результаты позволили установить, что прочностные и пластические свойства образцов

Таблица 2. Размеры уменьшенных образцов

Обозначение образца	A12, A22
Масштабный коэффициент	1 : 2
l_3 , мм	≥ 75
l_2 , мм	58 ± 2
l_1 , мм	$30 \pm 0,5$
b_1 , мм	$5 \pm 0,5$
b_2 , мм	$10 \pm 0,5$
r , мм	≥ 30
h , мм	$\geq (2 \pm 0,1)$

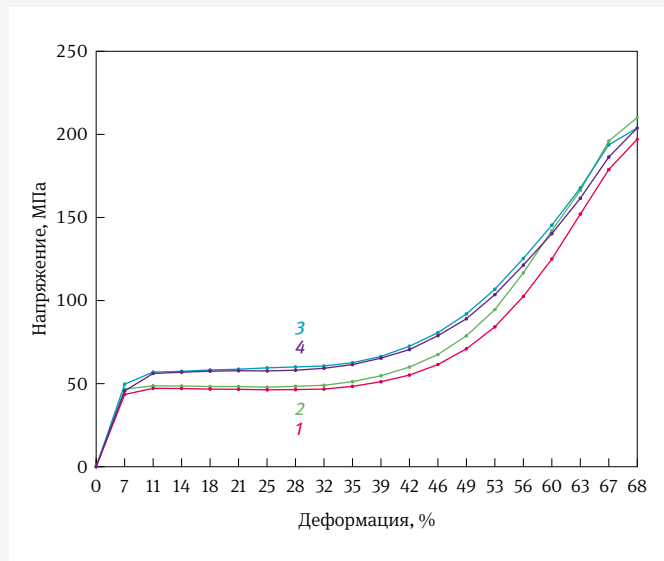


Рис. 3. Зависимость напряжений текучести филамента PLA от температуры отпуска образцов на сжатие: 1 – без отпуска, 2 – отпуск при температуре 70 °С, 3 – отпуск при температуре 85 °С, 4 – отпуск при температуре 100 °С

из филамента PLA могут быть существенно повышены трехступенчатым отпуском. Так, например, если относительное удлинение образцов, закаленных при температуре 100 °С, составляет практически 6%, то у нетермообработанных – менее 4,5%.

Для повышения прочностных свойств отпуск следует осуществлять при температурах выше 70 °С, и наилучшей температурой для обеспечения максимальных прочностных характеристик материала является 85 °С. Испытаниями на растяжение установлено, что деформационное упрочнение

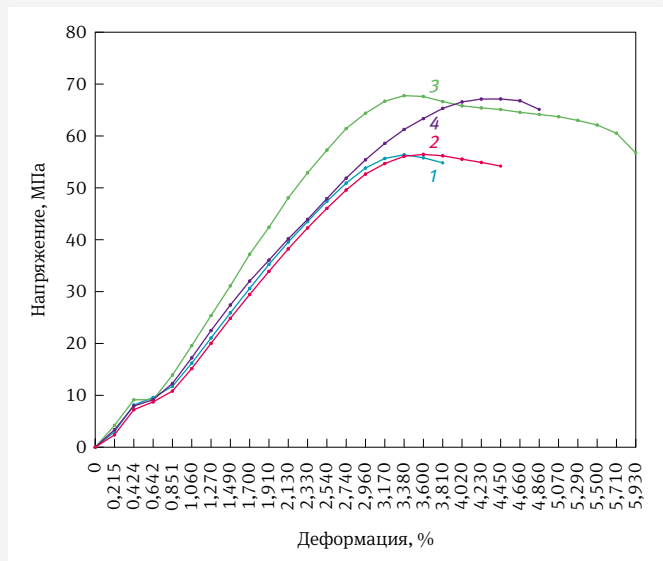


Рис. 4. Зависимость напряжений текучести филамента PLA от температуры отпуска образцов на растяжение: 1 – без отпуска, 2 – отпуск при температуре 70 °С, 3 – отпуск при температуре 85 °С, 4 – отпуск при температуре 100 °С

повышает прочностные характеристики до 20%, а испытаниями на сжатие – от 20 до 25%.

Сравнительный анализ результатов испытания образцов на растяжение и сжатие (рис. 6) показывает, что материал обладает большой способностью к деформационному упрочнению, и напряжение текучести при разрушении примерно в три раза выше, чем при растяжении. Такое свойство филамента PLA должно способствовать его успешному применению при изготовлении формообразующего инструмента для трубогибочных операций.



Рис. 5. Образцы из филамента PLA после испытаний на растяжение (а) и сжатие (б)

Выводы

Выполненные исследования позволили установить, что нетермообработанные образцы из филамента PLA имеют как минимальную пластичность, так и минимальную прочность. Так, например, если относительное удлинение образцов, подвергнутых отпуску при температуре 100 °С, составляет практически 6%, то у нетермообработанных – менее 4,5%.

Заметное повышение напряжения текучести наблюдается при температуре отпуска выше 70 °С, что подтверждается как испытаниями на растяжение, так и на сжатие. Наилучшей температурой отпуска для обеспечения максимальных прочностных характеристик материала является 85 °С. Испытаниями на растяжение установлено, что деформационное упрочнение повышает прочностные характеристики до 20%, а испытаниями на сжатие – от 20 до 25%.

Учитывая высокую способность материала к деформационному упрочнению, филамент PLA может быть успешно применен при изготовлении формообразующего инструмента для выполнения операции гибки труб малого диаметра.

Литература

1. **Феокистов С. И. и др.** Теория и практика изготовления элементов трубопроводов летательных аппаратов. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2013. 88 с.
2. **Машков Ю. К. и др.** Конструкционные пластмассы и полимерные композиционные материалы. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. 129 с.
3. **Дождевлев А. М. и др.** Обзор расходных материалов для 3D печати методом послойного наплавления // International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2019. Vol. 8–2. PP. 16–18. <https://doi.org/10.24411/2500-1000-2019-11481>.
4. **Алсаид М., Саламех А., Мамонтов В. А., Азизова Г. У.** Сравнительный анализ результатов механических испытаний многослойного полимерного композитного материала // Научные проблемы водного транспорта. 2020. Вып. 63. С. 28–40. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi63.73>
5. **Жуков А. В., Никифоров А. А., Яковишин А. С.** Пластмассы для аддитивных технологий (обзор) // Машиностроение и машиноведение. Вестник СГТУ. 2021. № 4 (91). С. 57–69.
6. **Залогин М. Ю. и др.** Экспериментальное определение и сравнительный анализ характеристик прочности полимеров PPHO30GP, ABS и PLA при различных скоростях дефор-

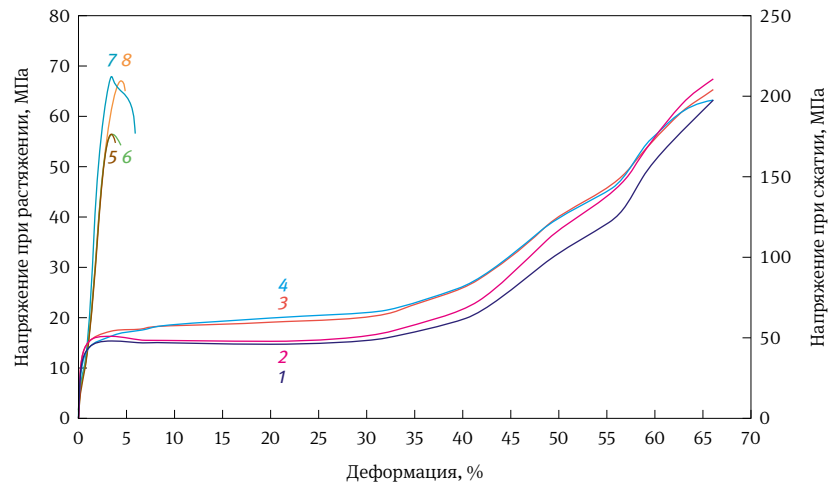


Рис. 6. Напряжения текучести при растяжении и сжатии образцов в зависимости от температуры отпуска: 1 – сжатие без термообработки, 2 – сжатие 70 °С, 3 – сжатие 85 °С, 4 – сжатие 100 °С, 5 – растяжение без термообработки, 6 – растяжение 70 °С, 7 – растяжение 85 °С, 8 – растяжение 100 °С

мации // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 3. С. 223–239. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-233-239>.

7. **Ермакова В. А. и др.** Исследование прочностных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати из PLA // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 2. С. 107–113. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-107-113>.
8. Материалы компании «Техно 3D». Сайт 3dpt.ru, 2021 г.
9. ГОСТ 4651-2014. Пластмассы. Метод испытания на сжатие. М.: Издательство стандартов.
10. ГОСТ 11262-2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М.: Издательство стандартов.
11. ГОСТ 33693-2015. Пластмассы. Образцы для испытания. М.: Издательство стандартов.

Авторы

Петров Павел Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета

Бурлаков Игорь Андреевич – доктор технических наук, главный специалист УГТ производственного комплекса «Салют» АО «ОДК»

Полшков Павел Анатольевич – начальник технологического бюро производственного комплекса «Салют» АО «ОДК»

Чибизов Максим Антонович – магистрант Московского политехнического университета

Сапрыкин Борис Юрьевич – старший преподаватель кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета