

# Повышение прочности формообразующего инструмента из полилактида PLA методом закалки

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

Приведены результаты исследований комплекса свойств термопластичного полимера – полилактида (PLA), на основании которых выбран режим 3D-печати формообразующего инструмента, применяемого для пространственной гибки стальных труб малого диаметра. Определен оптимальный режим закалки, обеспечивающий лучший комплекс механических свойств инструмента.

**Ключевые слова:**

полилактид PLA, закалка, термограммы, инструмент, гибка труб, стойкость инструмента, 3D-печать, аддитивные технологии, экструзионная технология FFF

УДК 621.774

УДК 621.891.669 | ВАК 2.5.6

DOI: 10.22184/2499-9407.2023.30.1.58.65

Трубы газотурбинных двигателей, изготавливаемые из стали типа 12X18H10T и титанового сплава ПТ-7М, имеют, как правило, сложную пространственную форму с большим количеством изгибов разных радиусов и углов гибки. Для реализации формообразующих операций применяют трубогибочные автоматы (рис. 1).

Заготовки в процессе гибки металлическим инструментом подвергаются значительным нагрузкам, которые приводят к образованию дефектов в виде складок и вмятин (рис. 2) [1–3]. Изготовление металлического инструмента характеризуется также высокой трудоемкостью и высокой стоимостью.

Применение трубогибочного инструмента из полимеров снижает возможность образования дефектов в виде

**Рис. 1.** Трубогибочный автомат с ЧПУ: а – общий вид; б – схема формообразующего инструмента (1 – задний прижим, 2 – передний прижим, 3 – ролик, 4 – задний прижим, 5 – исходная трубная заготовка)

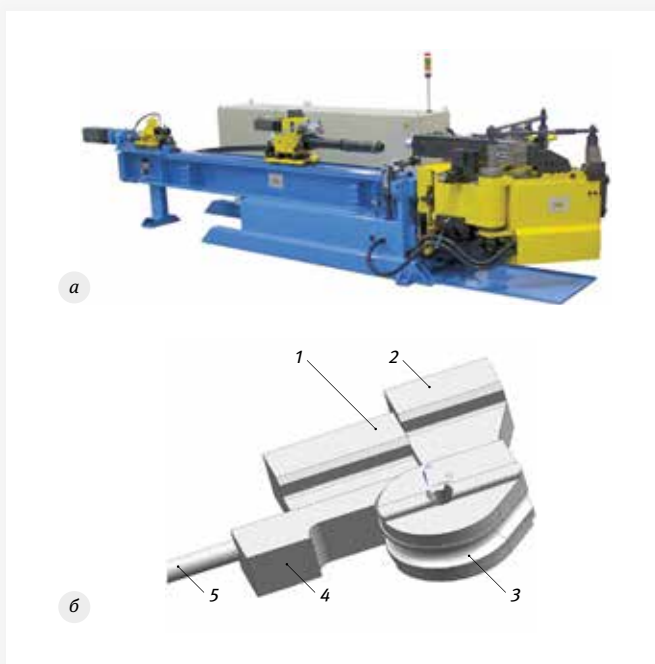




Рис. 2. Дефект в виде вмятины от переднего стального прижима

вмятин, также значительно снижается трудоемкость изготовления инструмента за счет высокопроизводительного, по сравнению с изготовлением оснастки из металла, процесса 3D-печати, что особенно важно при отработке новых изделий и необходимости выпуска трубных заготовок небольшими партиями (100–500 единиц).



Рис. 3. Принтер Raise 3D Pro2 Plus

В этой связи возрастает роль разработок, направленных на повышение эксплуатационных свойств применяемых конструкционных термопластичных полимерных материалов. Поэтому проблема определения рациональных режимов закалки для повышения стойкости формообразующего инструмента является актуальной.

### Цель работы

Целью данной работы является повышение эффективности процесса автоматизированной гибки труб путем применения инструмента из полилактида PLA. Для ее достижения необходимо:

- выбрать высокопрочный полилактид для изготовления инструмента;
- изучить его свойства путем испытания образцов на сжатие и растяжение;
- изучить возможность повышения прочностных свойств методом закалки;
- определить рациональный режим термической обработки;
- изготовить по экструзионной технологии FFF (Fused Filament Fabrication) формообразующий инструмент и выполнить его термическую обработку;
- испытать стойкость инструмента при изготовлении серии деталей.

### Методика выполнения работы

Был выбран полилактид PLA фирмы ESUN, обладающий более высокими механическими характеристиками по сравнению с типовым полилактидом PLA. Анализ механических свойств для разных режимов обработки проводили на образцах, полученных методом 3D-печати, в процессе испытаний на сжатие и растяжение. Образцы изготавливались

Таблица 1. Характеристики пластика PLA ESUN

Параметр филамента	
Плотность материала, г/см <sup>3</sup>	1,25
Температура термдеформации, °C (0,45 МПа)	52
Индекс текучести расплава, г/10 мин (190 °C/2,16 кг)	4
Предел прочности, МПа	65
Относительное удлинение при разрыве, %	12
Прочность на изгиб, МПа	75
Модуль упругости при изгибе, МПа	2 102
Диаметр филамента, мм	1,75 ± 0,03
Ударная прочность по Изоду, Дж/м	8,5

**Таблица 2.** Режимы изготовления образцов на растяжение и сжатие

Параметр	
Температура сопла, °С	210
Температура рабочего стола, °С	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
Поддержка	Нет

на принтере Raise 3D Pro2 Plus (рис. 3). Характеристики пластика PLA ESUN представлены в табл. 1.

Осадку цилиндрических образцов диаметром и высотой 10 мм выполняли на испытательной машине модели LFM50 со скоростью 2 мм/мин. Образцы на растяжение, изготовленные согласно ГОСТ 33693-2015 [4] – уменьшенного масштаба (тип A12) (рис. 3), были испытаны на установке Tinius Olsen 50ST двухколонного типа с максимальной нагрузкой 50 кН (5 000 кгс). Режимы изготовления образцов приведены в табл. 2.

По имеющимся данным термическая обработка закалкой снижает склонность материала к хрупкости и повышает его прочность. Закалку 3D-печатных образцов осуществили в сушильном шкафу по следующим режимам:

- загрузка образцов в сушильный шкаф, предварительно нагретый до требуемой температуры (70, 85 и 100 °С);
- выдержка образцов при назначенной температуре в течение  $20 \pm 2$  мин;
- охлаждение образцов до комнатной (20–25 °С) температуры в сушильном шкафу;
- двукратный повтор операций 1–3.

Испытания по определению термограмм полилактида PLA проводили на оборудовании компании Mettler Toledo. Режим проведения испытаний: нагрев в диапазоне 0–350 °С со скоростью 20 К/мин в среде азота.



**Рис. 4.** Образцы на растяжение (а) и сжатие (б)

### Экспериментальная часть

При нагреве в процессе закалки в материале филамента протекают сложные изменения [5]. Как показано на термограмме (рис. 5), структурные изменения в термопластичных полимерах происходят в диапазоне между температурами стеклования (60 °С) и плавления (170 °С), что, по всей видимости, меняет соотношение аморфной и кристаллической составляющих структуры. Детальное исследование кристалличности пластика выходит за рамки данной работы.

Первый нагрев, показанный на термограмме (рис. 5, линия 1) соответствует термическим процессам, происходящим при 3D-печати по экструзионной технологии FFF. Кривая второго нагрева (линия 2) отображает процессы, происходящие при термической обработке полилактида PLA. Для исследования режима термообработки на свойства полилактида были использованы данные второго нагрева.

На этом основании и с учетом того факта, что при нагреве инструмента до температуры выше 100 °С предполагается его значительная деформация, для закалки образцов были выбраны три температуры: 70, 85 и 100 °С. Выбранные значения температуры находятся ниже области, в которой наблюдаются (предположительно) структурные изменения в PLA (линия 2 в диапазоне температур 100–140 °С).

Полученные по разным режимам (без термообработки и с термообработкой при различных температурах закалки) образцы подвергали испытанию на сжатие и растяжение при комнатной температуре.

Большинство публикаций, касающихся свойств полилактида PLA, посвящено влиянию технологических параметров печати на характеристики готовых изделий [6–8].

Количество публикаций, посвященных термической обработке пластмасс, особенно касающихся полилактида PLA, обработанного по экструзионной аддитивной технологии, весьма ограничено. Среди известных можно упомянуть работы сотрудников Омского и Волгоградского государственных технических университетов [5, 9].

Зависимость прочностных свойств полилактида PLA от величины деформации определяли испытаниями на сжатие цилиндрических образцов высотой и диаметром 10 мм со степенью заполнения 25, 50, 75 и 100% (рис. 6–8). Каждой степени заполнения соответствовали три типа заполнения: треугольник, сетка и соты.



# ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Цена 2 600 руб.

Ян Гибсон, Давид Розен, Брент Стакер

## ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство

Перевод с англ. книги издательства «Springer»  
под ред. д.ф.-м.н., проф. И.В. Шишковского  
М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 648 с. ISBN 978-5-94836-447-6

### *Предисловие к русскому изданию*

Я был очень рад, когда услышал, что профессор Игорь Шишковский будет научным редактором русского издания нашей монографии. Обладая многолетним и богатым опытом в данной области, этот известный ученый и педагог сможет гарантировать как техническую точность, так и ясность изложения. Поскольку русский язык является одним из самых распространенных языков в мире, этот перевод позволит значительно расширить аудиторию, которая сможет впервые получить доступ к данной информации. Я надеюсь, что исследователи, студенты и преподаватели найдут эту книгу прекрасным дополнением к своей коллекции, и что она расширит их познания в быстро развивающихся областях аддитивных технологий.

Брент Стакер  
профессор, университет Луисвилля (Кентукки, США)

### *Содержание*

#### *Предисловие*

**Глава 1.** Введение и описание основных принципов  
**Глава 2.** Развитие технологий АП  
**Глава 3.** Общая последовательность процесса АП  
**Глава 4.** Процесс фотополимеризации в ванне  
**Глава 5.** Плавление порошков в сформированном слое  
**Глава 6.** Экструзионные системы  
**Глава 7.** Распыление материала методом струйной печати  
**Глава 8.** Распыление связующего для струйной печати  
**Глава 9.** Процессы ламинирования листовых (слоистых) материалов

**Глава 10.** Процессы направленного энерговклада  
**Глава 11.** Технологии прямой записи  
**Глава 12.** Преимущества бюджетных систем АП  
**Глава 13.** Руководство по выбору процесса  
**Глава 14.** Постобработка  
**Глава 15.** Задачи программного обеспечения в АП  
**Глава 16.** Прямое цифровое производство  
**Глава 17.** Проектирование для АП  
**Глава 18.** Быстрое изготовление инструмента  
**Глава 19.** Применения АП  
**Глава 20.** Возможности для бизнеса и будущее АП

**ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ:  
[www.technosfera.ru](http://www.technosfera.ru)**



### **Как заказать наши книги?**

По почте: 125319, Москва, а/я 91  
По телефону: (495) 234-01-10  
E-mail: [knigi@technosfera.ru](mailto:knigi@technosfera.ru)  
[sales@technosfera.ru](mailto:sales@technosfera.ru)

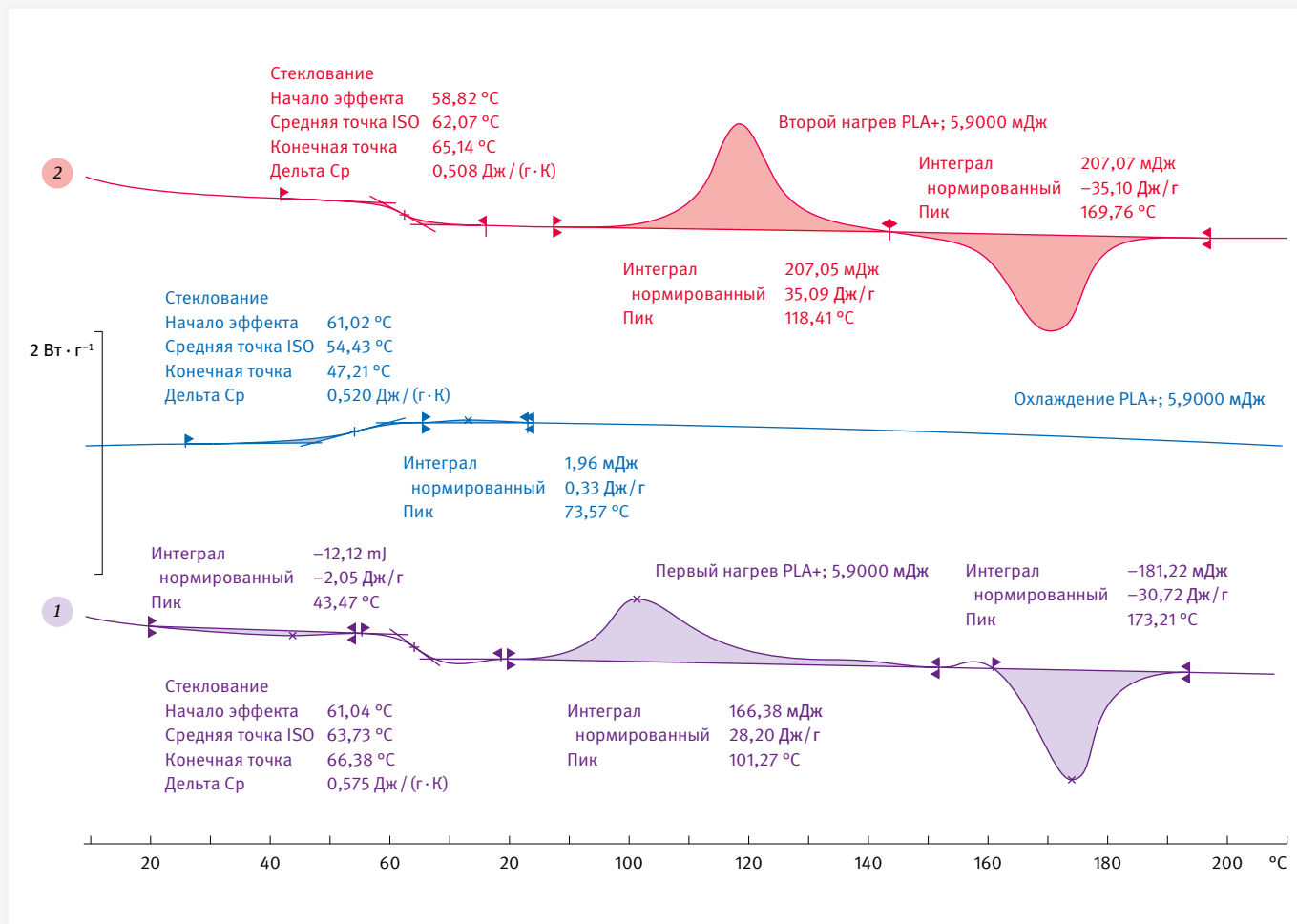


Рис. 5. Термограмма полилактида PLA

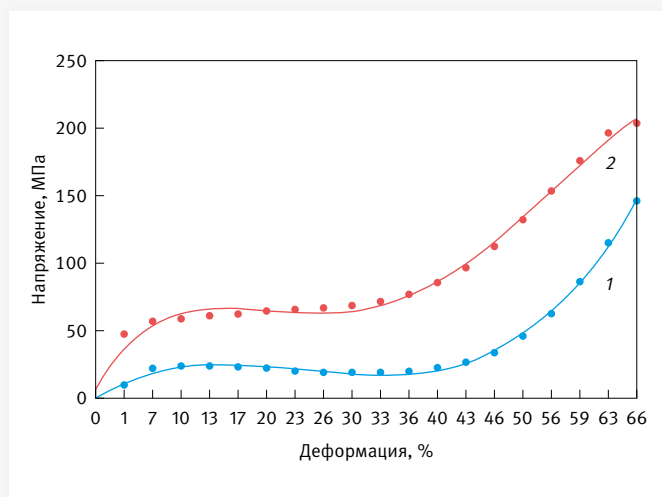


Рис. 6. Влияние закалки на напряжение текучести при 100% плотности заполнения образцов:  
1 – без закалки; 2 – с закалкой

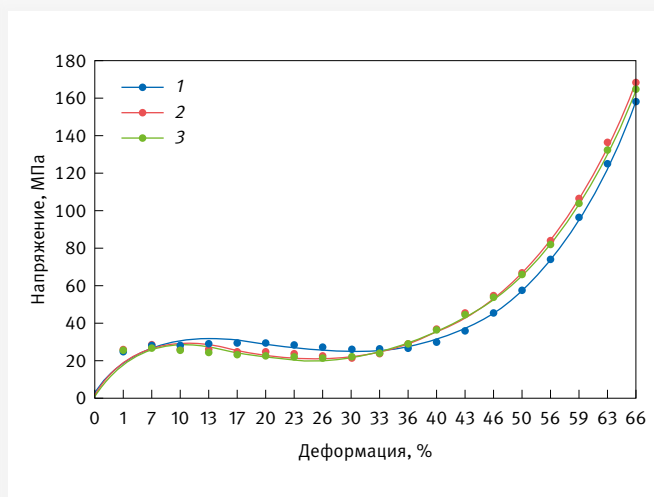


Рис. 7. Зависимость напряжения текучести от деформации при различных типах заполнения с плотностью заполнения 50%:  
1 – тип заполнения «соты», 2 – тип заполнения «треугольник», 3 – тип заполнения «сетка»

**06-08  
июня 2023**

Москва  
ЦВК «Экспоцентр»



При поддержке:

**АРСС**

Ассоциация развития  
стального строительства



Российский союз  
поставщиков  
металлопродукции

8-я Международная  
специализированная выставка

# Металло Конструкции 2023



12+

Место проведения:



Генеральный  
информационный партнер:

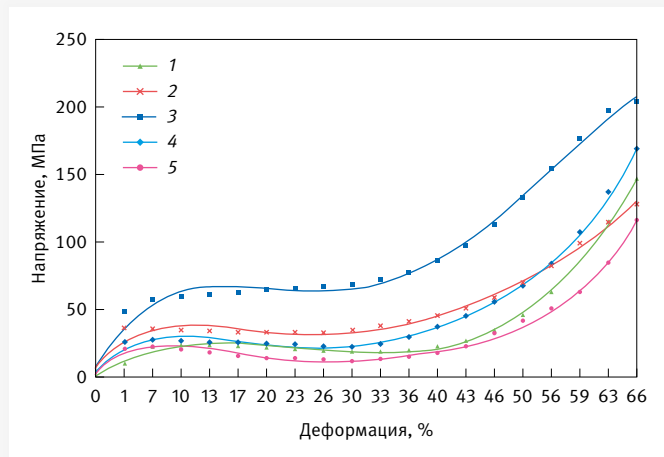


Организатор:



[www.mc-expo.ru](http://www.mc-expo.ru)

+7 (495) 734-99-66



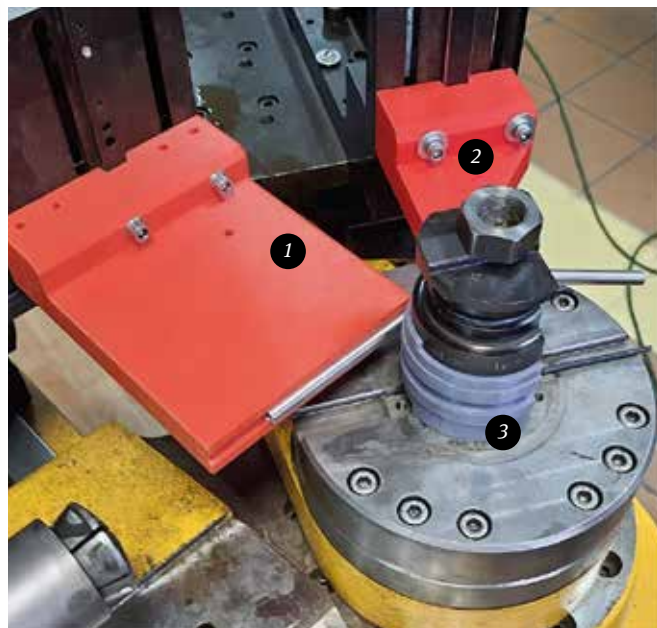
**Рис. 8.** Влияние плотности заполнения образцов с типом «сетка» на напряжение текучести: 1 – плотность заполнения 100%, 2 – плотность заполнения 75%, 3 – плотность заполнения 100% с закалкой, 4 – плотность заполнения 50%, 5 – плотность заполнения 25%

### Влияние температуры закалки образцов из PLA на прочностные свойства

Влияние температуры закалки на механические характеристики PLA изучалось на образцах на растяжение (см. рис. 4а) двух типов: выращенных горизонтально на рабочей платформе (0°) и вертикально относительно поверхности платформы (90°). Результаты испытаний при комнатной температуре показаны на рис. 9.

Полученные данные позволили установить следующее:

- образцы, выращенные горизонтально на рабочей платформе (0°), в целом обладают более высокими

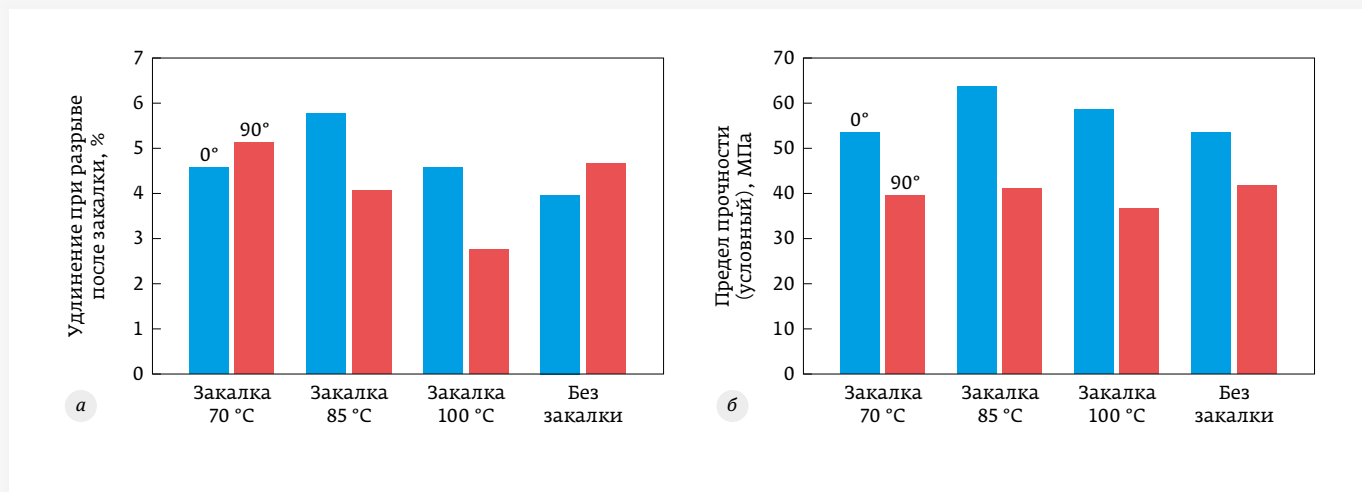


**Рис. 10.** Инструмент из полилактида PLA для гибки труб на трубогибочном автомате: 1 – задний прижим, 2 – передний прижим, 3 – ролик

характеристиками как по относительному удлинению, так и по прочности;

- наиболее высокими пластическими и прочностными свойствами обладают образцы, закаленные при 85 °С.

Учитывая, что наиболее важным фактором, влияющим на стойкость формообразующего инструмента, является его прочность, то наиболее целесообразной температурой закалки является 85 °С.



**Рис. 9.** Механические характеристики образцов из полилактида PLA, закаленных при температурах 70, 85 и 100 °С: а – относительное удлинение, %; б – прочность на растяжение, МПа

Изучение износа инструмента при формообразовании серийных трубных заготовок методом гибки показало, что стойкость переднего прижима (рис. 10), как наиболее нагруженного инструмента, изготовленного из полилактида PLA с последующей закалкой, увеличивается на 35–40%. Стойкость заднего прижима и ролика была удовлетворительной, и они термообработке не подвергались.

## Выводы

1. На основании проведенных исследований свойств образцов из полилактида PLA был выбран тип заполнения, изготовлен инструмент и подвергнут последующей закалке, что позволило повысить стойкость наиболее нагруженного инструмента на 35–40%.
2. Исследование влияния температуры закалки образцов из PLA на свойства при испытаниях на растяжение позволило установить, что наиболее высокими прочностными свойствами обладают образцы, закаленные при 85 °С со следующими режимами:
  - а) загрузка образцов в сушильный шкаф, предварительно нагретый до требуемой температуры;
  - б) выдержка образцов при назначенной температуре в течение  $20 \pm 2$  мин;
  - в) охлаждение образцов до комнатной (20–25 °С) температуры в сушильном шкафу;
  - г) двукратный повтор операций а–с.
3. Закалка образцов со 100%-ным заполнением при температуре 70 °С повышает напряжение текучести до 50%.
4. При типе заполнения «сетка» на напряжение текучести оказывает влияние плотность заполнения. При заполнении 75% напряжение текучести близко по свойствам к образцу со 100%-ным заполнением. Образцы с заполнением 50 и 25% имеют прочностные свойства на 10–20% ниже.
5. При типе заполнения «соты» напряжение текучести меньше зависит от плотности заполнения, различие составляет 7–15%.
6. Влияние плотности заполнения при типе «треугольник» близко типу «сетка», но следует отметить, что при плотности заполнения 75% прочностные свойства образца выше, чем у образца со 100%-ным заполнением.
7. Следует отметить весьма незначительное влияние типа заполнения (соты, сетка, треугольник) при одинаковой плотности заполнения (25, 50, 75 и 100%). Различия в напряжении текучести не превышает 5–10%.

## Литература

1. **Бурлаков И. А., Мангасарян Г. А., Гладков Ю. А. и др.** Прогнозирование точностных параметров автоматизированного технологического процесса гибки труб ГТД сложной пространственной формы. Проблемы машиностроения

и надежности машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 4. С. 90–96.

2. **Корнилов В. А.** Совершенствование технологии многоколенной пространственной гибки труб проталкиванием на роликовой машине. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 2013, 105 с.
3. **Глазков А. В.** Технология холодной гибки труб методом продольного раскатывания // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование, 2012. 133–134 с.
4. ГОСТ 33693-2015 (ISO 20753). Пластмассы. Образцы для испытаний. Применяется с 01.01.2017. М.: Издательство стандартов.
5. **Машков Ю. К., Байбарацкая М. Ю., Григорьевский Б. В.** Конструкционные пластмассы и полимерные композиционные материалы: Учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. 129 с.
6. **Савченя А. А., Ермаков А. И.** Исследование влияния технологических параметров 3D-печати PLA-пластиком на механические характеристики изделий // Мировая экономика и бизнесадминистрирование малых и средних предприятий: материалы 16-го Междунар. науч. семинара, проводимого в рамках 18-й Междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике», г. Минск, 26 марта 2020 г. Минск: Право и экономика, 2020. С. 231–232.
7. **Долунц Г. В.**, студ.; рук. Л. Б. Маслов, доц., д. ф.-м. н. (ИГЭУ, г. Иваново) Определение физико-механических свойств пластика PLA. Энергия-2021. Материалы конференции. С. 94.
8. **Thiago R., Ferreira L. и др.** Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers. Composites Part B Engineering · May 2017. PP. 1–24.
9. **Чуваев И. А., Габельченко Н. И.** Термическая обработка 3D печатных изделий из пластмасс // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 6 (84). С. 70–75.

## Сведения об авторах

**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 кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», Московский политехнический университет

**Сапрыкин Борис Юрьевич** – старший преподаватель кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», Московский политехнический университет