МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПОЛШКОВ ПАВЕЛ АНАТОЛЬЕВИЧ

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИБКИ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ДИАМЕТРОМ 6-36 ММ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИБОЧНОГО ШАБЛОНА ИЗ ПОЛИЛАКТИДА

Специальность 2.5.7. – «Технологии и машины обработки давлением»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
Доктор технических наук, профессор
Бурлаков Игорь Андреевич

Москва – 2026

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.**

В машиностроении при разработке новых изделий, в частности, в авиастроении в больших количествах используются трубопроводы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т для обеспечения работы топливных, масляных, воздушных и других узлов. Трубопроводы работают в условиях сложного нагружения. Они испытывают действие высокого давления, пульсирующей нагрузки и гидравлических ударов, имеют сложную пространственную форму с большим количеством изгибов с различными радиусами и углами, для формообразования которых применяют специальные трубогибочные автоматы, управляемые с помощью ЧПУ. При автоматизированной гибке трубопроводов качество применяемого гибочного шаблона влияет на их геометрические параметры овальности и пружинения. Выбор гибочного шаблона зависит от наружного диаметра, толщины стенки, материала и радиуса гибки трубопровода. Гибочный шаблон для гибки трубопроводов традиционно изготавливается из инструментальной стали и имеет высокую трудоемкость. А при выпуске небольших партий изделий и для опытных работ целесообразно изготавливать инструмент с минимальными временными и материальными затратами. Поэтому не случайно, быстрое производство инструмента появилось в самом начале развития аддитивного производства, которое направленно на производство формообразующих инструментов, инструментальных вставок, эталонов (калибров), штампов и пресс-форм.

Одним из перспективных и малоизученных способов изготовления гибочного шаблона является экструзионная технология 3D-печати FDM (Fused Deposition Modeling), обеспечивающая снижений себестоимости, обеспечивающая сокращение сроков его изготовления.

Несмотря на широкое применение полимерных материалов при гибке трубопроводов, многие технические вопросы еще не решены. В частности, не решен вопрос повышения прочности полимерных материалов путем термической обработки, отсутствует понимание характера разрушения гибочного шаблона, изготовленного методом 3D-печати по технологии FDM, а также действующих на инструмент напряжений в процессе формообразования трубопроводов. Нет понимания стойкости полимерного гибочного шаблона и геометрических параметров трубопроводов после их гибки. Решение этих вопросов является актуальным.

Работа проводилась по заказу филиала АО «ОДК» «ОДК-Салют», - предприятие изготовитель газотурбинных двигателей полного цикла.

**Цель диссертационной работы**

Определение методов совершенствования процесса гибки криволинейных трубопроводов из стали 12Х18Н10Т с использованием гибочного шаблона из полилактида.

**Задачи исследования:**

1. Провести анализ современного состояния вопроса по применению полимерного гибочного шаблона для гибки трубопроводов, обосновать выбор материала, сформировать цель и задачи исследования.

2. Разработать методологию экспериментальных исследований механических свойств полилактида, изготовления образцов, гибочного шаблона и выбор оборудования для проведения исследований.

3. Теоретически обосновать возможность применения гибочного шаблона из полилактида для гибки трубопроводов, выполнив моделирование напряжённо-деформированного состояния в инструменте и заготовке, определить критерии разрушения полимера и методов повышения его прочности.

4. Экспериментально определить прочностные и деформационные характеристики полилактида в зависимости от угла печати, толщины слоя и температуры термической обработки, а также оценить влияние конструкции гибочного шаблона на овальность и пружинение трубопроводов.

5. Выполнить анализ экспериментальных и расчётных данных процесса гибки трубопроводов, установить рациональные параметры конструкции и 3D-печати гибочного шаблона, обеспечивающие стабильность геометрических параметров изделий.

6. Оценить эффективность разработанной технологии изготовления гибочного шаблона, включая сокращение сроков его изготовления и снижение себестоимости.

**Объект исследования**: гибка криволинейных участков трубопроводов малого диаметра.

**Предмет исследования:** гибочный шаблон, изготовленный из полимерного материала по технологии FDM.

**Научная новизна работы:**

1. Определены прочностные характеристики полилактида от величины деформации путем испытания образцов на сжатие и растяжение, необходимые для моделирования процесса гибки трубопроводов и определения напряжений в полимерном гибочном шаблоне, составляющее 55 МПа и 200 МПа при растяжении и сжатии соответственно.

2. Найдены аналитические зависимости напряженно-деформированного состояния гибочного шаблона из полилактида, обеспечивающие возможность его применения для анализа процесса гибки трубопроводов.

3. Разработана новая теоретическая модель поперечно-изотропного разрушения материала полилактид на основе предположения о поперечной изотропии.

4. Найдены аналитические зависимости, позволяющие прогнозировать овальность и угол пружинения криволинейных трубопроводов при использовании гибочного шаблона из полилактида.

5. Определена рациональная ориентация слоев печати гибочного шаблона в зависимости от угла гибки (45°,90° и 135°) трубопроводов, составляющая 23°, 45° и 67°, соответственно.

**Теоретическая значимость работы**

1. Определен уровень растягивающих и сжимающих напряжений, составляющий от -40 МПа до 50 МПа, возникающих в гибочном шаблоне из полилактида при гибке трубопроводов.

2. Найдены величины напряжений текучести полилактида при растяжении и сжатии в зависимости от деформации, определяющие стойкость гибочного шаблона.

3. Установлена зависимость для оценки влияния относительной овальности от угла гибки трубопроводов диаметром 6, 12, 18, 24 и 28 мм.

**Практическая значимость работы**

1. Сокращены сроки изготовления трубопроводов за счет применения гибочного шаблона из полилактида взамен применения металлического инструмента в 4-5 раз и исключено образование дефектов в виде вмятин и задиров при изготовлении серийной партии с 1500 криволинейных участков.

2. Разработана методика расчета технологических режимов изготовления гибочного шаблона из полилактида экструзионным методом 3D-печати по технологии FDM, обосновывающая рациональное расположение модели шаблона под необходимым углом печати.

3. Снижена трудоемкость изготовления гибочного шаблона из полилактида методом 3D-печати по технологии FDM на 73% по сравнению с применением методов механической обработки металлического шаблона за счет снижения количества технологических операций и номенклатуры необходимого оборудования.

4. Установлен рациональный режим термической обработки после 3D-печати 85° в течении 60 минут гибочного шаблона после 3D-печати по технологии FDM. Термическая обработка обеспечивает повышение прочности гибочного шаблона на 18-20%, а заполнение 100% по сравнению с 50% повышает предел текучести полилактида до 23%.

5. Разработаны аналитические зависимости**,** позволяющие прогнозировать овальность поперечного сечения и угол пружинения криволинейных трубопроводов при гибке полимерным гибочным шаблоном для обеспечения требуемой точности готовых изделий.

**Методы исследования**

Создание 3D-моделей гибочного шаблона при помощи системы автоматизированного проектирования NX 12. Процесс гибки трубопроводов моделировали методом конечных элементов (МКЭ) в прогррмме QForm. Расчет прочностных свойств осуществляли в программе T-Flex.

Образцы для механических испытаний и гибочный шаблон для гибки трубопроводов изготавливались на 3D-принтере мод. Raise3D Pro2 Plus из материала полилактид. При выполнении работы применяли апробированные методы исследования: механические испытания на сжатие и растяжение на испытательных машинах мод. LFM50 и мод. Tinius Olsen 50ST, структура полилактида исследовалась в меридиональной плоскости на микроскопе мод. ZEISS «Axiovert 40 MAT» с увеличением x50, x100, x200 и x500. Термообработку проводили в сушильном шкафу мод. «СНОЛ». Испытания по определению термограмм полилактида проводили на оборудовании компании «Mettler Toledo».

Гибку трубопроводов из стали 12Х18Н10Т диаметром 6, 12, 18, 24, 28 и 36 мм толщиной стенки 1 мм проводили на трубогибочном автомате модели мод. SILFAX SE 50L/R на угол гиба 45º, 90º и 135º при помощи гибочного шаблона из

полилактида. Контроль геометрических параметров гнутых трубопроводов осуществляли с помощью, автоматизированной оптической измерительной системы мод. «TubeInspect» фирмы «AICON». Точность измерения составляла ± 0,1 мм. На каждую точку исследования было использовано по три трубопровода.

**Положения, выносимые на защиту**:

1. Установление угла разрушения 57±5° в материале полилактид при переходе от межслойного к внутрислойному разрушению под действием растягивающих напряжений.

2. Результаты анализа напряженно-деформированного состояния модели гибочного шаблона для гибки трубопроводов диаметром 18 мм и толщиной стенки 1 мм на основе вычислений методом конечных элементов.

3. Повышение стойкости гибочного шаблона из полилактида до 200% путем рационального формирования слоев печати и толщины слоя.

4. Способ повышения прочностных характеристик полилактида на 18-20% путем применения одноступенчатой термической обработки при 85°С в течение 60 минут и остывании в печи после 3D-печати гибочного шаблона по технологии FDM.

**Достоверность результатов,** представленных в диссертационной работе, подтверждается применением современного аттестованного испытательного и металлографического оборудования, специализированных станков и методов определения температурно-скоростных параметров в процессе гибки трубопроводов из стали 12Х18Н10Т, а также современными программами конечно-элементного численного моделирования для анализа процессов. Основные результаты моделирования подтверждаются экспериментальными данными.

**Апробация результатов работы**

Основные положения диссертационной работы были представлены на всероссийской научно-техническая конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации», приуроченной к 65-летию доктора технически наук, профессора Яковлева С.С. (Тула, 2022); Научно-практической конференции «Чернышёвские чтения 2023» (Москва, 2023), грамота за лучший доклад; всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» (Тула, 2023); конференции «Внедрение аддитивных технологий для получения бизнес-эффектов» (Москва, 2024); всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» (Тула, 2024); «XXII Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского» (Москва, 2025); научно-технической конференции «Климовские чтения. Перспективные направления развития авиадвигателестроения» (Санкт-Петербург, 2025).

**Личный вклад автора.** Диссертант принимал непосредственное участие в обсуждении и постановке цели и задач работы, в экспериментах по определению механических свойств полилактида и способа их повышения, гибке трубопроводов на автоматизированном станке с ЧПУ при помощи гибочного инструмента, изготовленного методом 3D-печати, а также в анализе,

обработке и интерпретации полученных данных, включая результаты конечно-элементного моделирования.

Автором разработана теоретическая модель поперечно-изотропного разрушения полилактида с использованием известных формул пластичности, которые были адаптированы к условиям процесса деформации гибочного шаблона. Диссертант участвовал в подготовке публикаций и представил наиболее значимые результаты на российских отраслевых и научно-технических конференциях.

**Реализация работы.** Результаты выполненных исследований внедрены в серийное и опытное производство трубопроводов на автоматизированном станке с ЧПУ, что подтверждено 2-мя актами внедрения гибочного шаблона из полилактида. Разработана технологическая инструкция №05.65.013 «по гибке труб на трубогибочном станке с ЧПУ фирмы SILFAX модели SE50L\R». Разработана технологическая инструкция №05.85.109 «Послойное наплавление экструзионным методом FDM на 3D-принтере Raise3D Pro2 Plus».

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 9 научных трудов, в том числе 5 статей в рецензируемом издании из перечня ВАК.

**Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, приложения. Текст диссертации изложен на 137 страницах машинописного текста, иллюстрирована 50 рисунком, содержит 22 таблиц. Библиографический список включает 117 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выполненной работы, её научная новизна, теоретическая и практическая значимости, а также перспективы применения на предприятии.

**В первой главе** дан обзор научных публикаций и исследований, посвященных применению полимерного инструмента в обработке металлов давлением, композиционных материалов для оснастки и в целом развитии сферы аддитивных технологий и полимерных материалов.

Большой вклад в развитие технологий гибки трубопроводов сделан такими учеными, как А.И. Гальперин, Ю. Н. Алексеев, М. Н. Горбунов, Б. С. Дмитриев, М. Я. Заславский, Е. Н. Мошнин, А.А.Ильюшин, В. М. Орлов, В. С. Туркин, Самусев С.В., Нестеров Г.В., Бобылев А.В., Козлов А.В., Максимов С.П., Халиулин Е.В., Вдовин С.И., Зайцев А.И., Лунин К.С., Muhammad A.K., Manish D., Staudendahl D.

Развитию применения аддитивных технологий и обработке металлов давлением с использованием полимерного инструмента способствовали такие ученые, как Д.В. Сухорукова, С.А. Типалин, Б.Ю. Сапрыкин, И.Ю. Кононов, Л.Б. Аксенов, В.А. Ходырева, В.А. Лобов, Е.О. Фролова, Д.Н. Шустригин, А.Н. Лопатин, И.Д. Зверков, О.П. Годунов. Из зарубежных публикаций следует отменить работы L. Langstadtler, A.P. Intemann, M. Herrmann, N. Asnafi, J.Rajalampi, D. Aspenberg, G. Schuh, G.Bergweiler, P. Bickendorf.

Проанализированы требования к трубопроводам, используемым в машиностроительной отрасли. Рассмотрены недостатки традиционного метода изготовления гибочного шаблона для гибки трубопроводов. Проведен анализ

полимерных материалов для аддитивного производства оснастки. Представлен способ изготовления полимерного гибочного шаблона методом аддитивных технологий для операции гибки трубопроводов.

На основании обзора отечественных и зарубежных литературных данных сформулированы цель и задачи исследования.

**Во второй главе** представлена методика исследования гибки трубопроводов на основе применения гибочного шаблона из полилактида.

*Исследования* выполнялись с применением бесшовных трубопроводов диаметром от 6 до 36 мм и толщиной стенки 1 мм из стали марки 12Х18Н10Т, химический состав которой (% (мас.): Fe – осн., Cr – 18, Ni – 10, Ti – 0.7), поставляемые по ГОСТ 9941-2022.

*Материалом для изготовления гибочного шаблона* применялся полилактид. Полилактид (ПЛА) – это термопластичный полиэфир, мономером которого является молочная кислота. Имеет температуру плавления 170-180 ºС и температуру стеклования 60 ºС. Относительное удлинение при разрыве 12%, предел прочности на разрыв 60 МПа, предел прочности на сжатие 70 МПа. Модуль упругости 2102 МПа, плотность 1,23-1,25 г/см$^3$ и усадка после печати 0,2%.

*Проектирование и компьютерное моделирование*. 3D-модели гибочного шаблона создавали при помощи системы автоматизированного проектирования NX12. Расчет прочностных свойств осуществляли в программе T-Flex.

Процесс гибки трубопроводов моделировали с применением метода конечных элементов в программе QForm со следующими исходными данными: в качестве материала трубопровода была применена сталь 12Х18Н10Т. Свойства стали для расчет взяты из базы деформируемы материалов: плотность 7776 кг/м3, теплопроводность 38 Вт/мК, теплоемкость 499 Дж/(кг·К), модуль Юнга 210 000 МПа, материал выглаживателя – бронза БрАЖ10-10-4; объем трубопровода неизменный; напряженное состояние трехмерное (3D расчет); температура гибки – 20 °С; фактор трения – 0.3, трение по закону Леванова; тепловые процессы не учитываются. В виду того, что толщина стенки трубопровода составляет 1 мм, сетка конечных элементов была принудительно измельчена. Гибочный шаблон, прижим передний и прижим задний из ПЛА: Модуль Юнга 780 МПа, коэффициент Пуассона 0,39, предел прочности 65 МПа, параметр упрочнения 0,1, плотность 1290 кг/м3, теплопроводность 0,13 Вт/мК, теплоемкость 1800 Дж/(кг·К).

Образцы для механических испытаний согласно ГОСТ 33693-2015 и гибочный шаблон для гибки трубопроводов изготавливали на 3D-принтере Raise3D Pro2 Plus из ПЛА. При выполнении работы применяли апробированные методы исследования: механические испытания на сжатие и растяжение на испытательных машинах мод. LFM50 и мод. Tinius Olsen 50ST, структура полилактида исследовалась в меридиональной плоскости на микроскопе мод. ZEISS «Axiovert 40 MAT» с увеличением 50×, 100×, 200× и 500×. Образцы термообрабатывали в сушильном шкафу мод. «СНОЛ». Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) полилактида проводилась на оборудовании компании мод. «Mettler Toledo».

*Экспериментальные работы* по гибке трубопроводов проводили на трубогибочном автомате мод. SILFAX SE 50L/R. Контроль геометрических параметров гнутых трубопроводов осуществляли с помощью, автоматизированной оптической измерительной системы мод. TubeInspect фирмы «AICON». Точность измерения составляла ± 0,1 мм. На каждую точку исследования было использовано три трубных заготовки из разных поставляемых партий материала.

Определение овальности в зоне гибки согласно ГОСТ 494-2014 определялась как разность наибольшего и наименьшего значений диаметров ΔD деленная на диаметр трубы D, измеренных в одном поперечном сечении, перпендикулярном к оси трубы. Для измерения наибольшего и наименьшего значений диаметров применяли электронный штангенциркуль с ценой деления 0,01 мм. Для определения каждого диаметрального размера в зоне гибки использовали три заготовки и рассчитывали среднее значение овальности.

Пружинение углов гибки определялась как разница между максимальным и минимальным значениями угла трех изогнутых заготовок при одинаковых технологических параметрах.

**В третьей главе** представлены теоретические аспекты и результаты моделирования процесса гибки трубопроводов в программе QForm и T-Flex.

При моделировании требовалось определить диапазон напряжений, возникающих в полимерном гибочном шаблоне и трубопроводе, а также оценить стабильность овальности и пружинения в зависимости от их диаметров и углов гибки.

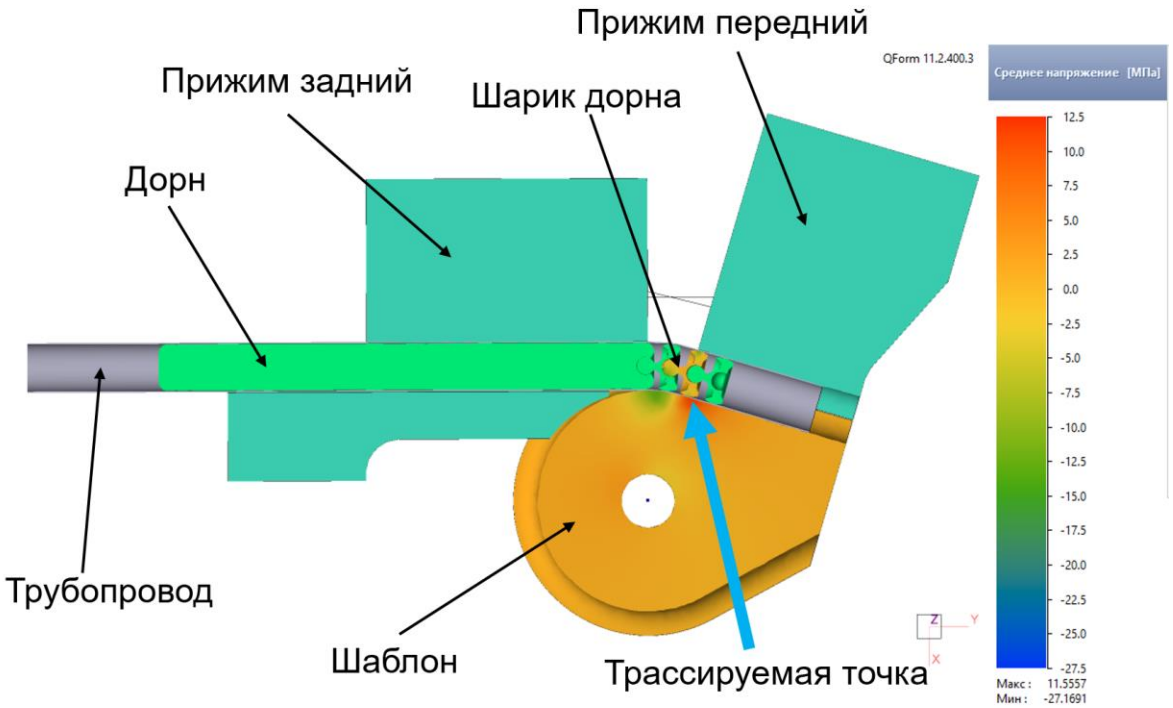
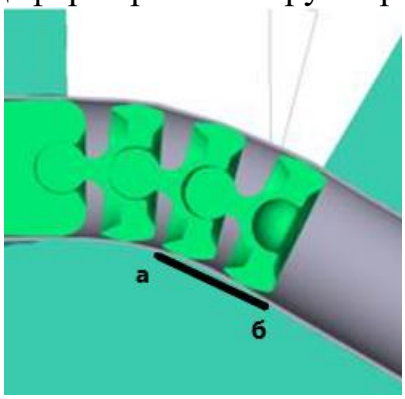
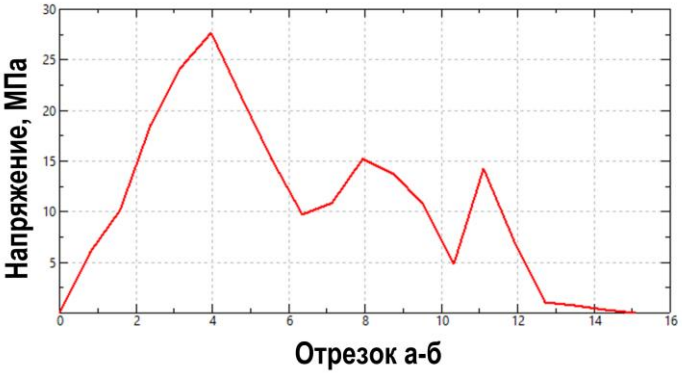



Рисунок 1 – Определение напряженно-деформируемого состояния

Наиболее нагруженными элементами при гибке трубопроводов являются гибочный шаблон и сам трубопровод. Анализ действующих на гибочный шаблон сил (рисунок 2) на выделенном отрезке «а – б» показал, что максимальное

давление на гибочный шаблон составляло 28 МПа при максимальной силе деформирования трубопровода 0,6 кН (рисунок 2).



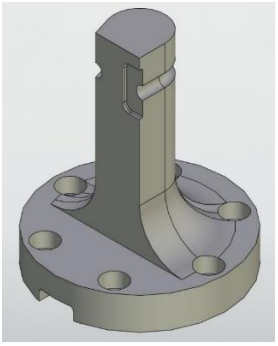



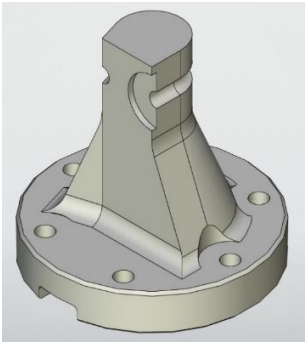

1 2

Рисунок 2 – Давление (МПа) на гибочный шаблон на отрезке *а-б* при максимальной деформирующей силе (время деформации 4,5 сек);
1 – схема гибки трубопровода; 2 – график напряжения на отрезке а-б

С учетом значительных действующих на гибочный шаблон сил был выполнен сравнительный анализ влияния материала и геометрических параметров шаблона на его деформацию, которая определяет точность гнутых трубопроводов, с применением программного комплекса T-Flex. При этом решалась задача о статической прочности конструкции гибочного шаблона. Сравнение было выполнено для шаблонов двух типов (рисунок 3):

– шаблон исходной конструкции (рисунок 3, а), геометрия которого разработана для изготовления из металла;
– шаблон повышенной прочности (рисунок 3, б), усиленная геометрия дополнительными ребрами для изготовления из полилактида.





а б

Рисунок 3 – Гибочные шаблоны
а – шаблон исходной конструкции, б – шаблон повышенной прочности

При расчете статической прочности гибочного шаблона в программе T-Flex для каждого из шаблонов создавалась расчетная модель; геометрический образ замещался его конечно-элементной сеткой.

Результаты моделирования статической прочности гибочного шаблона в программе T-Flex показаны на рисунке 4.

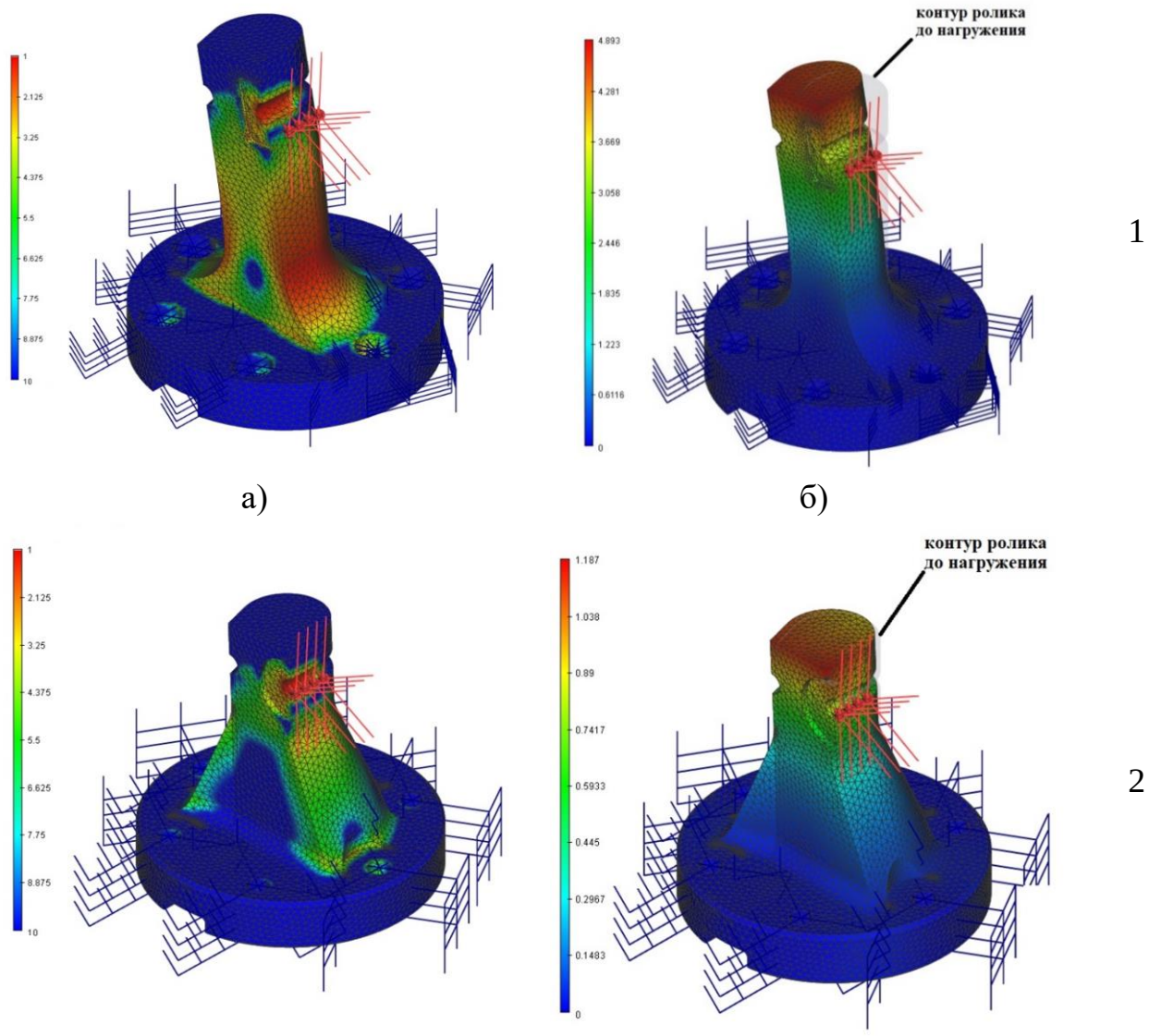



Рисунок 4 – Статическая прочности в программе T-Flex

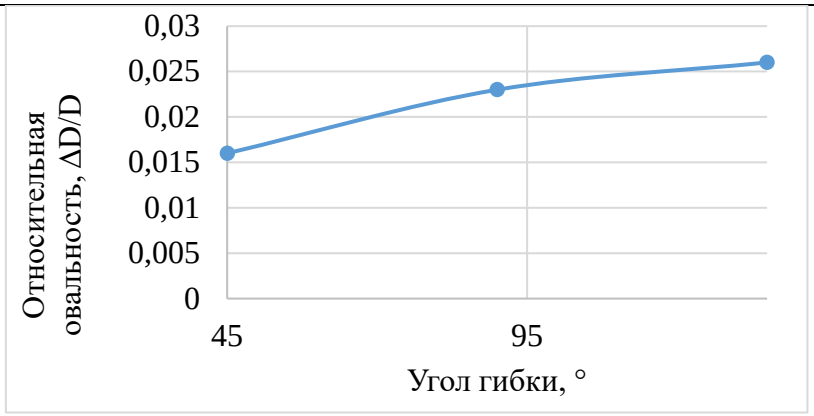
Анализ: а) и в) – коэффициент запаса прочности по эквивалентным напряжениям; б) и г) – перемещение

1(а, б) – шаблон исходной конструкции, 2(в, г) – шаблон повышенной прочности

Результаты моделирования показывают, что при одинаково приложенном напряжении в 65 МПа на ручей шаблонов б) и г) изготовленные по технологии FDM из полилактида имеют разные модули перемещения. Конструкция шаблона б) имеет больший модуль перемещений, составляющий 4,8 мм.

Для прогнозирования точности изготавливаемых трубопроводов большое значение имеет величина пружинения после операции гибки. В частности, при анализе пружинения трубопровода в программе QForm диаметром 18 мм и толщиной стенки 1 мм на угол 110° ее величина составила 2° 40’.

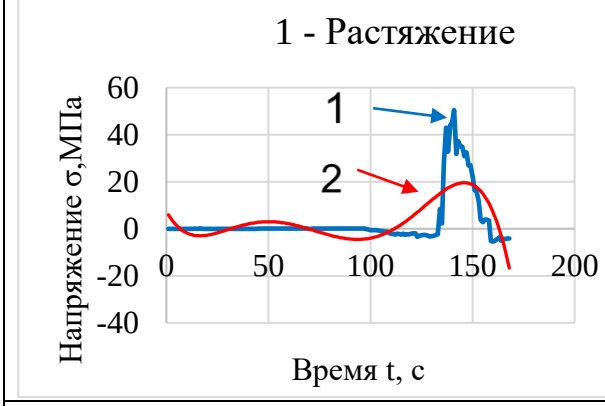
Величина относительной овальности трубопроводов диаметром 18 мм и толщиной стенки 1 мм определялась методом моделирования в программе QForm при гибке на 45º, 90º и 135º. Результаты моделирования приведены на рисунке 5.

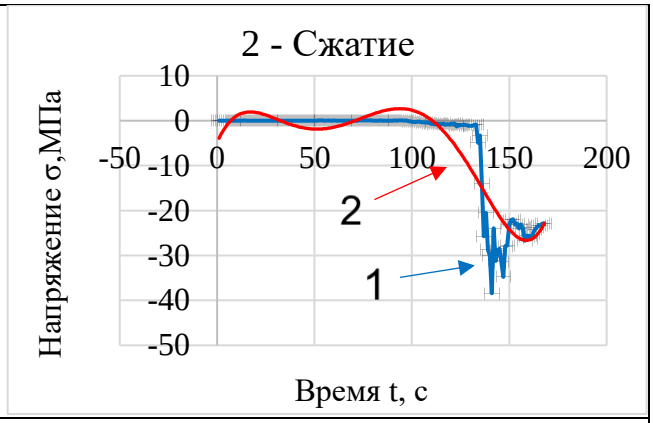



| 45° | 90° | 135° |
|---|---|---|
| 0,016 | 0,023 | 0,026 |

Рисунок 5 – Результаты расчета относительной овальности

Исследование напряженно-деформированного состояния гибочного инструмента при гибке трубопровода из стали 12Х18Н10Т длинной 400 мм, диаметром 18 мм и толщиной стенки 1 мм на угол 135° в программе QForm позволило выявить, что гибочный шаблон испытывает как сжимающие, так и растягивающие напряжения (рисунок 6), величина которых не превышает предел прочности полилактида.




| 1 - Расчетная диаграмма напряжения | 2 - Линия тренда |
|---|---|

Рисунок 6 – Напряжение в трассируемых точках ролика

**Виды разрушения полилактида**

В ходе этого исследования было установлено, что в образце из полимерного материала ПЛА для 3D-печати изготовленного методом послойного наплавления FDM под действием растягивающих нагрузок возникает два различных вида разрушения и особый угол разрушения, являющийся границей между этими двумя видами. Для исследований механических свойств материала ПЛА для 3D-печати FDM, была измерена и проанализирована прочность на разрыв при различных углах печати и толщине слоя печати. Разработана новая теоретическая модель поперечно-изотропного разрушения с раздельными режимами для прогнозирования предела прочности на разрыв и угла разрушения материала ПЛА для 3D-печати FDM на основе предположения о поперечной изотропии. В результате предложены два вида разрушения ПЛА. Межслойное разрушение ПЛА обычно происходит при малых углах печати, тогда как внутрислойное разрушение, как правило, наблюдается при больших углах печати (рисунок 7). Для условий перехода между этими

механизмами разрушения необходимо установить критический угол разрушения $\theta$ ПЛА.

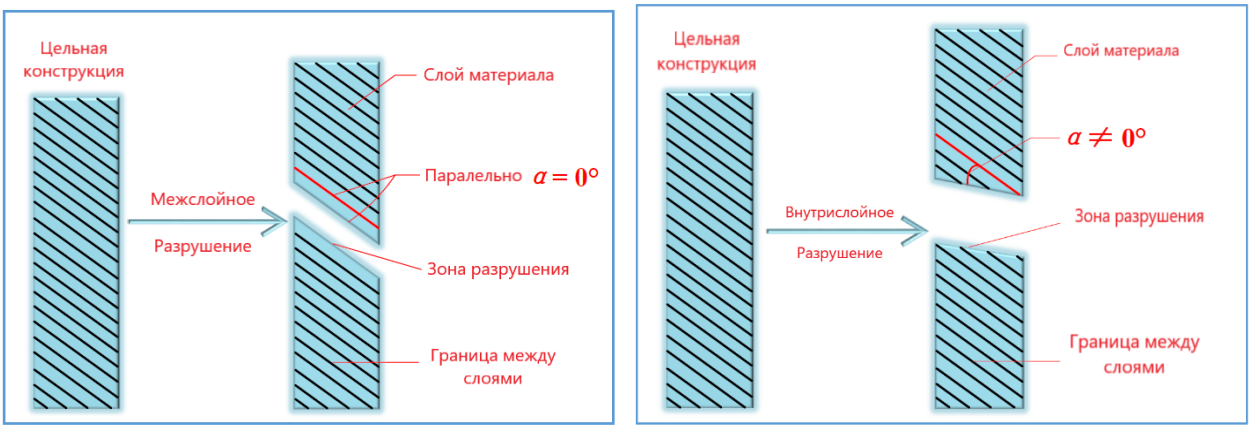



Рисунок 7 – Характер разрушения полилактида

Полученные данные по расчетному углу разрушения полилактида позволят прогнозировать разрушение инструмента в самых нагруженных местах при гибке трубопроводов (таблица 2).

- $\sigma_{zmax}$ – максимальное значение, МПа $\sigma_z$ – межслоевая прочность на разрыв в направлении, перпендикулярном к слоям материала, МПа.
- $\tau_{nnmax}$ – максимальное значение, МПа $\tau_{nn}$ – внутрислоевая прочность на разрыв в поперечно изотропных слоях материала, МПа.
- $\sigma_{nzmax}$ – максимальное значение, МПа $\sigma_{nz}$ – прочность на сдвиг в плоскости, перпендикулярной слою материала (продольный сдвиг), МПа.
- $\tau_{nxmax}$ – максимальное значение, МПа $\tau_{nx}$ – прочность на сдвиг в плоскости, параллельной слою материала (поперечный сдвиг), МПа.
- $\alpha$ – угол между осью слоя и осью z, °.

Межслойный режим разрушения:

$$\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{zmax}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xz}}{\sigma_{nzmax}}\right)^2 = 1 \qquad (3.1)$$

Если на образец приложено только одноосное напряжение $\sigma$ то это приводит к межслойному разрушению.

$$\sigma_z = T_\alpha = \left[\frac{cos^4\alpha}{\sigma_{zmax}^2} + \frac{cos^2\alpha \cdot sin^2\alpha}{\sigma_{nzmax}^2}\right]^{-\frac{1}{2}} \qquad (3.2)$$

Внутрислойный режим разрушения:

$$\left(\frac{\sigma_x}{\tau_{nnmax}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xz}}{\tau_{nxmax}}\right)^2 = 1 \qquad (3.3)$$

Если на образец действует напряжение $\sigma$ под углом, то это приводит возникновению внутрислойного разрушения.

$$\tau_{nn} = T_{\alpha} = \left[\frac{sin^4\alpha}{\tau_{nnmax}^2} + \frac{sin^2\alpha \cdot cos^2\alpha}{\tau_{nxmax}^2}\right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

$$tan\theta = \sqrt{\frac{\tau_{nnmax}}{\sigma_{zmax}}} \quad (3.5)$$

Основываясь на приведенном выше теоретическом анализе и экспериментальных результатах, полученных в ходе данного исследования, можно сделать следующие выводы:

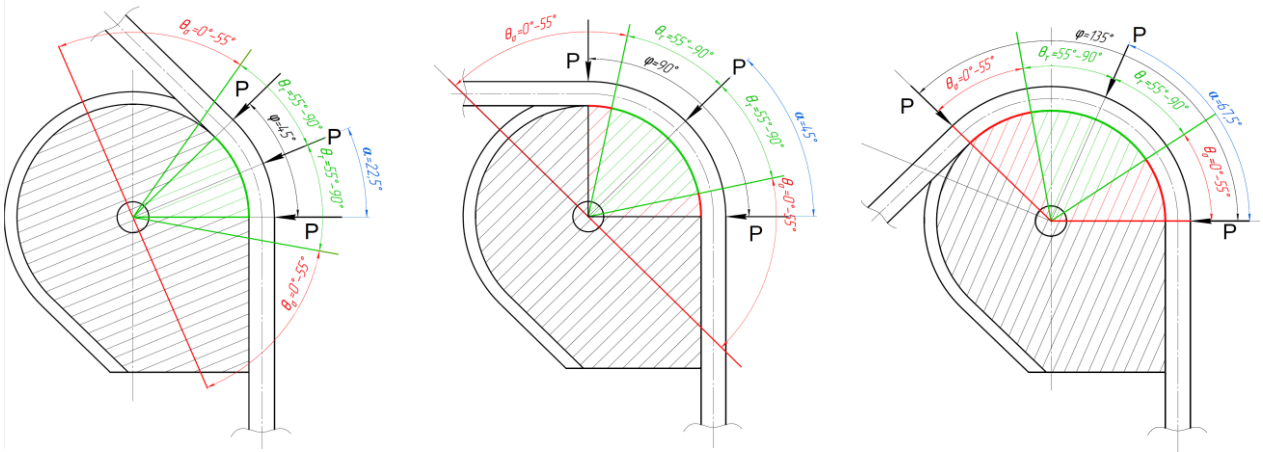
1. Когда $\theta \leq \alpha$, следует использовать межслойный режим разрушения в уравнении (1) или (2) для предсказания одномерной одноосной прочности на разрыв образцов в исследовании угла разрушения.
2. Когда $\theta > \alpha$, следует использовать внутрислойный режим разрушения в уравнении (3) или (4) для предсказания одномерной одноосной прочности на разрыв образцов в исследовании угла разрушения.

Зная реологические свойства полилактида и выражения угла разрушения $\theta$ (5) можно получить его расчетные значения. Значения угла разрушения $\theta$ в зависимости от толщины слоя представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Угол разрушения $\theta$ для полилактида

| Толщина слоя, мм | Расчетный угол, ° |
|---|---|
| 0,1 | 56 |
| 0,2 | 52 |
| 0,3 | 53 |

На основе определения расчетных углов разрушения $\theta$ была разработана конструкция гибочного шаблона с учетом формирования слоев при 3D-печати из материала ПЛА в зависимости от угла гибки трубопроводов (рисунок 8).




45° 90° 135°

Рисунок 8 – Ориентация слоев печати гибочного шаблона из полилактида в зависимости от угла гибки трубопроводов 45°,90° и 135°
α - угол ориентации слоев печати; θτ – зона повышенной прочности; $\theta_{\sigma}$ – зона пониженной прочности

Структурные изменения в термопластичных полимерах происходят в диапазоне между температурами плавления и стеклования, при этом меняется соотношение аморфной и кристаллической составляющей структуры. Для определения вида термической обработки было проведена дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) материала ПЛА. Как видно на термограмме (рисунок 9) структурные изменения в термопластичных полимерах происходят в диапазоне между температурами плавления (170 °С) и стеклования (60 °С), что, по всей видимости, меняет соотношение аморфной и кристаллической составляющих структуры.

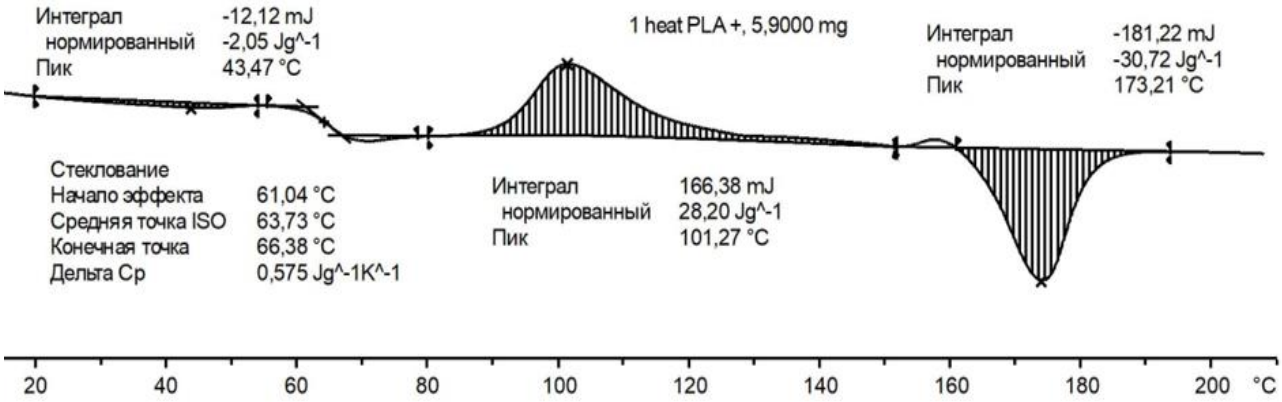


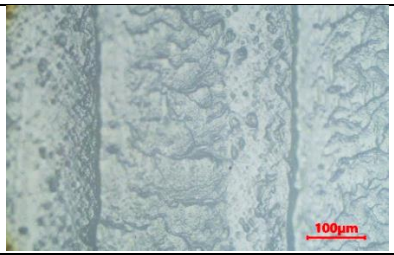
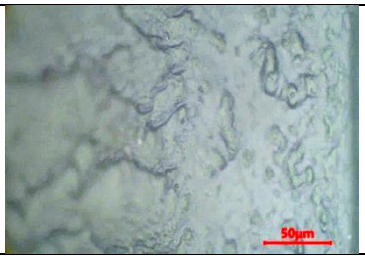

Рисунок 9 – Термограмма филамента полилактида

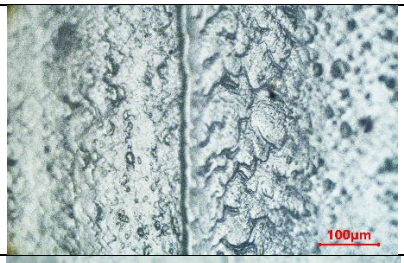
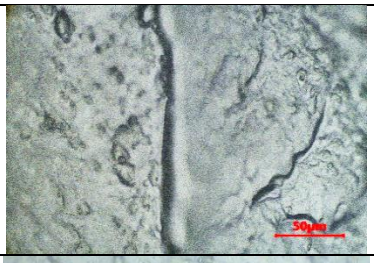
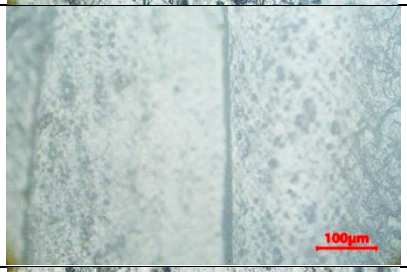
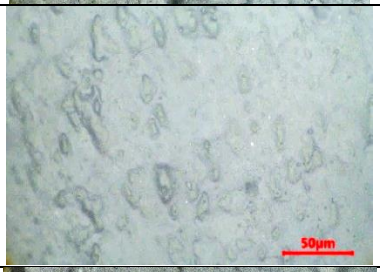
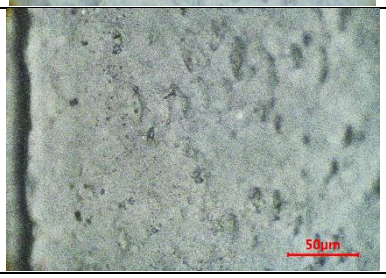
На основании ДСК и с учетом того факта, что при нагреве ПЛА на температуру выше 100 °С имеет место его значительная деформация, для исследования влияния термической обработки на структуру полимера были выбраны три температуры: 70, 85 и 100 °С. Выбранные значения термической обработки ПЛА позволяют поменять соотношение аморфной и кристаллической структуры.

**В четвертой главе** представлены экспериментальные данные по определению прочностных характеристик полилактида в зависимости от угла печати, толщины слоя и температуры термической обработки, а также представлена оценка влияния конструкции гибочного шаблона на овальность и пружинение трубопроводов при их гибке.

Образцы загружали в нагретую до требуемой температуры печь (70 °С, 85 °С и 100 °С), выдерживали в течение 60 минут и охлаждали вместе с печью до комнатной температуры (20 – 25 °С). Микроструктуры образцов до и после термической обработки показана на таблице 3.

Таблица 3 – Структура полилактида после термообработки (ТО)

| ТО | Увеличение 200 | Увеличение 500 |
|---|---|---|
| Без ТО |  |  |

| ТО | Увеличение 200 | Увеличение 500 |
|---|---|---|
| 75 °С |  |  |
| 85 °С |  |  |
| 100 °С |  |  |

Наиболее заметные структурные изменения ПЛА (рисунки 4.1 и 4.2) наблюдали после термической обработки при температуре Т = 85 °С с выдержкой в печи в течение 60 минут. В процессе термической обработки произошел рост кристаллических образований, способных повлиять на многие свойства полилактида, такие как плотность, предел прочности при растяжении и сжатии, что подтверждается исследованиями других авторов.

Предварительные работы показали, что наибольшую опасность разрушения инструмента представляют растягивающие напряжения. В связи с этим было принято решение провести дополнительное исследование образцов из полилактида на растяжение с целью установить характер разрушения.

Результаты квазистатических испытаний образцов (ГОСТ 33693-2015) из ПЛА, изготовленных по технологии FDM на 3D принтере Raise3D Pro2 Plus под семью различными углами печати 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° и 90° и тремя уровнями толщины печатного слоя 0,1 мм, 0,2 мм и 0,3 мм (таблица 5) позволили установить, что при угле печати 90° прочностные характеристики на 200% выше, чем при печати с углом 0°.

Таблица 5 – Матрица экспериментов по исследованию образцов ПЛА

| Высота слоя | Количество образцов при угле печати α, ° | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **0** | **15** | **30** | **45** | **60** | **75** | **90** |
| 0,1 | 6 | 6 | 6 | 5 | 8 | 7 | 8 |
| 0,2 | 7 | 6 | 5 | 11 | 6 | 7 | 6 |
| 0,3 | 7 | 5 | 7 | 5 | 6 | 5 | 5 |

Установлено минимальное влияние в пределах 5 – 10% на прочностные свойства толщины слоя при печати. Экспериментальные данные показали, что предел прочности на растяжение возрастает с увеличением угла печати или уменьшением толщины слоя печати (рисунок 10).

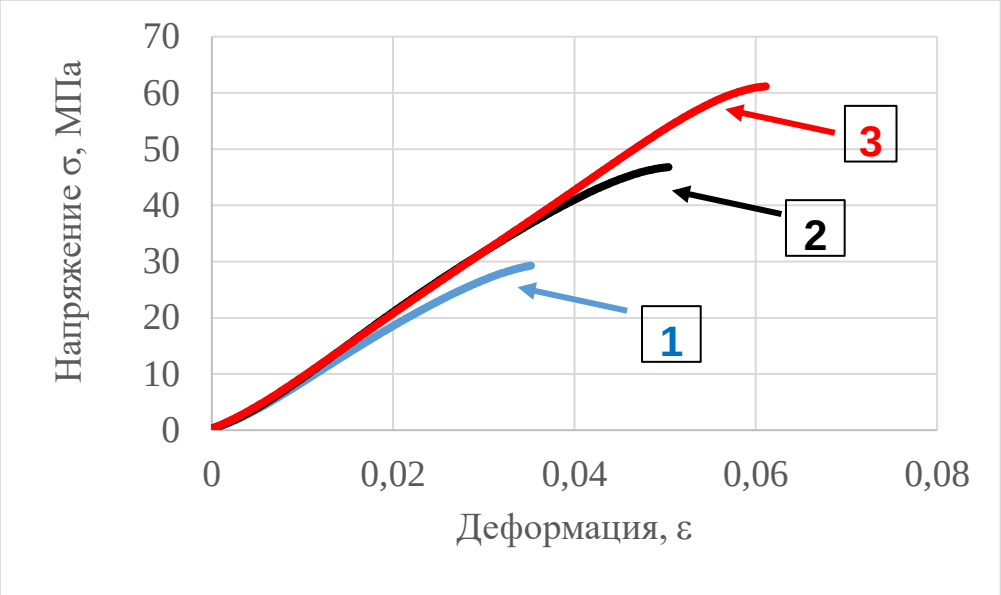
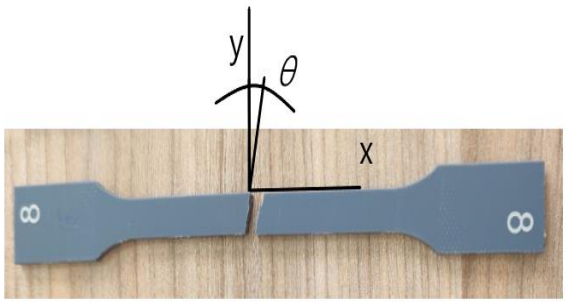



Рисунок 10 – Зависимость напряжения от деформации образцов из ПЛА с толщиной слоя печати 0,1 мм
1 – угол печати 0°; 2 – угол печати 45°; 3 – угол печати 90°

Экспериментальными исследованиями углов разрушения $\theta$ в зависимости от толщины слоя печати при углах печати образцов (ГОСТ 33693-2015) по технологии FDM установлено, что все случаи межслойного разрушения происходят, когда угол печати составляет от 0º до 45º, а внутрислойное разрушение происходит, когда углы печати составляю диапазон от 60º до 90º. Результаты замеров угла разрушения в зависимости от толщины слоя печати на образцах ПЛА представлены в таблице 6.

Таблица 6 - Экспериментальный угол разрушения $\theta$

| Образец ГОСТ 33693-2015 | Толщина слоя печати, мм | Экспериментальный угол разрушения $\theta$ для полилактида, º |
|---|---|---|
|   | 0,1 | 57 |
| | 0,2 | 55 |
| | 0,3 | 56 |

Найденные экспериментальным путем, угол разрушения $\theta$ и данные по характеру разрушения полилактида были использованы при разработке конструкции с повышенной прочностью гибочного шаблона (рисунок 11).



а б

Рисунок 11 – Гибочные шаблоны из ПЛА для гибки трубопроводов диаметром 6 мм из стали 12Х18Н10Т
а – исходная конструкция, б – ролик повышенной прочности

Для изучения овальности, возникающей при гибке трубопроводов из стали 12Х18Н10Т диаметром 6 мм и толщиной стенки 1 мм гибочным шаблоном из ПЛА на угол 45°, 90° и 135° было испытано по 10 единиц на каждый угол. Из полученных данных (рисунок 12) видно, что после гибки 3 – 4 первых заготовок наступает стабилизация геометрических параметров и далее овальность практически не изменяется. Все значения овальности на базе испытания 10 образцов находятся в 5% интервале достоверности.

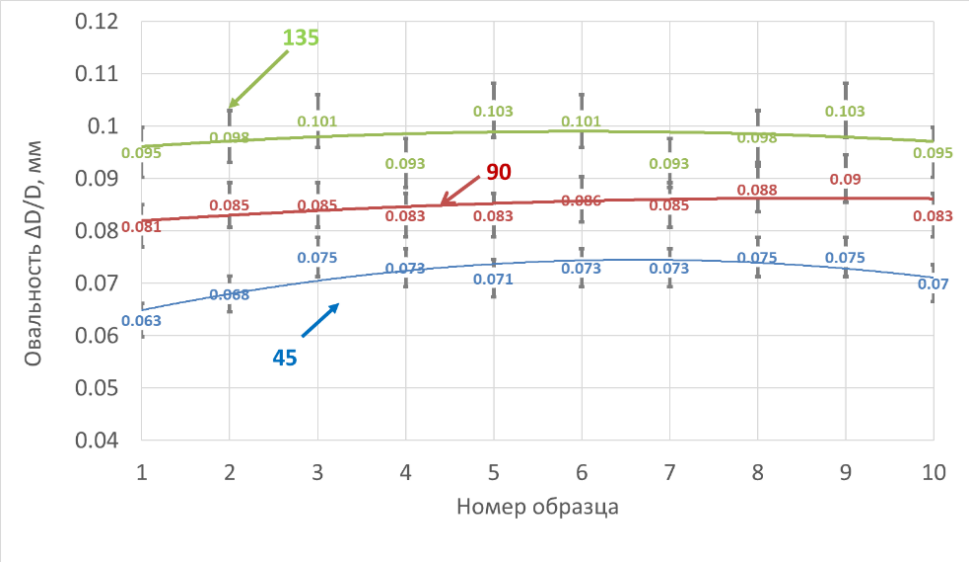



Рисунок 12 – Изменение относительной овальности ΔD/D в процессе гибки 10 трубопроводов диаметром 6 мм. 45°, 90° и 135° углы гибки

Большое влияние на овальность гнутых труб оказали геометрические параметры гибочного шаблона, изготовленного по технологии 3D-печати методом FDM из ПЛА. Испытание двух шаблонов различной конструкции (рисунок 12) показало, что использование гибочного шаблона повышенной прочности (рис.12 б), позволяет повысить его прочность, что дало возможность уменьшить овальность в 1-2 раза (таблица 7).

Таблица 7 – Величина овальности гнутой трубы диаметром 6 мм в зависимости от типа применяемого гибочного ролика.

| Ролик | Угол гибки, градусов | | |
|---|---|---|---|
| | 45 | 90 | 135 |
| 1 | 0,084 | 0,153 | 0,163 |
| 2 | 0,072 | 0,085 | 0,098 |

Определение овальности для трубопроводов диаметром от 6 до 28 мм и толщиной стенки 1 мм в зоне гибки выполнили согласно матрице экспериментов. Замеры овальности определялись как разность наибольшего и наименьшего значений диаметров ΔD, измеренных в одном поперечном сечении, перпендикулярном к оси трубы. Для определения каждого диаметрального размера использовали три заготовки и рассчитывали среднее значение овальности (рисунок 13).

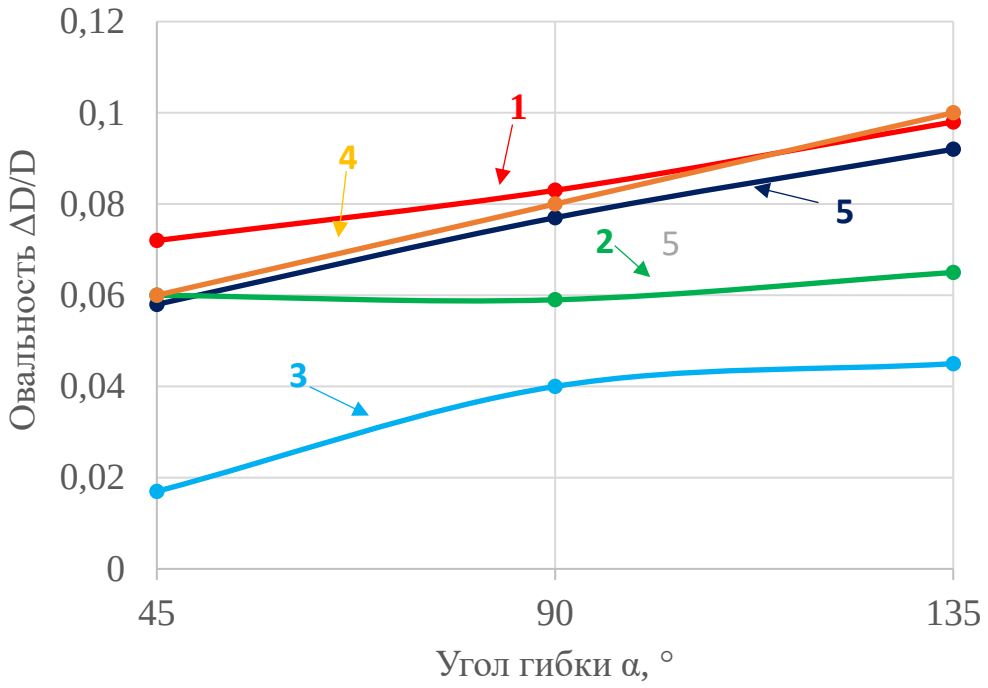



Рисунок 13 - Зависимость относительной овальности ΔD/D от угла гибки α
1 - 6 мм; 2 – 12 мм; 3 – 18 мм; 4 – 24 мм; 5 – 28 мм

В первую очередь на относительную овальность трубопроводов диаметром от 6 до 28 мм с толщиной стенки 1 мм из стали 12Х18Н10Т при гибке гибочным шаблоном из ПЛА влияет их диаметр. Общей тенденцией для всех диаметров трубопроводов является увеличение овальности от 0,02 до 0,1 с увеличением угла гибки от 45° до 135°.

Упругая деформация трубопроводов из стали 12Х18Н10Т характеризуется углом пружинения и существенно зависит от угла гибки. Наибольшей стабильностью к увеличению угла пружинения с увеличением угла гибки обладают трубы диаметром 18 - 28 мм (от 0,4° до 2,6°). Углы пружинения трубопроводов диаметром 6 и 12 мм примерно одинаковые и составляют 0,3° – 0,5° (рисунок 14).

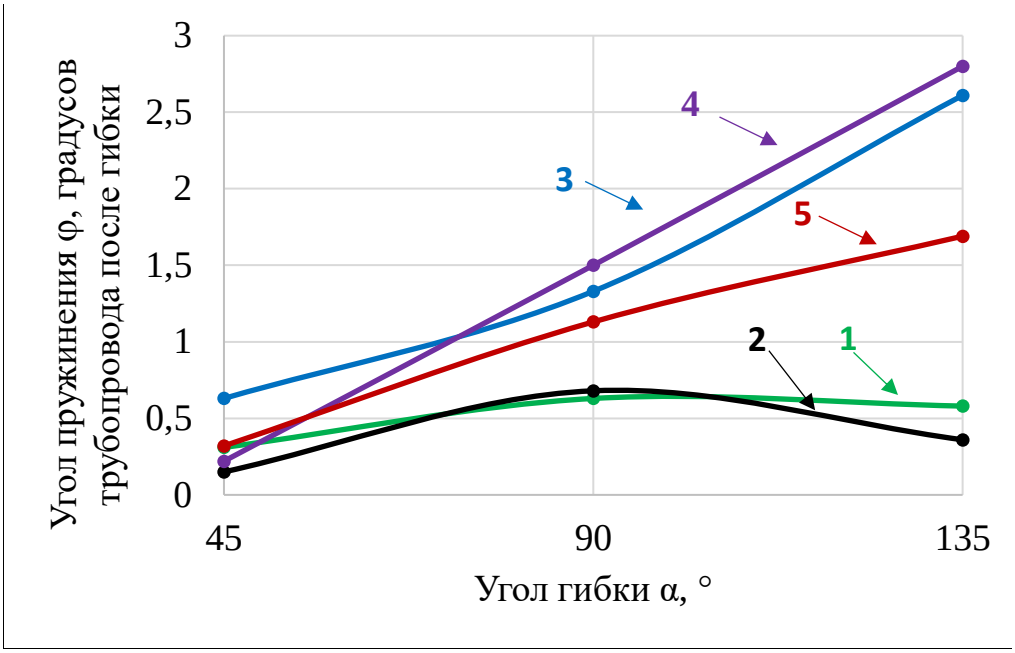



Рисунок 14 - Влияние угла гибки на относительную овальность ΔD/D
1 - 6 мм; 2 – 12 мм; 3 – 18 мм; 4 – 24 мм; 5 – 28 мм

Получены аналитические зависимости относительной овальности и угла пружинения от угла гибки, позволяющие прогнозировать изменение геометрических параметров трубопроводов диаметром 6–28 мм с толщиной стенки 1 мм при разработке технологического процесса гибки с использованием гибочного шаблона, изготовленного по технологии FDM из ПЛА.

**В пятой главе** дан анализ результатов, проведенных экспериментальных и расчетных исследований.

При проектировании гибочного шаблона для гибки трубопроводов из стали 12Х18Н10Т, изготавливаемого методом 3D-печати по технологии FDM из полилактида, одним из ключевых технологических параметров, определяющих работоспособность и долговечность инструмента, является угол печати α (ориентация слоёв материала относительно направления действия растягивающих нагрузок) (рисунок 8).

Экспериментальные и теоретические исследования, проведённые в главах 3 и 4, а также известные данные из литературы показывают, что при растяжении образцов из полилактида возникают два принципиально различных механизма разрушения: межслойное разрушение, происходящее при малых углах печати (от 0° до 45°) по границе между слоями, и внутрислойное разрушение, наблюдаемое при больших углах печати (от 60° до 90°) с разрушением самих слоёв.

Установлено, что существует граничный угол разрушения $\boldsymbol{\theta}$, значение которого для полилактида составляет от 50° до 60° в зависимости от толщины слоя печати. При углах печати меньше угла разрушения $\boldsymbol{\theta}$ доминирует межслойное разрушение, характеризующееся значительно более низкой прочностью на разрыв, тогда как при углах печати больше угла разделения реализуется внутрислойное разрушение с существенно более высокими прочностными характеристиками.

Для обеспечения максимальной стойкости гибочного шаблона необходимо ориентировать слои печати таким образом, чтобы направление действия

растягивающих нагрузок соответствовало внутрислойному механизму разрушения полилактида, то есть угол печати должен превышать угол разрушения θ. Рекомендуемое значение угла печати для ролика составляет от 55° до 90°, причём оптимальным с точки зрения баланса прочности и технологичности является угол 75° – 90°.

Результаты механических испытаний, показали, что предел прочности полилактида на растяжение образцов с углом печати 90° примерно на 200 % выше, чем у образцов с углом печати 0°, что говорит о необходимости учета корректного выбор угла печати гибочного шаблона с учетом толщины слоя: для нагруженного инструмента предпочтительна толщина слоя 0,2 мм, что обеспечивает не только более высокую абсолютную прочность, но и стабильное значение угла разрушения в диапазоне 55°–60°.

Таким образом, для изготовления гибочного шаблона методом FDM следует использовать угол печати 67° при толщине слоя 0,2 мм с последующей термической обработкой (при 85 °C в течение 60 минут), что позволяет перевести механизм возможного разрушения из опасного межслойного во внутрислойный, что повышает несущую способность и ресурс гибочного шаблона.

Экспериментальные результаты совпали с теоретической моделью угла разрушения $\boldsymbol{\theta}$ (таблица 8).

Таблица 8 – Сравнение экспериментального и расчетного угла разрушения

| Толщина слоя печати, мм | Угол разрушения $\theta$ для ПЛА, ° | | |
|---|---|---|---|
| | Расчетный | Экспериментальный | Погрешность, % |
| 0,1 | 56 | 57 | 3,0 |
| 0,2 | 52 | 55 | 5,8 |
| 0,3 | 53 | 56 | 5,7 |

Полученные расчетные и экспериментальные данные по углу разрушения $\boldsymbol{\theta}$ в образцах из полилактида, изготовленных методом 3D-печати по технологии FDM позволяют проектировать конструкцию гибочного шаблона с учетом его самых нагруженных участков при гибке трубопроводов.

Характер изменения овальности в зависимости от угла гибки различается для гибочного шаблона разной жесткости. Для шаблона исходной конструкции с увеличением угла гибки от 45° до 135° наблюдается более выраженный рост овальности, тогда как для шаблона повышенной жесткости эта зависимость практически линейна. Во всех исследованных диапазонах овальность не превышает допустимых значений для трубопроводных систем (обычно 3–10% в зависимости от назначения изделия).

Сравнение расчетной и экспериментальной овальности при гибке трубопровода из стали 12Х18Н10Т диаметром 18 мм и толщиной стенки 1 мм демонстрирует стабильное увеличение относительной овальности с увеличением угла гибки от 45° до 135° (рисунок 5.2). Это явление вероятно связано с увеличением величины пластической деформации в зоне гиба. При этом усиливаются растяжение наружной и сжатие внутренней поверхностей трубопровода, что приводит к большему сплющиванию поперечного сечения и росту величины овальности.

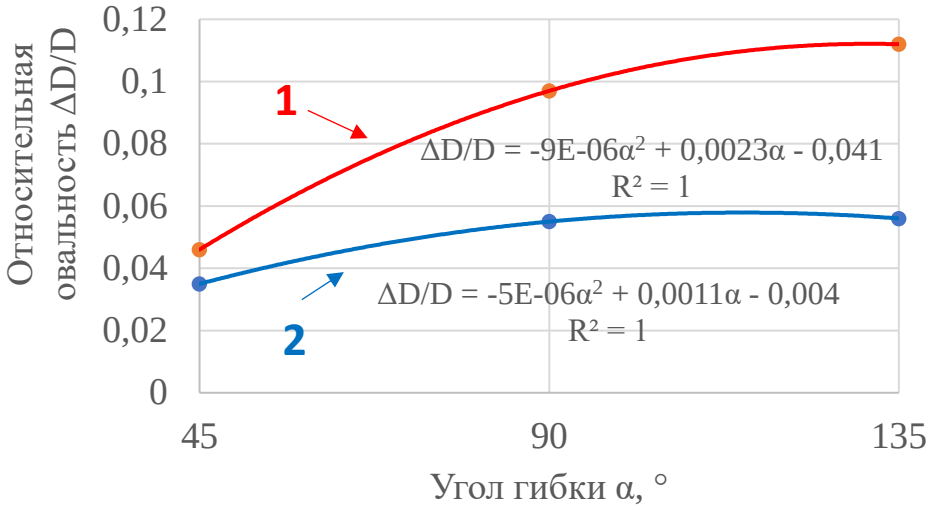



Рисунок 15 – Сравнение расчетной и экспериментальной овальности трубной заготовки диаметром 18 мм толщиной стенки 1 мм
1 – расчетные данные овальности; 2 – экспериментальные данные овальности

При гибке полимерным инструментом необходимо учитывать, что модуль упругости ПЛА (примерно 2–3 ГПа) значительно ниже, чем у конструкционной стали, из которой традиционно изготавливают гибочные шаблоны. Это приводит к тому, что часть энергии деформации расходуется на упругую деформацию самого гибочного шаблона, уменьшая фактическую долю пластической деформации заготовки. Как следствие, величина пружинения при использовании гибочного шаблона из ПЛА может быть несколько выше по сравнению с металлическим инструментом. Однако, как показывают исследования, при доработке конструкции гибочного шаблона (повышенной прочности) и выборе рациональных режимов гибки это влияние может быть минимизировано. Сравнение расчетных и экспериментальных углов пружинения трубопровода из стали 12Х18Н10Т диаметром 18 мм с толщиной стенки 1 мм показывают рост угла пружинения с увеличением угла гибки (рисунок 16).

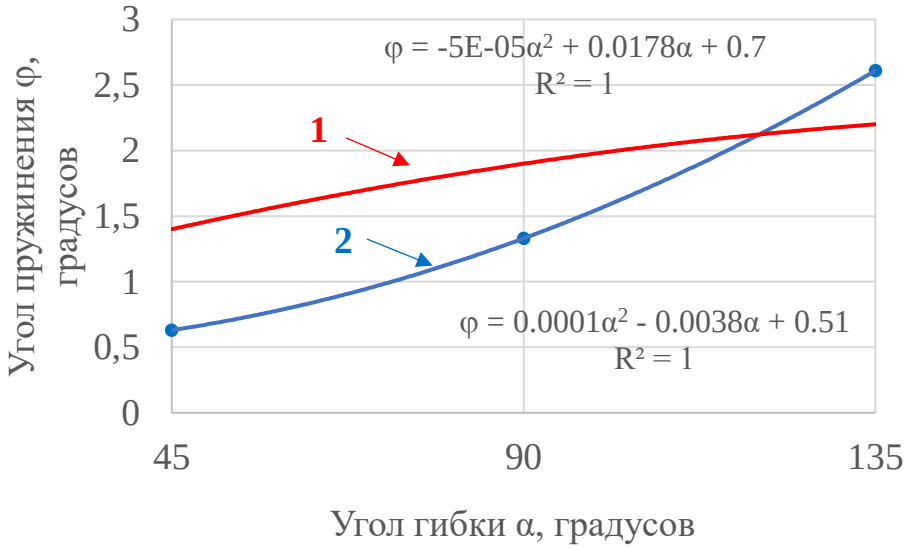



Рисунок 16 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных по углу пружинения трубной заготовки диаметром 18 мм; на угол гибки 45°, 90° и 135°
1 – расчетные данные угла пружинения;
2 – экспериментальные данные угла пружинения

Увеличение угла пружинения φ с ростом угла гибки от 45° до 135° связано с увеличением величины упругопластической деформации трубопровода. При повышении угла гибки возрастает накопленная деформация, которая после снятия нагрузки вызывает большое упругое восстановление формы и, соответственно, увеличение угла пружинения.

Таким образом, анализ геометрии формирования трубопроводов при гибке гибочным шаблоном, изготовленным по технологии FDM из ПЛА, показывает, что при условии его правильного проектирования (обеспечения достаточной прочности и необходимой ориентации слоев печати), способен обеспечить стабильные и допустимые геометрические параметры овальности и угла пружинения гнутых трубопроводов из стали 12Х18Н10Т.

**В шестой главе** представлена разработанная технология гибки трубопроводов из стали 12Х18Н10Т гибочным шаблоном из полилактида и оценен экономический эффект.

Для выполнения цели исследования были изготовлены методом 3D-печати FDM гибочные шаблоны из материала ПЛА для гибки трубопроводов из стали 12Х18Н10Т диаметром от 6 до 36 мм, толщиной стенки 1 мм (рисунок 17). При изготовлении гибочных шаблонов был выбран угол печати 67 градусов и проведена термическая обработка в течение 60 минут при 85ºС.

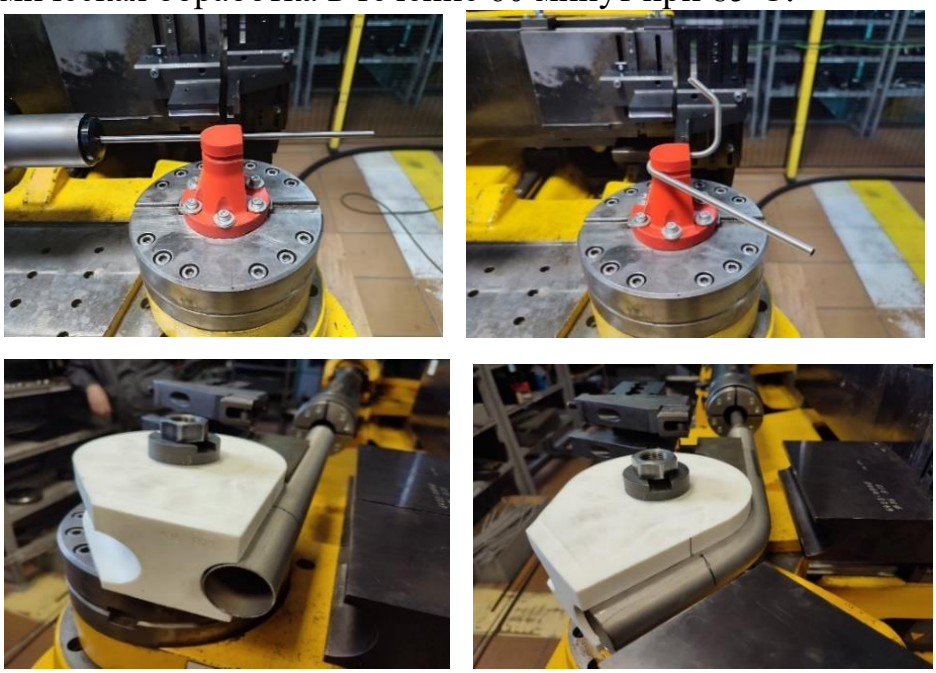
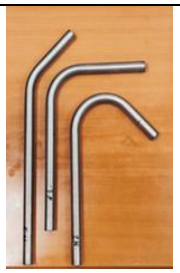


Рисунок 17 – Гибочные шаблоны для гибки трубопроводов из стали 12Х18Н10Т

Результаты применения гибочного шаблона изготовленного по технологии 3D-печати методом FDM из полилактида для гибки трубопроводов из стали 12Х18Н10Т на трубогибочном станке с ЧПУ мод. SILFAX SE 50L/R представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Трубопроводы диаметром 6, 12, 18, 24, 28 и 36 мм. Угол гибки 45º, 90º и 135º градусов

| Трубные заготовки, Ø мм | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 6 | 12 | 18 | 24 | 28 | 36 |
|  |  |  |  |  |  |

Ключевые достижения от внедрения полимерного гибочного шаблона:

1. Сокращение сроков изготовления – время производства гибочного шаблона и оснастки сократилось в 5 раз;
2. Экономическая эффективность – себестоимость оснащения гибочных операций снизилась на 80%;
3. Технологическая гибкость – возможность оперативного изменения геометрии шаблона под конкретную задачу;
4. Надежность – после 1500 рабочих циклов шаблон не показал признаков разрушения или критической деформации. Овальность трубопроводов соответствовала техническим требованиям.

**Экономический эффект**

Анализ трудоемкости изготовления гибочного шаблона демонстрирует существенное снижение трудозатрат при переходе на аддитивные технологии. Снижение трудоемкости достигает 78%, при сокращении с 93 до 20,5 нормо-часов на производство гибочного шаблона для гибки трубопроводов диаметром от 6 до 36 мм методом 3D-печати по технологии FDM. Сравнение по времени изготовления гибочного шаблона представлены в таблице 10.

Таблица 10. Количество изготовленных гибочных шаблонов

| Количество изделий | Диаметр трубопроводов, мм | Время изготовления традиционным способом, нч | Время изготовления методом 3D-печати, нч |
|---|---|---|---|
| 1 | 6 | 40 | 3,2 |
| 2 | 12 | 45 | 4,5 |
| 3 | 18 | 58 | 8,7 |
| 4 | 24 | 63 | 12,7 |
| 5 | 28 | 81 | 15,5 |
| 6 | 36 | 93 | 20,5 |

Для количественной оценки экономического эффекта применена методика расчета экономии фонда оплаты труда, учитывающая ключевые параметры: трудоемкость до и после внедрения (Т1 и Т2), стоимость нормо-часа (Ч1 и Ч2), общее количество изделий (П).

Экономический эффект рассчитывается по формуле:

$$Э_{фот} = (Т_1 \times Ч_1 - Т_2 \times Ч_2) \times П \qquad (6.1)$$

В таблице приведены данные трудоемкости и стоимости изготовления гибочных шаблонов для гибки трубопроводов.

Таблица 11. Снижение трудоемкости и стоимости изготовления гибочных шаблонов

| № п/п | Гибочный шаблон для гибки трубопроводов Ø, мм | $Т_1$, н/ч | $Т_2$, н/ч | $Ч_{1ср}$ | $Ч_{2ср}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 6 | 40 | 3,2 | 352,39 | 406 |
| 2 | 12 | 45 | 4,5 | 352,39 | 406 |
| 3 | 18 | 58 | 8,7 | 352,39 | 406 |
| 4 | 24 | 63 | 12,7 | 352,39 | 406 |
| 5 | 28 | 81 | 15,5 | 352,39 | 406 |
| 6 | 36 | 93 | 20,5 | 352,39 | 406 |
| Средние значения | | 63,3 | 10,85 | 352,39 | 406 |

На основе анализа 6 гибочных шаблонов выведены средние значения трудоемкости и стоимости нормо-часа на изготовления 1 комплекта гибочных шаблонов, по которым рассчитан экономический эффект:

$$Э_{фот} = (Т_{1ср} \text{ x } Ч_{1ср} - Т_{2ср} \text{ x } Ч_{2ср}) \text{ x } П = (63{,}3 \text{ x } 352{,}39 - 10{,}85 \text{ x } 406) \text{ x } 6 = 107\,405 \text{ руб.}$$

В результате за счет изменения трудоемкости изготовления гибочных шаблонов экономический эффект на изделие составил 107 405 рублей 1 комплект гибочных шаблонов для гибки трубопроводов диаметром от 6 до 36 мм толщиной стенки 1 мм. Среднее значение себестоимости изготовления гибочного шаблона из ПЛА методом 3D-печати снижено на 80%.

## ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в теоретическом обосновании, разработке и промышленной реализации технологии гибки трубопроводов из стали 12Х18Н10Т длинной 400 мм, толщиной стенки 1 мм и диаметром от 6 до 36 мм с применением гибочного шаблона, изготовленного методом аддитивного производства по технологии FDM из полилактида. Разработанная технология обеспечивает требуемую геометрическую точность трубопроводов, снижение сроков и себестоимости изготовления технологической оснастки. Полученные результаты имеют существенное значение для авиационного и газотурбинного машиностроения.

На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований сформулированы следующие основные выводы:

1. По результатам анализа научно-технической литературы обоснована возможность применения полилактида в качестве материала гибочного шаблона для гибки трубопроводов из стали 12Х18Н10Т. Установлено, что совокупность механических, технологических и экономических характеристик ПЛА — предел прочности при растяжении до 60 МПа, минимальная усадка при FDM-печати около 0,2 %, относительное удлинение при разрыве до 12 %, низкая температура переработки и доступность материала — обеспечивает возможность его использования в качестве альтернативы традиционным металлическим

материалам при изготовлении гибочного шаблона. На основе анализа были сформулированы цели и задачи исследования.

2. Разработана и экспериментально апробирована технология изготовления гибочного шаблона из ПЛА по технологии FDM, включающая цифровое проектирование в NX 12. Установлены рациональные режимы печати гибочного шаблона: температура сопла 205°С, температура стола 60 °С, толщина печатного слоя 0,2 мм, 100 % заполнение и последующую термическую обработку при 85 ºС в течении 60 минут. Впервые для рассматриваемого процесса установлена взаимосвязь между параметрами 3D-печати, структурным состоянием ПЛА и работоспособностью гибочного шаблона, что позволило сформировать технологические требования к изготовлению полимерного гибочного шаблона.

3. Разработана теоретическая модель поперечно-изотропного разрушения ПЛА, позволяющая определять угол разрушения материала в зависимости от толщины печатного слоя и ориентации слоев относительно направления действующей нагрузки. Расчетные значения угла разрушения составили 56° при толщине слоя 0,1 мм, 52° при 0,2 мм и 53° при 0,3 мм. Экспериментально установлено, что переход от межслойного к внутрислойному механизму разрушения происходит в диапазоне углов печати 45–60°. Достоверность разработанной модели подтверждена экспериментально: расхождение расчетных и экспериментальных значений угла разрушения не превышает 6 %. Полученная модель впервые использована для обоснования ориентации слоев непосредственно при проектировании гибочного шаблона, что позволило обеспечить преимущественно внутрислойный механизм разрушения наиболее нагруженных участков гибочного шаблона.

Разработана конструкция гибочного шаблона повышенной прочности, адаптированная к анизотропным свойствам ПЛА. Введение дополнительных конструктивных элементов позволило снизить перемещения шаблона с 4,8 до 1,2 мм и повысить коэффициент запаса прочности по напряжениям в 1,5–2 раза. Моделированием напряженно-деформированного состояния установлено, что гибочный шаблон испытывает одновременно сжимающие и растягивающие напряжения, достигающие соответственно 40 и 50 МПа. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных подтвердило, что возникающие в шаблоне напряжения не превышают установленных прочностных характеристик ПЛА.

4. Экспериментально установлены закономерности влияния ориентации слоев печати, толщины печатного слоя и термической обработки на механические свойства ПЛА применительно к условиям работы гибочного шаблона. При увеличении угла печати от 0° до 90° предел прочности при растяжении возрастает примерно в 2 раза – с 30 до 60 МПа. При сжатии ПЛА демонстрирует значительную способность к деформационному упрочнению без разрушения образцов. Установлено, что максимальные прочностные характеристики повышаются на 18–20% после термической обработки при 85 °С в течение 60 минут. Структурные исследования показали повышение кристалличности, структурную релаксацию и снижение внутренних напряжений, сформированных при 3D-печати, что сопровождается повышением

прочностных характеристик материала. На основании полученных результатов обоснован рациональный угол ориентации слоев гибочного шаблона 67° при толщине слоя 0,2 мм.

5. Впервые для гибки трубопроводов с использованием гибочного шаблона из ПЛА установлены количественные зависимости геометрических параметров трубопровода от параметров процесса гибки. Для труб диаметром 6–28 мм с толщиной стенки 1 мм установлено увеличение относительной овальности при повышении угла гибки от 45° до 135°; получены аналитические зависимости относительной овальности и угла пружинения от угла гибки и диаметра трубопровода. Установлено, что после гибки первых 3–4 заготовок происходит стабилизация геометрических параметров полимерного шаблона, а последующие значения овальности находятся в пределах 5 % интервала достоверности. Полученные зависимости позволяют осуществлять расчетное прогнозирование овальности и пружинения трубопроводов на стадии проектирования технологического процесса.

6. Впервые разработана и внедрена в серийное производство технология гибки трубопроводов из стали 12Х18Н10Т диаметром 6–36 мм с использованием гибочного шаблона, изготовленного методом FDM из ПЛА. Промышленными испытаниями на трубогибочном станке с ЧПУ SILFAX SE 50L/R подтверждена работоспособность полимерного инструмента после 1500 рабочих циклов: разрушения и критической деформации шаблонов не выявлено, а геометрические параметры изготовленных трубопроводов соответствовали требованиям технической документации. Разработаны технологические инструкции и оформлены акты внедрения на предприятии АО «ОДК-Салют». Установлена промышленная и экономическая эффективность разработанной технологии. Применение гибочного шаблона из ПЛА позволило сократить сроки изготовления в 5 раз и снизить себестоимость оснащения гибочных операций на 80 %. Экономия по фонду оплаты труда при изготовлении одного комплекта гибочных шаблонов составила 107 405 рублей. Полученные результаты подтверждают технологическую и экономическую целесообразность применения аддитивно изготовленной полимерной оснастки в серийном производстве трубопроводов газотурбинных двигателей.

Таким образом, **все поставленные задачи исследования решены в полном объёме**. Разработанная технология изготовления гибочного шаблона из ПЛА методом FDM-печати доказала свою промышленную применимость, надёжность и экономическую целесообразность, что подтверждено внедрением в серийное производство. Полученные результаты создают научно-техническую основу для дальнейшего развития аддитивных технологий при производстве технологической оснастки в машиностроении.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **П. А. Полшков.** Гибка тонкостенных труб с применением инструмента из полилактида PLA // Петров П.А., Бурлаков И.А., Шаболин М. В. // Кузнечно-штамповочное производство. ОМД, №1, 2024 г., С. 27-32.
2. **П. А. Полшков.** Силовые и точностные параметры при гибке труб // Петров П. А., Бурлаков И. А., Тарлавина А. А. // Известия Тульского государственного университета, №7, 2024 г., С. 598-604.
3. **П.А. Полшков**. Зависимость геометрической точности труб от технологических параметров гибки инструментом из полилактида PLA // Петров П.А., Бурлаков И.А., Шаболин М. В. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, №3, 2023 г., С. 136-141.
4. **П.А. Полшков**. Штамповка тонкостенных заготовок с применением инструмента из полилактида PLA // Куликов А.Д., Бурлаков И.А., Петров П.А., Деметрашвили И.С. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, №12, 2024 г., С. 616-620.
5. **П.А. Полшков**. Формообразование листовых заготовок из меди М1 полимерным инструментом из полилактида PLA // Куликов А.Д., Бурлаков И.А., Петров П.А., Деметрашвили И.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, №4, 2024 г., С. 163-170.

### Публикации в иных изданиях:

1. **Полшков П.А.** Повышение прочности формообразующего инструмента из полилактида PLA методом закалки // Петров П.А., Бурлаков И.А. и др. // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. – 2023. – №1, С. 58-65. – DOI: 10.22184/2499-9407.2023.30.1.58.65.
2. **Полшков П.А.** Изучение метода повышения прочности филамента PLA // Петров П.А., Бурлаков И.А. и др. // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. – 2024. – №1, С. 60-64. – DOI: 10.22184/2499-9407.2024.34.1.60.63.
3. **Полшков П.А.,** Куликов А.Д., Бурлаков И.А., Петров П.А. Перспективы применения полимерного штамповочного инструмента // СТАНКОИНСТРУМЕНТ, 2025. – №3, С. 62-67. – DOI: 10.22184/2499-9407.2025.40.3.62.67.
4. **Полшков П.А.** Гибка труб с применением 3D-напечатанного инструмента // Петров П.А., Бурлаков И.А., Сапрыкин Б.Ю. // Журнал «Аддитивные технологии», 2022, С 32-34.