

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

На правах рукописи

Полшков Павел Анатольевич

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

2.5.7. «Технологии и машины обработки давлением»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
Доктор технических наук, старший научный сотрудник
Бурлаков Игорь Андреевич

Москва 2026

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА	13
1.1 Существующие технологии изготовления трубопроводов	13
1.2 Область применения тонкостенных трубопроводов	17
1.3 Оборудование для гибки трубопроводов	18
1.4 Проблемы традиционного металлического гибочного шаблона	21
1.5 Аддитивные технологии в производстве гибочного шаблона. Сущность экструзивной FDM-технологии 3D-печати.	22
1.6 Сравнительный анализ полимерных материалов для 3D-печати гибочного шаблона	24
1.7 Повышение прочностных свойств полимеров	30
1.8 Применение полимерного инструмента в формообразующих операциях	35
1.8.1 Развитие отечественных исследований по применению полимерных инструментов	39
1.9 Актуальность применения полилактида для изготовления гибочного шаблона	41
Выводы по 1 главе	43
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	46
2.1 Химический состав и свойства исследуемых материалов	46
2.2 Методы исследования образцов	47
2.2.1 Методика изготовления образцов и гибочных шаблонов	47
2.2.2 Методика исследования микроструктуры ПЛА	50
2.2.3 Методы и оборудование для определения реологических свойств	51
2.2.4 Методы и оборудование для определения степени кристаллизации ПЛА	52
2.2.5 Методы проведения термической обработки	53
2.3 Методы моделирования процесса формообразования трубопроводов	54
2.4 Методы получения гнутых трубопроводов	57
2.5 Методы контроля трубопроводов после гибки	59

Выводы по 2 главе.....	60
ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ	62
3.1 Определение напряженно-деформируемого состояния гибочного шаблона из ПЛА в процессе гибки	62
3.2 Исследование статической прочности конструкции гибочного шаблона из ПЛА с учетом действующих на него сил	64
3.3 Угол пружинения и относительная овальность трубопроводов при гибке гибочным шаблоном из ПЛА.....	66
3.4 Установление угла разрушения ПЛА под действием растягивающих напряжений	68
3.5 Исследование структурных изменений в материале ПЛА при термической обработке.....	73
Выводы по главе 3.....	75
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	77
4.1 Исследование структурных изменений в полилактиде при термообработке	77
4.2 Прочностные характеристики полилактида в зависимости от угла печати ..	78
4.3 Определение экспериментального угла разрушения материала полилактид	85
4.4 Оценка влияния геометрии гибочного шаблона на овальность и пружинение трубопроводов	87
Вывод по главе 4	93
ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ	95
5.1 Анализ и учет угла разрушения ПЛА при изготовлении гибочного шаблона	95
5.2 Геометрические параметры трубопроводов, получаемые при гибке гибочным шаблоном из ПЛА	97
5.3 Анализ растягивающих и сжимающих напряжений в инструменте из ПЛА в процессе формообразования трубной заготовки	101
5.4 Анализ структурных изменений в ПЛА	102
Вывод по главе 5	104
ГЛАВА 6. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ.....	106

6.1 Разработка технологии, промышленное освоение и оценка эффективности применения гибочного шаблона с регламентированной структурой и повышенным комплексом эксплуатационных свойств для гибки трубопроводов из стали 12X18H10T	106
6.2 Обоснование экономической эффективности внедрения разработанной технологии при производстве трубопроводов.	107
Выводы по главе 6.....	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	111
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	115
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	129
ПРИЛОЖЕНИЕ В	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	133
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	135

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Обозначение	Наименование переменной/сокращение
ГТД	– газотурбинный двигатель
ЧПУ	– числовое программное управление
FDM	– Fused Deposition Modeling
ПЛА	– полилактид
МКЭ	– метод конечных элементов
STL	– Standard Tessellation Language
ГОСТ	– Государственный стандарт
ДСК	– дифференциальная сканирующая калориметрия
θ	– угол разрушения ПЛА, °
α	– угол печати, °
ε	– величина деформации
P	– сила деформации, Н
T	– температура, °C
σ	– напряжение, МПа
δ	– относительное удлинение, %
HV	– твердость по Викерсу

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В машиностроении при разработке новых изделий, в частности, в авиастроении в больших количествах используются трубопроводы из стали 12Х18Н10Т для обеспечения работы топливных, масляных, воздушных и других узлов [1]. Трубопроводы ГТД 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 [2]. При автоматизированной гибке трубопроводов качество применяемого гибочного шаблона влияет на их геометрические параметры овальности и пружинения. Выбор гибочного шаблона зависит от наружного диаметра трубопровода, толщины стенки, материала и радиуса гибки. Гибочный шаблон для гибки трубопроводов традиционно изготавливается из инструментальной стали и имеет высокую трудоемкость [3]. Изучению данного вопроса посвятили свои труды ученые: А.И. Гальперин А.И., Алексеев Ю.Н., Горбунов М.Н., Дмитриев Б.С., Заславский М.Я., Мошнин Е.Н., Ильюшин А.А., Орлов В.М., Туркин В.С., 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.

А при выпуске небольших партий изделий и для опытных работ целесообразно изготавливать гибочный шаблон с минимальными временными и материальными затратами. Изготовление гибочного шаблона из полимерных материалов методом аддитивных технологий позволит ускорить процесс разработки новых изделий и снизить себестоимость изготовления трубопроводов.

Степень научной разработанности.

Большой вклад в развитие аддитивных технологий и формообразующих операций с использованием полимерного инструмента дан в работах: 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.

Одним из перспективных и малоизученных способов изготовления гибочного шаблона является экструзионная технология 3D-печати FDM, обеспечивающая сокращение сроков его изготовления.

Несмотря на широкое применение полимерных материалов при формообразовании 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 трубопровода. Нет понимания стойкости полимерного 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.

Целью работы являлось определение методов совершенствования процесса гибки криволинейных трубопроводов из стали 12X18H10T с использованием гибочного шаблона из полилактида.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующий **задачи:**

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.

Методы исследования.

При выполнении работы применялись апробированные методы исследования: оптическая полимерография, механические испытания на сжатие и растяжение. Экспериментальные исследования процесса гибки трубопроводов выполнены на трубогибочном автомате модели SILFAX SE 50L/R и контролем геометрических параметров заготовок с помощью, автоматизированной оптической измерительной системы.

В теоретических исследованиях использовалось математическое моделирование с применением метода конечных элементов в программе QForm. Расчет прочностных свойств осуществлялся в программе T-Flex. Обработку экспериментальных данных выполняли с использованием программы Exel.

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. Найденны 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. Найденны 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 наиболее нагруженных местах гибочного шаблона из полилактида при гибке трубопроводов.

2. Найденны 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.

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.

Положения, выносимые на защиту.

1. Установление угла разрушения $57 \pm 5^{\circ}$ 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°C в течение 60 минут и остывании в печи после 3D-печати гибочного шаблона по технологии FDM.

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.

Результаты выполненных исследований внедрены автором в серийное и опытное производство трубопроводов на автоматизированном станке с ЧПУ, что подтверждено 2-мя актами внедрения гибочных шаблонов из полилактида. Разработаны технологические инструкции № 05.65.013 «Гибка труб на трубогибочном станке с ЧПУ фирмы SILFAX модели SE50L\R» и № 05.85.109 «Послойное наплавление экструзионным методом FDM на 3D-принтере Raise3D Pro2 Plus».

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа по своей цели, задачам, содержанию и научной новизне соответствует пункту 6 «Методы оценки напряженного и деформированного состояния и способы увеличения жесткости, прочности и стойкости деформирующего инструмента» паспорта специальности 2.5.7. «Технологии и машины обработки давлением»

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, подтверждается применением современного аттестованного испытательного и оптического оборудования, специализированных станков и методов определения геометрических параметров в процессе формообразования заготовок из стали 12X18H10T, а также современными программами конечно-элементного численного моделирования для анализа процессов. Основные положения диссертационной работы были представлены на всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации», приуроченной к 65-летию доктора технических наук, профессора Яковлева С.С. (Тула, 2022); научно-практической конференции «Чернышёвские чтения 2023» (Москва, 2023); 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). По теме диссертации опубликованы 9 научных трудов, в том числе 5 статей в рецензируемых изданиях из перечня ВАК.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, библиографического списка, приложения. Текст диссертации изложен на 137 страницах машинописного текста, иллюстрирована 50 рисунками, содержит 22 таблицы. Библиографический список включает 117 наименования.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

1.1 Существующие технологии изготовления трубопроводов

В современном мире процессы гибки следует считать одним из самых распространенных способов обработки и получения изделий. Гибка является технологическим процессом, в котором заготовке придают нужную форму с помощью специального оборудования без использования сварочного оборудования, литья и прочих подобных процессов [4,5,6]. При этом в сечении местагиба с одной стороны заготовка сжимается, а с другой - растягивается. Чтобы процесс проходил правильно, необходимо преодолеть предел текучести материала, не превышая предела прочности на разрыв.

Различают ручной и автоматизированный вид гибки металла, однако существуют и другие методы классификаций технологий и способов. Выбор в пользу того или иного производят, ориентируясь на тип металлической трубной заготовки.

По способу приложения деформирующего воздействия выделяют гибку на оправке и без оправки, наматыванием, обкаткой, сжатием, на двух опорах, а также более специализированные процессы, включая гидромеханическую и свободную. Современные обзоры показывают, что при формообразовании тонкостенных трубопроводов основными проблемами являются утонение стенки на наружной сторонегиба, утолщение на внутренней стороне, овальность поперечного сечения, гофрообразование и пружинение. Поэтому выбор схемы гибки определяется не только требуемым углом и радиусом, но и необходимостью управления этими дефектами [7-9].

Метод гибки металлического трубопровода можно описать, как процесс изгибания трубопровода по дуге различного радиуса или по кривой различных форм под различными углами и в различных плоскостях без излома и критической деформации профиля трубы в местахгиба. Большую роль при этом играет и материал гибочного шаблона, каждый из которых обладает своими особенностями, без учета которых невозможно придать металлическому или иному прокату

сложную форму [10,11].

Процесс гибки трубопроводов можно разделить на два способа:

- холодная гибка;
- горячая гибка.

Первый способ холодная гибка [12,13] трубопроводов - выполним только в том случае, если деформируемая труба изготавливается из пластичного материала, способного менять свою форму под прилагаемыми на неё нагрузками в условиях комнатной температуры. Поэтому холодную гибку, как правило, используют при деформации относительно малых диаметров металлических трубопроводов (за исключением труб из чугуна) [6].

Горячая гибка - возможна в любом варианте при повышении температуры до начала рекристаллизации любого кристаллического или полукристаллического материала пластичность которого при нагреве сильно повышается [14]. Процесс высокотемпературной гибки осуществляется следующим образом: трубопровод нагревают в месте деформации, а затем изгибают ручным методом. Автоматизированные трубогибочные станки, в этом случае, уже не требуются [5,6].

Горячее деформирование [12] дает возможность деформировать более высокопрочные трубы. Причем, как и в случае с холодной гибкой, горячую можно реализовать с помощью двух технологических процессов: ручного и механического деформирования.

К основным способам ручного формообразования трубопроводов относятся следующие варианты:

- Наматывание изделия на специальный шаблон;
- Гибка изделия на опорах.

Причем первый вариант допустим только в том случае, если материал трубопровода достаточно пластичен. А второй способ можно использовать и для менее пластичных материалов трубопроводов. В первом варианте трубопровод наполняют сыпучим веществом, например, тринатрийфосфатом, и деформируют путем наматывания заготовки на шаблон. При такой методике осуществляется

гибка трубопровода из алюминиевых или медных сплавов и других материалов с высокой пластичностью. Сам изгиб получается достаточно ровным, но такая технология, как правило сопровождается большими объемами концевых отходов.

Второй вариант - деформация на опорах [11] - реализуется следующим методом:

- Деформируемое изделие устанавливают на два точечных участка. Центр трубопровода, при этом, находится над пустотой;
- Затем в центральную точку, равноудаленную от двух опор прикладывают усилие и под возникающими нагрузками трубопровод деформируется. Причем саму заготовку можно немного сдвигать, перемещая точку приложения нагрузки на пока еще не согнутый участок.

Данная технология гибки трубопроводов крайне груба поэтому с этим способом часто возникают дефекты (рисунок 1.1) - на внешней стороне трубы образуются вмятины, а их поперечное сечение искажается от первоначального профиля т.е. происходит изменение овальности профиля трубопровода. Кроме того, образуются гофры на внутренней поверхности загиба.

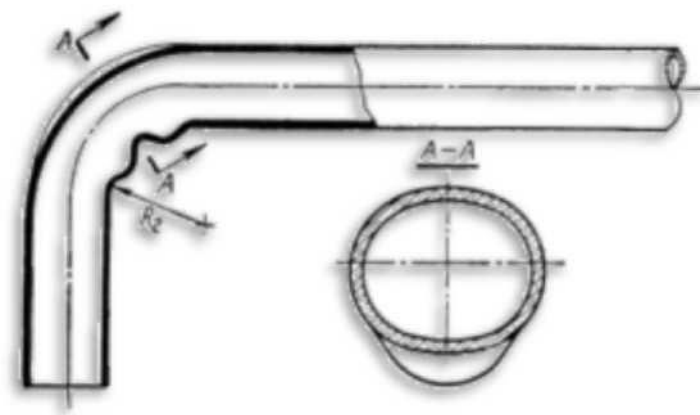


Рисунок 1.1 – Дефекты в виде гофров на внутреннем радиусе трубопровода после гибки

Сложность процесса гибки трубопроводов определяется четырьмя основными критериями:

- пластичностью материала трубы;

- радиусом изгиба нейтральных волокон материала трубы;
- длиной прямых участков трубы между дугами;
- отношением наружного диаметра трубы к толщине её стенок.

Основным параметром для определения качества гибки трубопровода является её относительное удлинение при разрыве, которое индивидуально для каждого типа трубопровода и измеряется в процентах [15]. Чем больше относительное удлинение при разрыве, тем лучше материал трубопровода выдерживает сильное растяжение.

Согласно монографии [16], радиус гибки должен быть пропорционален диаметру трубопровода. Он может быть уменьшен до одного диаметра, однако для этого требуется применение более высококачественных материалов, и более сложных и дорогих трубогибочных автоматов.

Прямые участки трубопровода между дугами позволяют прижимать трубу к гибочному шаблону и далее огибать её вокруг этой формы. Длина прямых участков трубы должна составлять около двух её диаметров. Несмотря на это всегда есть возможность уменьшить её до половины диаметра, но для этого необходимы прижим и формирующий элемент, который должен перехватывать трубу сразу после предыдущего технологического перехода гибки. Таким образом, чем меньше отношение внешнего диаметра трубопровода к толщине её стенок, тем легче деформировать трубу [15-19].

Отдельную группу составляют процессы гибки, в которых геометрия формируется без жестко заданной траектории вокруг одного гибочного шаблона. К ним относится свободная гибка, в том числе многокоординатная, позволяющая получать пространственные трубные элементы переменной кривизны [20]. Такие технологии развиваются как средство повышения гибкости производства сложных тонкостенных трубопроводов, однако требуют сложных систем управления и расчета траектории инструмента.

Таким образом, многообразие технологий изготовления трубопроводов обусловлено различием материалов, размеров диаметров труб, толщин стенок, радиусов и углов гибки, а также требованиями к точности и объему производства.

Для рассматриваемой в диссертации задачи наиболее существенной является холодная пространственная гибка тонкостенных трубопроводов из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т с использованием жестко заданной геометрии гибочного шаблона. Это позволяет непосредственно связать качество готового трубопровода с конструкцией и свойствами формообразующего гибочного шаблона.

1.2 Область применения тонкостенных трубопроводов

Тонкостенные трубопроводы применяются в конструкциях, в которых одновременно предъявляются требования к снижению массы, компактности трассы, прочности и герметичности [21]. Они используются во многих отраслях:

- машиностроении;
- авиастроении;
- судостроении;
- автомобилестроении.

Говоря об области применения тонкостенных трубопроводов [22], хорошим примером могут служить топливные, гидравлические и пневматические системы. В авиационной технике трубопроводы являются элементами топливных, масляных, гидравлических, пневматических и других систем, обеспечивающих подачу рабочих сред между функциональными узлами изделия [9,23].

При таких условиях необходимо использовать особые системы трубопроводов: химически, термически стойкие и долговечные. И тонкостенный стальной трубопровод, с ее относительно малым весом и высокой стойкостью на изгиб, кручение и растяжение, является лучшим вариантом из всех возможных.

Одним из ключевых требований к тонкостенному трубопроводу при гибке является ограничение изменения поперечного сечения [24,25]. При увеличении отношения наружного диаметра к толщине стенки возрастает склонность трубопровода к локальной потере устойчивости, овальности и гофрообразованию. Одновременно при малых радиусах гибки усиливается неоднородность

деформации по толщине стенки: наружная поверхность места гибки испытывает растяжение и склонна к утонению, а внутренняя — сжатие и может быть подвержена образованию складок [7, 8].

1.3 Оборудование для гибки трубопроводов

Оборудование для гибки трубопроводов предназначено для создания управляемого деформирующего воздействия на трубную заготовку и обеспечения заданной геометрии готовой детали. В промышленной практике трубогибное оборудование классифицируют по кинематической схеме процесса, типу привода, степени автоматизации и составу технологической оснастки. Такой подход является более информативным для выбора оборудования, чем классификация только по типу привода.

По типу привода применяются ручные, гидравлические, пневматические, электромеханические и сервоприводные системы. Ручное оборудование рационально преимущественно для единичных работ и трубопроводов, не требующих высокой повторяемости. Гидравлические машины позволяют развивать значительные усилия и применяются для гибки трубопроводов большого сечения и операций, где требуется повышенная силовая нагрузка. Электромеханические и сервоприводные станки обеспечивают программируемое управление перемещениями и углами, что особенно важно для пространственной гибки с несколькими последовательными переходами.

По кинематике деформирования трубопроводов выделяют оборудование для гибки: наматыванием, обкаткой, сжатием на двух опорах, вальцовкой и свободной многокоординатной гибки. Для тонкостенных трубопроводов малого и среднего диаметра в условиях высоких требований к повторяемости наиболее характерны станки для гибки по технологии наматывание с дорном [7, 9].

Выбор способа гибки трубопроводов и соответствующего трубогиба зависит от диаметра трубопровода, толщины стенки, материала, радиуса гибки, требуемой точности, качества поверхности, требуемого количества изогнутых деталей, повторяемости изделий и ряда других факторов.

Трубогибочные станки, работающие способом наматывания, наиболее часто используются для гибки трубопроводов в авиационной и космической промышленности, автомобилестроении, и других сферах машиностроения [26]. Такие трубогибы позволяют получить качественные гибы трубопроводов на малых радиусах (от 1,5 диаметра трубы) обеспечивая высочайшую повторяемость геометрии изделия.

Трубогибочный станок, работающий способом наматывания, может работать, как с дорном, так и без дорна.

Дорновые трубогибы позволяют деформировать тонкостенные трубы с радиусом изгиба от 2 диаметров трубы, а толстостенные - от 1,5 диаметра труб, без образования гофр, с качествомгиба отвечающим самым высоким стандартам атомной тепловой энергетики, космической и авиационной отрасли и общего машиностроения.

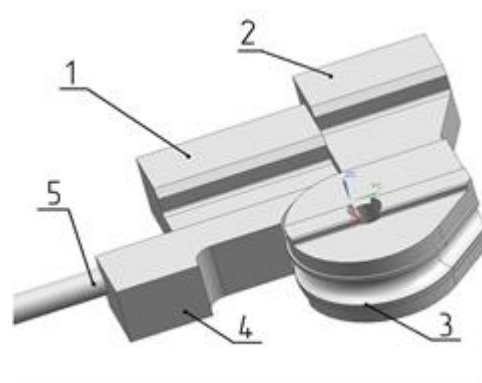
Дорновые трубогибы и дорновые трубогибочные машины (рисунок 1.2), работающие способом наматывания, позволяют гнуть тонкостенные трубы в разных плоскостях с прямым участком между гыбами от 1,5 диаметров трубы, а при наличии специальной оснастки прямой участок может быть сокращен до 0,1 диаметра трубы.

Оснастка для дорнового трубогиба с ЧПУ состоит из:

- Гибочного шаблона, с ручьем под конкретный типоразмер трубопровода, с жесткофиксированным диаметром шаблона;
- Дорн (может быть жестким или составным) под конкретный типоразмер и материал трубопровода;
- Зажим, с ручьем под конкретный типоразмер трубопровода;
- Выглаживатель под конкретный типоразмер трубопровода;



а



б

Рисунок 1.2 – а - автоматический трубогиб с ЧПУ;

б - Типовая оправка для гибки полых труб 5: 1- передний прижим, 2 – задний прижим, 3 – гибочный шаблон, 4 – выглаживатель

Выглаживатель (также называют складкодержатель) применим только для тонкостенных трубопроводов при маленьких радиусах гибки, под конкретный типоразмер трубы совмещенный с конкретным диаметром гибочного шаблона.

Основные технические характеристики трубогибочных станков:

- Диаметр изгибаемых трубопроводов, мм;
- Частота вращения гибочного шаблона, об/мин. (При наличии);
- Двигатель, В/Гц/Вт;
- Габаритные размеры ДхШхВ, мм;
- Время цикла при гибки на 180 в полуавтоматическом режиме, сек.;
- Масса без оснастки, кг.;
- Максимальный угол гибки, град

Особое значение для качества гибки имеет согласование геометрии всех элементов оснастки. Диаметр ручья гибочного шаблона, положение оправки, зазор между трубой и рабочими поверхностями, геометрия выглаживателя и режим перемещения инструмента должны соответствовать конкретному типоразмеру трубопровода. При нарушении этого соответствия даже технологически подходящая схема гибки, может приводить к повышенной овальности, утонению

стенки, гофрообразованию или пружинению.

Для пространственных трубопроводов дополнительно требуется согласование нескольких последовательных гибов. При этом важны длина прямых участков между соседними гибоми, взаимная ориентация плоскостей гибки и точность позиционирования трубопровода. Исследования автоматизированной гибки трубопроводов ГТД показывают, что обеспечение требуемой геометрической точности связано с одновременным учетом технологических параметров процесса и характеристик оборудования [27,28].

С учетом назначения настоящей диссертационной работы основным объектом анализа следует считать оборудование для холодной пространственной гибки трубопроводов методом наматывания с применением гибочного шаблона. При этом ключевым элементом, непосредственно определяющим геометрию криволинейного участка, является гибочный шаблон. Именно его изготовление из полимерного материала методом FDM и влияние его свойств на процесс формообразования рассматриваются в следующей главе.

1.4 Проблемы традиционного металлического гибочного шаблона

Для гибки трубопроводов обычно применяют гибочный шаблон, изготовленный из инструментальных сталей. Процесс гибки металлическим инструментом имеет ряд существенных недостатков.

Во-первых, изготовление гибочного шаблона из металла — один из самых дорогостоящих этапов подготовки производства, характеризующийся высокой трудоемкостью. Традиционный шаблон изготавливается механической обработкой на фрезерных станках из материалов Ст45 и 42CrMo4 с последующей термической обработкой (лазерной или индукционной закалкой до 60 HRC) и шлифовкой. Проведение всего комплекса операций требует дорогостоящего парка оборудования.

Во-вторых, применение металлического гибочного шаблона нередко приводит к образованию дефектов на поверхности трубопроводов в виде царапин, вмятин и задиров. Это особенно критично для тонкостенных трубопроводов из

стали, где даже незначительные поверхностные дефекты могут стать концентраторами напряжений и снизить ресурс трубопровода.

В-третьих, значительные временные и финансовые затраты на изготовление металлического гибочного шаблона делают его нецелесообразным при производстве малых партий деталей и в опытном производстве.

Таким образом для снижения себестоимости изготовления гибочного шаблона, а также сокращения сроков его производства находит применение гибочный шаблон, изготовленный из полимерного материала по технологии FDM имеющий необходимую прочность для гибки трубопроводов при опытных и мелкосерийных работах.

1.5 Аддитивные технологии в производстве гибочного шаблона. Сущность экструзивной FDM-технологии 3D-печати.

Технология FDM (Fused Deposition Modeling) предполагает послойное наплавление полимерной нити (филамента). Этот метод является максимально доступным и бюджетным, что делает его привлекательным для промышленного применения, особенно в сегменте малого и среднего бизнеса, НИОКР и образования.

Принципиальную схему технологии 3D-печати FDM (рисунок 1.3) можно описать следующим образом. Цифровая 3D-модель должна быть построена в программе САПР и экспортирована в формат .stl (Standard Tessellation Language). Затем используется программный модуль («слайсер»), который разбивает 3D-модели в формате .stl на тонкие слои 0,05-0,3 мм по горизонтали и задает управление FDM-машине. Параметрами печати являются: скорость печати, толщина слоя печати, заполнение, температура печати, ориентация слоев печати [29], поддерживающие структуры и т.д., все эти настройки устанавливаются и редактируются в программном обеспечении IdeaMaker. В процессе 3D-печати филамент выдавливается через сопло в полужидком состоянии и осаждается на предыдущий слой материала уже находящегося на платформе построения.

После того, как новый слой материала затвердевает на печатном объекте при

комнатной температуре, печатная платформа с печатным элементом опускается на высоту одного слоя материала, после чего будет напечатан следующий слой материала. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока вся модель не будет напечатана. После завершения печати, объект построения необходимо снять с платформы и удалить поддерживающие структуры.

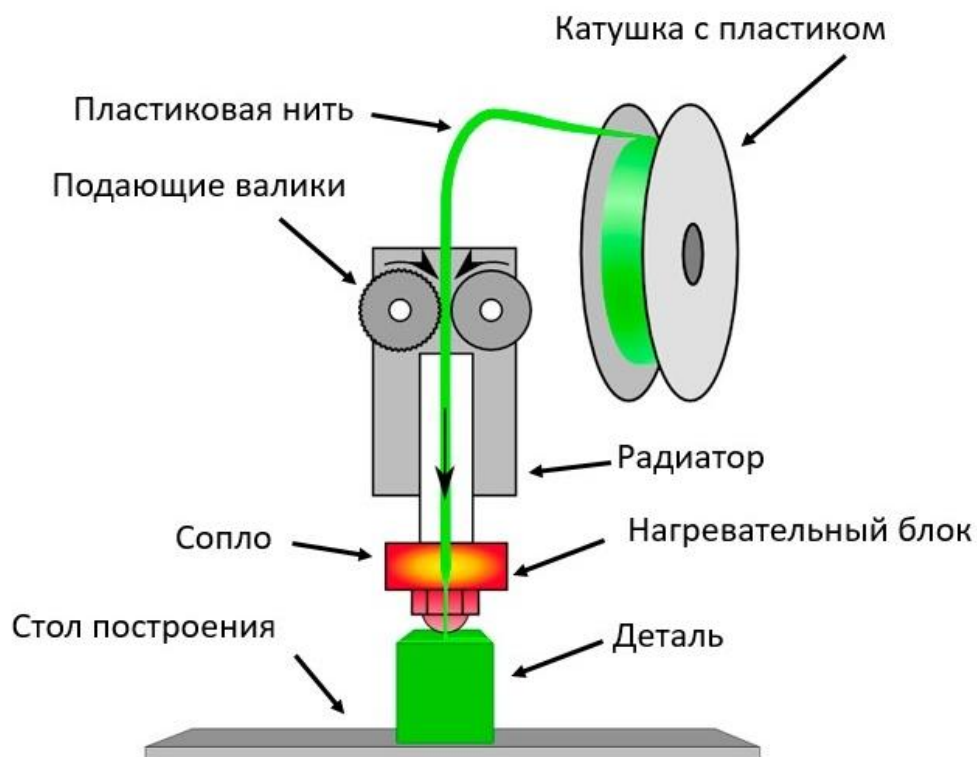


Рисунок 1.3 – Принципиальная схема технологии послойного наплавления FDM

Учитывая процесс изготовления, объект 3D-печати можно представить, как трансверсально-изотропный материал, а плоскость поперечной изотропии – это плоскость слоя материала.

К основным преимуществам использования технологии FDM относится:

- сокращение времени производства сложно-контурных изделий до 80%;
- быстрая переналадка на изготовления новой конфигурации изделия;
- сокращение массы изделия от 40 до 60% с сохранением физико-механических свойств;

- сокращение производственных издержек;
- повышение КИМ (коэффициент использования материала) до 95%;
- отсутствие необходимости применения оснастки.

Современные исследования подтверждают перспективность применения полимерного гибочного шаблона для формообразующих операций обработки металлов давлением. Особый интерес представляет возможность использования полимерного гибочного шаблона для гибки трубопроводов из стали 12Х18Н10Т. В настоящий момент существует большое количество различных материалов для 3D-печати требующих оценки их применения в качестве материала для изготовления гибочного шаблона.

1.6 Сравнительный анализ полимерных материалов для 3D-печати гибочного шаблона

Для изготовления гибочного шаблона необходимо рассмотреть весь спектр материалов, применяемых в экструзионной технологии FDM.

Одной из сильных сторон технологии FDM является широкий ассортимент доступных материалов. Они могут варьироваться от обычных полимеров [30-33] (таких как ПЛА и ABS) до инженерных (таких как, PA и TPU) и высокопрочных материалов (таких как PPS и PEEK) [34].

FDM-принтеры предназначены для печати пластмассами, которые обычно поставляются в виде филамента диаметром 1,75 мм, намотанных на катушки. Используемый материал напрямую влияет на механические свойства детали и точность 3D-печати, а также на ее цену. Ниже изображена пирамида материалов, наиболее доступных в 3D-печати по технологии FDM (рисунок 1.4).

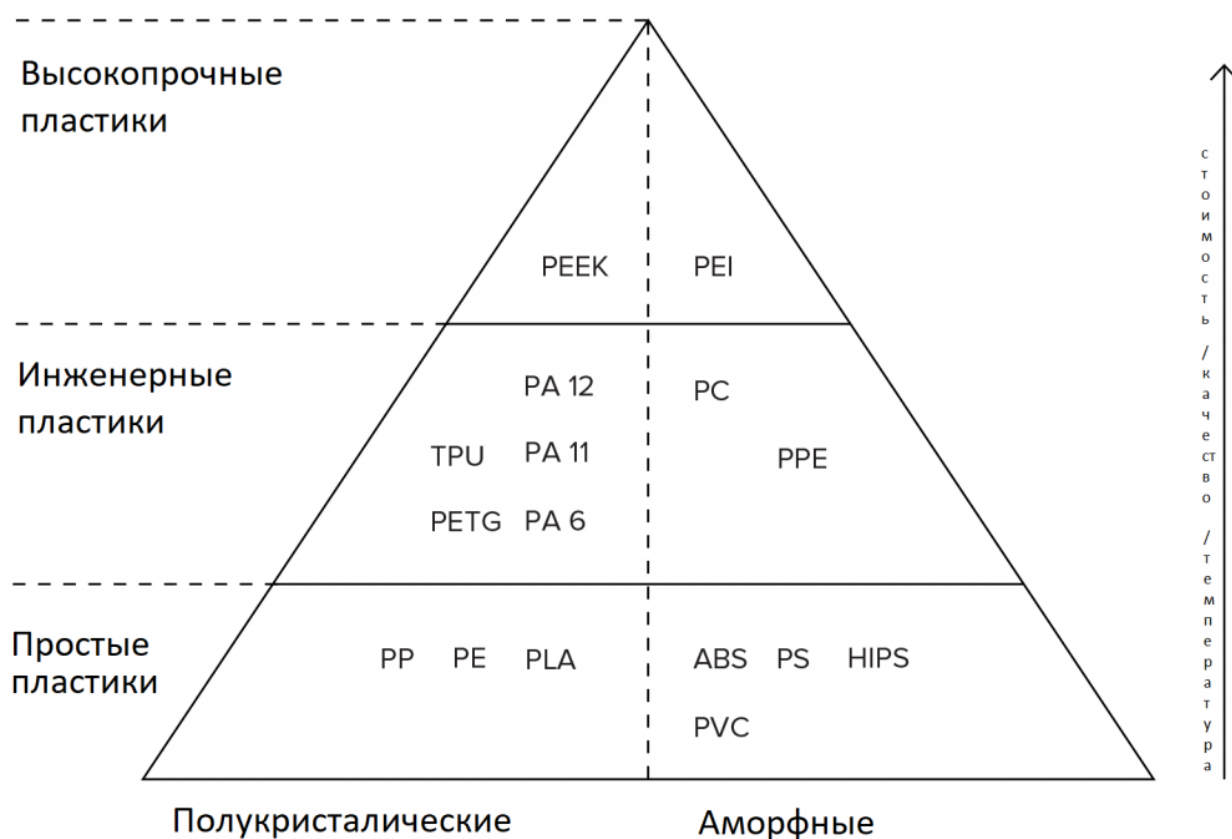


Рисунок 1.4 – Материалы, используемые при 3D-печати

Из всей номенклатуры материалов можно выделить следующие:

1. ПЛА – полилактид

Безусловный лидер современного рынка расходных материалов для FDM принтеров – экологичный, биосовместимый, термопластичный состав из органических растительных материалов, является биоразлагаемым материалом. Пластик обладает низким коэффициентом усадки при остывании, что очень важно при печати сборочных моделей или крупногабаритных изделий. Низкая температура плавления PLA пластика 180-190 °C обеспечивает стабильные размеры геометрии деталей. Высокий коэффициент скольжения ПЛА позволяет использовать его при изготовлении подшипников скольжения и втулок в различных малонагруженных механизмах. Предел прочности на разрыв достигает 65–70 МПа, прочность на изгиб — до 75 МПа [33,35]. Важным преимуществом ПЛА является минимальная усадка при печати (около 0,2%), что позволяет изготавливать размерно-точные детали без коробления.

2. *ABS – акрилонитрил бутадиен стирол*

Термостойкий пластик обладает высокими механическими свойствами. Устойчив к влаге, кислотам, маслу, обладает коррозионной стойкостью и термостойкостью, что позволяет использовать его в различных механизмах. Легок в постобработке. При помощи ацетоновой бани можно придать глянцевую поверхность. ABS пластику свойственна высокая степень усадки в процессе печати, что может приводить к возникновению трещин как во время так и после окончания построения изделия. Необходим подогрев рабочей платформы построения до 100 °С и закрытая камера построения принтера, создающая постоянную высокую температуру в области печати. Выделение паров акрилонитрила при печати ABS требует наличие вытяжки над рабочей зоной.

3. *РА – Нейлон*

Главные преимущества этого материала – низкая подверженность износу трением, благодаря чему он пользуется большой популярностью в различных отраслях промышленности, в частности, в виде покрытия как альтернатива или дополнение смазкам в узлах трения.

Нейлоновая нить представлена достаточно большим ассортиментом, каждая разновидность обладает своими преимуществами и недостатками. Наиболее популярными и практичными традиционно считаются нейлон-6. Его температура плавления составляет соответственно 265 °С, чем и определяются особенности их применения. Ключевые особенности – гигроскопичен, сплавляется с полиимидом, что требует особой тщательности при выборе принтера, для более надежной фиксации с рабочим столиком следует использовать пропитанную воском липкую ленту. Рекомендован для заправки принтеров с шипованными протягивающими механизмами в составе экструдеров, а также для печати цельных моделей, так как детали из нейлона между собой склеиваются очень плохо.

4. *РС – поликарбонат*

Главные преимущества поликарбонатной пластиковой нити – высокая прочность и температурная стойкость, его можно охлаждать и нагревать без риска деформации готового объекта, чего нельзя сказать о самом процессе печати.

Температура плавления материала составляет 265°C, требования к безопасности и риски деформации во время построения модели поможет оптимизировать оборудование с закрытой камерой печати и подогреваемой платформой. Сразу следует обратить внимание и на риски – печать этим материалом вредна для здоровья, так как в процессе его производства используются бисфенол, потенциально канцерогенное и токсичное вещество.

5. *PP – полипропилен*

Универсальный и недорогой материал, применяемый для производства широкого спектра пластиковых изделий – от посуды и упаковки до труб и фитингов. К преимуществам PP относят невысокий удельный вес, химическую стойкость, нетоксичность, влагонепроницаемость, износостойкость и дешевизну. Неустойчив при постоянном контакте с прямыми солнечными лучами и температурами ниже -5°C. Усадка при печати достигает 2,4% — это в 3 раза больше, чем при использовании ABS. Расплавленный материал отлично прилипает даже к холодной поверхности, но для высококачественной печати рекомендуется использовать оборудование с подогреваемой платформой.

6. *eFlex/TPU – термопластичный полиуретан*

Светлый упругий материал, который выдерживает высокие, по сравнению с ABS-пластиком, нагрузки при кручении и растяжении. Гигроскопичен, способен впитывать влагу, находясь в сыром помещении. Перед длительным хранением материала, его следует запечатать в вакуумный пакет с поглотителем влаги. Изделия из FLEX-пластика можно стерилизовать, сваривать, механически обрабатывать, окрашивать, печатать, разрезать. Материал устойчив к высоким температурам, а при комнатной температуре обладает хорошей устойчивостью к едким средам. В ароматических углеводородах, например, бензоле и толуоле, TPU разрушается при комнатной температуре. Изделия из TPU растворяются в ацетоне, метилэтилкетоне и циклогексаноне, метилпирролидине и тетрагидрофуране. К смазочным жирам и моторным маслам изделия из TPU устойчивы даже при высоких температурах.

7. PETG — полиэтилентерефталат

Главное его преимущество – высокая химическая стойкость, он неподвержен разрушительному воздействию широкого спектра кислот и щелочей, устойчив к износу и широкому диапазону температур ($-40^{\circ}\text{C} \dots +75^{\circ}\text{C}$). Усадка при остывании составляет порядка 2%, что в комплексе с высокой температурой плавления, достигающей, 260°C , делает процесс печати несколько проблематичным. Прозрачность изделия достигает быстрым охлаждением модели до порога стеклования ($+70-80^{\circ}\text{C}$). В целом для получения стабильно качественного результата достаточно создать такие же условия, как при печати ABS.

8. Материал растворимой поддержки HIPS

Это полистирол с удивительным ресурсом прочности, используемый для производства реальных деталей и комплектующих, используемых в различных отраслях промышленности в условиях реальной эксплуатации. Также применяется для изготовления игрушек, одноразовой посуды, целого ряда строительных материалов. По физическим свойствам (прочности и стойкости) схож с ABS пластиком, однако легко растворяется в лимонене. Эта черта позволяет использовать его в качестве материала поддержки при печати изделий из ABS пластика, в сравнении с PVA обладает гораздо меньшей стоимостью и абсолютной нечувствительностью к воде.

9. PA- CF – Нейлон угленасыщенный

Это композитный FDM-материал на основе нейлона, армированный короткими углеродными волокнами, что обеспечивает ему исключительную жесткость, прочность и легкость (близкую к алюминию при меньшей плотности). Благодаря низкой усадке и высокой термостойкости (до 150°C), он идеально подходит для печати функциональных деталей, работающих под нагрузкой в аэрокосмической, автомобильной промышленности и робототехнике. Однако материал требует использования износостойкого сопла из-за абразивности волокна, тщательной сушки перед печатью и не подходит для электроизоляции из-за электропроводности углеродного наполнителя.

При выборе материала для изготовления гибочного шаблона необходимо учитывать следующие требования:

- Отсутствие деформаций формы со 100% заполнением при остывании;
- Высокое качество поверхности изделий и механические характеристики;
- Низкая температура плавления.

Таблица 1.1 – Обобщенные параметры материалов, используемых в FDM технологии

Материал /Свойства	ПЛА	ABS	PETG	PC	PA	PA-CF	PEEK
Плотность материала, г/см ³	1,25	1,06	1,23	1,12	1,12	1,4	1.3
Температура стеклования, °C	62	73	64	80	50	190	152
Температурный диапазон 3D-печати, °C	205- 225	245- 260	220- 240	240- 260	235- 260	260- 300	380- 410
Прочность на разрыв, МПа	65	40	49	57	57	173	100
Прочность на изгиб, МПа	75	68	60	57	57	171	170
Усадка, %	0,2	1	0,5	1,5	1-2	1,5	1-3
Модуль упругости на изгиб, МПа	2102	2443	1170	1495	1495	5612	3500
Относительное удлинение при разрыве, %	12	30	280	196	196	9	40
Стоимость за 1 кг, руб (2025-2026 год)	1 490	1 900	2 050	5 800	4 200	8 500	80 000

Сравнительные исследования механических свойств показывают, что ПЛА демонстрирует более высокую прочность на растяжение по сравнению с ABS и PETG, низкую усадку среди всех полимеров и низкую температуру печати (205 - 225 °C). Температура стеклования ПЛА составляет 60–65 °C, что упрощает его термическую обработку. Кроме того, за счет увеличения пластичности в процессе термической обработки у ПЛА снижается склонность готовых изделий из этого пластика к хрупкости.

Использование ПЛА в качестве материала для изготовления по технологии FDM гибочного шаблона, работающего в условиях статического нагружения, является преимущественным.

1.7 Повышение прочностных свойств полимеров

Термическая обработка полимерных материалов является одним из важных технологических процессов всего комплекса переработки полимеров [36]. Даже в том случае, когда к изделию из пластмасс не предъявляются требования высокой прочности или износостойкости, для снятия внутренних напряжений, образующихся при изготовлении любой детали, необходимо проводить термическую обработку.

Рациональной термической обработкой термопластических кристаллизующихся полимерных материалов можно повысить плотность, твердость, молекулярную массу, предел прочности при растяжении и сжатии, ударную вязкость, износостойкость и стабильность геометрических размеров деталей в процессе их эксплуатации [36].

Эффективность термической обработки зависит от всего цикла температурных режимов в процессе изготовления изделия из полимеров. Для полимеров так же, как и для металлов применяют четыре вида термической обработки: закалка, отжиг, нормализация и отпуск. Термическая обработка полимеров в узком смысле слова - это нагрев детали до определенной температуры, выдержка и охлаждение с целью получения требуемых свойств. Основными факторами воздействия [36] при термообработке служат температура и время,

поэтому любой вид термической обработки можно представить в координатах: температура T , время τ (рисунок 1.5).

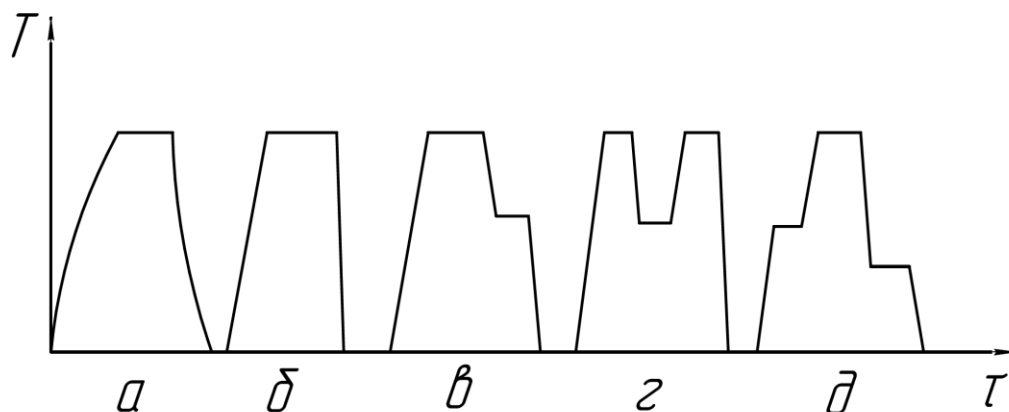


Рисунок 1.5 – Диаграммы режимов термической обработки полимеров

На диаграмме режимов термической обработки полимеров графически изображены типовые кривые, иллюстрирующие изменение температуры материала во времени:

1. **Простой режим (а и б)** — плавный нагрев до $T_{\text{макс}}$, выдержка при этой температуре, затем охлаждение.
2. **Ступенчатый нагрев или охлаждение (в)** — температура повышается или понижается ступенями с промежуточными изотермическими участками.
3. **Прерывистый режим (г)** — нагрев, затем частичное охлаждение, снова нагрев и т. д.
4. **Комбинированный режим (д)** — например, выдержка в масле, затем частичное охлаждение на воздухе и последующее погружение в горячую воду ($\sim 98^\circ\text{C}$) для насыщения влагой.

Режим термической обработки характеризуется максимальной температурой нагрева $T_{\text{макс}}$; временем выдержки τ материала при этой температуре; скоростью нагрева $V_{\text{н}}$ и скоростью охлаждения $V_{\text{о}}$ материала. Режим термической обработки может быть сложным, состоящим из двух или нескольких нагревов, прерывистого и ступенчатого нагрева (охлаждения). Термическая обработка может быть

комбинированной, когда деталь после выдержки в масле при определенной температуре несколько охлаждается, а затем погружается в воду с температурой 98 °С для насыщения влагой.

Закалка - нагрев полимера до заданной температуры с последующим быстрым охлаждением (в воде). Закалку полимеров применяют в тех случаях, когда требуется значительно понизить степень кристалличности термопластичных полимеров и получить аморфную структуру. Полимеры обладают различной скоростью кристаллизации. Чем выше скорость кристаллизации, тем быстрее охлаждают изделия. Легко проводить закалку полимеров с небольшой скоростью кристаллизации, например фторопласт-4 и поликарбонат. Очень сложно проводить закалку полиамида; промежуточное положение занимает фторопласт-3.

Закаленные полимеры, содержащие значительные области аморфной фазы, отличаются по своим физико-механическим свойствам. При закалке снижается плотность, твердость, хрупкость и модуль упругости, но значительно увеличивается относительное удлинение при разрыве. Температура нагрева под закалку составляет 80-90 % от температуры плавления полимера, охлаждение производят в холодной воде (5-8 °С), в масле или на воздухе [36].

Отжиг - нагрев полимера до температуры 75-90 % от температуры плавления с последующим медленным охлаждением. Отжиг может производиться из горячего состояния. Например - деталь из поликапроамида, отлитая под давлением, сразу после извлечения из прессформы помещается в горячую среду и охлаждается медленно вместе со средой).

Отжиг полимерных деталей способствует рекристаллизации материала, позволяет получить в кристаллических термопластах оптимальную кристаллическую структуру, а в реактопластах - высокую степень отверждения. Отжигом в инертной жидкости при температуре немного ниже (на 20-30 °С) температуры плавления в течение определенного времени можно достигнуть эффективной перекристаллизации. Отжиг способствует образованию кристаллической надмолекулярной структуры, повышению плотности, твердости, молекулярной массы, износостойкости полимерного материала, жесткости

деталей, снижению ударной вязкости и увеличению стойкости водопоглощения.

Нормализацией - называют термическую обработку, которая состоит в нагреве полимера до температуры на 20 –30 °С выше температуры стеклования с последующим медленным охлаждением.

Нормализацию применяют для снятия внутренних напряжений, образовавшихся в процессе изготовления деталей. На физико-механические свойства она влияет незначительно.

Нормализация деталей из полиамидных смол, например, выполняется кипячением в воде. Время кипячения выбирают в зависимости от толщины стенок деталей. Кипячение деталей из полиамидов в воде в течение 7 часов, мало влияя на структуру полимера, снижает его твердость и предел прочности, но повышает ударную вязкость до 85-90 КДж/м².

Отпуск - процесс, включающий нагрев полимерных деталей в инертной среде до температуры ниже критической точки данного полимера с последующим медленным охлаждением. Хувинк и Ставерман считают, что отпуск - это повторный нагрев полимерной детали до температуры эластичности (несколько ниже температуры плавления) с последующим медленным охлаждением до 50 °С. Отпуск проводят для стабилизации и снижения внутренних напряжений до величины, которой можно пренебречь. Известны данные об успешном применении отпуска сильфонов, изготовленных из полипропилена. Термообработку проводили в минеральном масле МС-20 при температуре 60-65 °С с выдержкой в течение 1 часа и последующим медленным охлаждением до 20 °С. В результате такого отпуска значительно снизилась жесткость сильфонов, и усилие, необходимое для их сжатия, уменьшилось почти вдвое.

Вид режима термической обработки зависит от типа полимерного материала, конструкции деталей и условий ее эксплуатации. На основе обобщения отечественного и зарубежного опыта составлены рекомендации по применению термической обработки некоторых кристаллических термопластичных полимерных материалов (таблица 1.2) [37].

Температурой термической обработки (закалки, отжига) для

кристаллических термопластов является температура максимальной скорости кристаллизации. Теоретический интервал кристаллизации находится между температурами плавления и стеклования. Выдержка деталей при выбранной температуре с целью ускорения процесса релаксации в готовых изделиях, имеющих внутренние напряжения, зависит от молекулярной массы, надмолекулярной структуры и температуры термической обработки [36]. С увеличением молекулярной массы время выдержки возрастает [38].

Таблица 1.2 – Рекомендуемые виды термической обработки кристаллических термопластов

Полимер	Вид термической обработки			
	Закалка	Отжиг	Нормализация	Отпуск
Полиамиды	-	+	+	-
Полиэтилен	+	+	-	-
Полилактид	-	+	+	+
Полипропилен	+	+	-	+
Полистирол	-	+	-	-
Фторопласт-3	+	-	-	-
Фторопласт-4	+	-	-	+
Полиформальдегид	+	+	+	-
Поликарбонат	-	+	-	-

Несмотря на свою универсальность, низкая температура стеклования и медленная кинетика кристаллизации ПЛА ограничивают его механические и термические свойства. Картал и Каптан [39] показали, что термическая обработка ПЛА при 85°C в течение 90 мин приводит к увеличению прочности на растяжение

на 48% и модуля упругости на 78%. Пажаманил и др. [40] сообщили, что термическая обработка ПЛА при 95°C в течение 60 мин улучшил предельную прочность при растяжении на 25,26% и прочность на сжатие на 21,87%. Чен и др. [41] проанализировали фазовые переходы кристаллов ПЛА после термической обработки и обнаружили увеличение кристалличности на 25%. Джаянт и др. [42] отметили, что термическая обработка при 80°C увеличил прочность ПЛА на растяжение на 20% и вязкость разрушения на 15%, но привел к снижению эластичности на 10%. Виндхайм и др. [43] исследовали влияние термической обработки на кристаллизацию и пористость ПЛА, показав, что скорость кристаллизации увеличилась с 4,1% до 11,7% при 80°C и достигла 43,6% при 95°C. Однако, несмотря на это повышение кристалличности, значительного улучшения механической прочности не наблюдалось. Это было объяснено недостаточной совместной кристаллизацией между слоями нити, что указывает на то, что повышенная кристалличность ограничивалась слабым межслойным сцеплением. Зисопол и др. [44] показали, что термическая обработка при 75°C в течение 3 часов увеличила прочность ПЛА на растяжение на 30% и прочность на изгиб на 15%.

Таким образом исследования авторов [39-44] по изучению влияния термической обработки на механические свойства ПЛА демонстрируют увеличение его прочностных свойств и изменение микроструктуры.

1.8 Применение полимерного инструмента в формообразующих операциях

Развитие аддитивного производства привело к расширению области применения полимерных материалов от изготовления прототипов и модельных изделий до производства функциональной технологической оснастки. В настоящее время полимерные изделия, получаемые методом 3D-печати FDM и другими технологиями аддитивного производства, применяются для изготовления пуансонов, матриц, оправок, дорнов, шаблонов, литейной модельной оснастки и других элементов технологической оснастки [45,46-51]. Основными предпосылками такого применения являются сокращение сроков изготовления, снижение затрат на подготовку производства, возможность оперативного

изменения геометрии инструмента и экономическая целесообразность при опытном, индивидуальном и мелкосерийном производстве [52–61].

Для рассматриваемой диссертационной работы особый интерес представляет применение полимерного инструмента непосредственно в операциях обработки металлов давлением [46-49]. Наиболее близким к исследуемой задаче является работа S. Tronvoll и соавторов [52], в которой рассмотрена гибка алюминиевых труб на трубогибочном станке с использованием гибридного дорна: металлический стержень выполняет несущую функцию, а наружная геометрически сменная втулка изготовлена методом FDM из ПЛА. Эксперименты показали, что такая конструкция позволяет уменьшить сплющивание поперечного сечения и гофрообразование труб при одновременном снижении затрат и сроков изготовления оснастки [52]. Данный результат принципиально важен для настоящего исследования, поскольку подтверждает возможность использования ПЛА не только в качестве модельного материала, но и в качестве рабочего элемента трубогибочной оснастки.

Другим направлением является применение полимерных пуансонов и матриц при гибке листового металла. L. Giorleo и K.I. Deniz исследовали инструмент из нейлона [55], армированного углеродным волокном, для гибки листов из коррозионностойкой стали. При этом оценивалось влияние ориентации печати на деформацию инструмента и точность получаемой детали. Несмотря на наличие остаточной деформации полимерного инструмента, достигнутая геометрическая точность деталей находилась в пределах 0,5 %, что подтверждает перспективность полимерной оснастки для опытного и мелкосерийного производства [55].

В работе N. Nakamura [56] и соавторов исследовано V-образное гибочное формообразование металлических листов с применением пуансона и матрицы, изготовленных методом FDM из PLA. С использованием цифровой корреляции изображений установлены распределения деформаций непосредственно в процессе формообразования. Показано, что при проектировании полимерного инструмента необходимо учитывать его меньшую по сравнению с инструментальной сталью жесткость и выбирать геометрию с учетом допускаемой деформации инструмента

[56]. Полученные результаты подтверждают необходимость исследования напряженно-деформированного состояния полимерного гибочного шаблона, выполненного в настоящей диссертационной работе.

Полимерный инструмент также применяется при вытяжных операциях. L. Giorleo и E. Ceretti исследовали пуансоны, изготовленные методом FDM из полимерного материала с коротким углеродным волокном, при глубокой вытяжке алюминиевых заготовок. Экспериментально показана возможность получения серии деталей с применением полимерного инструмента, при этом изменение геометрии пуансона вследствие упругой и пластической деформации необходимо учитывать при оценке точности процесса [53,54]. Более поздние исследования рассматривают комбинированные системы «полимерный–металлический инструмент» при вытяжке стали AISI 304, что показывает целесообразность использования гибридных конструкций в случаях повышенной нагрузки на оснастку [57].

В 2025 г. исследована также сухая глубокая вытяжка алюминиевых и стальных листов полимерным инструментом на основе полиамида, армированного короткими углеродными волокнами. При испытаниях до 50 циклов установлено, что характер деформации инструмента существенно зависит от материала заготовки: при формообразовании алюминия точность сохранялась лучше, чем при формообразовании нержавеющей стали. Результаты моделирования методом конечных элементов согласовались с экспериментальными наблюдениями [58]. Эти данные дополнительно подтверждают, что область рационального применения полимерной оснастки определяется не только прочностью материала, но и уровнем силовой и температурной нагрузки конкретной операции.

Отдельное направление связано с применением полимерных композиционных материалов для модельной оснастки литейного производства. D.V. Sukhorukov и соавторы исследовали полиуретановые композиции с металлическим наполнителем для повышения износостойкости модельной оснастки. Для композита с 1 % железного наполнителя получены низкие значения коэффициента трения и массового износа, что показывает перспективность

наполненных полимерных материалов для оснастки, работающей в условиях контактного и абразивного воздействия [59].

Таким образом, анализ современных исследований показывает, что полимерный инструмент, изготовленный методами аддитивных технологий, уже применяется в нескольких классах формообразующих операций: гибке трубопроводов, V-образной гибке листа, глубокой вытяжке, а также при изготовлении модельной и литейной оснастки. При этом для большинства исследований характерна ориентация на опытное и мелкосерийное производство. Ограничивающими факторами остаются деформация и износ полимерного инструмента, а также зависимость механических свойств от материала, ориентации слоев печати, межслойной адгезии, плотности заполнения и последующей термической обработки [52–59].

Для настоящей диссертации принципиальным является то, что наиболее близкий опубликованный зарубежный пример относится именно к гибке труб с применением PLA-инструмента [52]. Однако исследуемая в диссертации задача отличается материалом трубопровода, диапазоном диаметров, конструкцией рабочего гибочного шаблона, условиями нагружения и комплексом исследуемых параметров точности. Поэтому результаты зарубежных работ следует рассматривать как подтверждение принципиальной реализуемости концепции, но не как готовые технологические рекомендации для гибки трубопроводов из стали 12X18H10T.

Современная практика показывает, что аддитивное производство целесообразно прежде всего в тех случаях, когда традиционная металлическая оснастка требует значительных затрат на проектирование и механическую обработку, а требуемое количество деталей недостаточно для окупаемости такого инструмента. При этом экономический эффект формируется не только стоимостью материала, но и сокращением количества технологических операций, времени подготовки производства и трудоемкости изготовления.

Особенно перспективны конструкции, в которых полимер выполняет функцию формообразующего или контактного элемента, а металлическая часть

воспринимает основную силовую нагрузку. Такой принцип реализован в гибридном дорне для гибки труб [52] и в комбинированных комплектах инструмента для глубокой вытяжки [57]. Для настоящего исследования этот подход представляет интерес как направление дальнейшего повышения стойкости полимерного гибочного шаблона без отказа от преимуществ 3D-печати.

Важным практическим преимуществом FDM является цифровой характер подготовки производства. После изменения 3D-модели рабочей поверхности возможно изготовление нового варианта инструмента без разработки нового комплекта технологической оснастки. Это особенно актуально для авиационного производства, где требуется изготовление большого количества различных пространственных трубопроводов небольшими партиями.

Для авиационной промышленности особенно важна возможность изготовления специализированной оснастки без длительного изготовления металлического инструмента. Однако наличие промышленных примеров применения аддитивного производства само по себе не означает возможности непосредственной замены металлического инструмента полимерным. Для каждой операции необходимо экспериментально подтвердить прочность, стойкость и соответствие геометрических параметров изделия.

1.8.1 Развитие отечественных исследований по применению полимерных инструментов

Значительный вклад в развитие отечественной научной базы по применению полимерных материалов для формообразующего инструмента вносят исследования коллектива ученых Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых под руководством Д.В. Сухорукова и соавторов. В работе, опубликованной в 2025 году, рассматривается возможность использования полимерных композиционных материалов на основе полиуретановой матрицы с добавлением металлических наполнителей для изготовления модельной оснастки с повышенными показателями износостойкости [45].

На государственном уровне актуальность развития аддитивных технологий подтверждается действующей Стратегией развития аддитивных технологий в Российской Федерации до 2030 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 14.07.2021 № 1913-р и актуализированной распоряжением от 21.10.2024 № 2963-р [61]. Стратегия предусматривает развитие отечественных оборудования и материалов, научно-технического потенциала и промышленного применения аддитивных технологий.

Практические кейсы применения аддитивных технологий для производства полимерной оснастки активно внедряются в различных отраслях российской промышленности.

В авиационной промышленности, как отмечается в материалах ИННОПРОМ-2025, при производстве двигателя ПД-8 используется более 20 печатных компонентов, что свидетельствует о высоком уровне доверия к аддитивным технологиям в ответственных отраслях [62].

В сфере промышленного производства компания «Свеза» из Санкт-Петербурга внедряет аддитивные технологии для изготовления деталей-шаблонов и оснастки, что позволяет оптимизировать производственные процессы.

Таким образом, зарубежный и российский опыт однозначно свидетельствует, что полимерный инструмент, изготовленный методами аддитивных технологий, является жизнеспособной низкозатратной альтернативой традиционной металлической оснастке для операций обработки металлов давлением. Основная область применения — прототипирование, мелкосерийное производство, быстрое переналаживание и научно-исследовательские работы. Для тяжёлых условий серийного производства рекомендуется использовать комбинированные или армированные конструкции инструмента.

Проведенный анализ отечественных исследований и практических разработок позволяет сделать следующие выводы, важные для обоснования актуальности настоящей диссертационной работы:

1. В России сформирована научная база по разработке полимерных композиционных материалов для формообразующей оснастки, что подтверждается

работами ученых Владимирского государственного университета и других научных коллективов [60].

2. Промышленные предприятия активно внедряют аддитивные технологии для производства оснастки, что подтверждается практическими кейсами в авиастроении, автомобилестроении и других отраслях [63-68].

3. Государственная поддержка развития аддитивных технологий, реализуемая в рамках Стратегии развития аддитивных технологий до 2030 года и национального проекта «Средства производства и автоматизации», создает благоприятные условия для внедрения результатов научных исследований в промышленную практику [63-68].

Несмотря на наличие отдельных исследований в области полимерных композитов и аддитивного производства оснастки, системные работы, посвященные применению полилактида для изготовления гибочного шаблона при гибке трубопроводов из стали 12X18H10T, в отечественной научной литературе представлены недостаточно. Это подтверждает актуальность и научную новизну настоящего диссертационного исследования.

1.9 Актуальность применения полилактида для изготовления гибочного шаблона

Проведенный анализ показывает, что применение полимерного инструмента в операциях обработки металлов давлением является сформировавшимся научно-техническим направлением. Вместе с тем наиболее исследованы операции листовой штамповки и глубокого вытягивания, тогда как применение FDM-инструмента непосредственно для пространственной гибки тонкостенных трубопроводов исследовано существенно меньше. Наиболее близкая зарубежная работа посвящена гибридному ПЛА-дорну для гибки алюминиевых труб [52].

Первым фактором актуальности является необходимость сокращения сроков подготовки производства гибочных операций. Металлический гибочный шаблон требует выполнения комплекса операций механической обработки и, в зависимости от конструкции и требований к стойкости, термической и финишной

обработки. При малой партии трубопроводов доля затрат на изготовление оснастки в себестоимости единицы продукции возрастает. Аддитивное изготовление полимерного шаблона по технологии FDM позволяет перейти от последовательной механообработки к цифровому изготовлению изделия непосредственно по трехмерной модели.

Вторым фактором является возможность снижения риска повреждения поверхности трубопровода. Полимерный гибочный шаблон имеет существенно меньшую твердость (до 35 HV) по сравнению с инструментальной сталью, что потенциально уменьшает вероятность образования царапин и задиrow. Однако это преимущество нельзя считать безусловным: геометрическая стабильность и чистота поверхности полимерного гибочного шаблона должны сохраняться в течение всего заданного ресурса, а возможный износ необходимо контролировать экспериментально.

Третьим фактором является возможность управления свойствами ПЛА посредством параметров 3D-печати и последующей термической обработки. Исследования показывают зависимость прочности и деформационных характеристик печатных изделий от ориентации слоев, температуры и режима термической обработки [69-75,79-85]. Для гибочного шаблона это создает возможность целенаправленного формирования анизотропной структуры материала в соответствии с направлением действующих нагрузок.

Четвертым фактором является область рационального применения. Полимерный гибочный шаблон не следует рассматривать как универсальную замену металлического инструмента. Его наиболее обоснованное применение связано с опытным и мелкосерийным производством, разработкой новых трубопроводов, изготовлением технологических образцов и ситуациями, когда требуется быстрое получение нескольких вариантов оснастки. Для крупносерийного производства и высоких нагрузок более перспективными могут быть армированные или гибридные конструкции [52,57,58].

Таким образом, актуальность применения ПЛА определяется не только низкой стоимостью материала или доступностью аддитивной технологии FDM, а

сочетанием четырех факторов: сокращения сроков изготовления оснастки, возможности цифровой адаптации гибочного шаблона под новую геометрию, достаточных прочностных характеристик при рациональном формировании структуры 3D-печатной детали и отсутствия повреждений поверхности трубопроводов. При этом научной задачей остается установление количественных взаимосвязей между параметрами изготовления гибочного шаблона из ПЛА, его напряженно-деформированным состоянием, прочностью и геометрическими параметрами получаемых трубопроводов.

Выводы по 1 главе

На основании проведенного анализа литературных источников можно сделать следующие выводы:

1. Применение полимерного гибочного шаблона, изготовленного методом FDM, для гибки трубопроводов из стали 12X18H10T является перспективным направлением, позволяющим снизить себестоимость и трудоемкость его изготовления и сократить сроки подготовки производства, а также исключить дефекты поверхности изгибаемых труб.

2. Среди полимерных материалов, используемых для аддитивного производства оснастки, полилактид обладает необходимым сочетанием свойств для его применения: достаточной прочностью, минимальной усадкой, простотой печати и низкой стоимостью.

3. Существующие отечественные и зарубежные исследования подтверждающие принципиальную возможность применения полимерного инструмента для операций обработки металлов давлением, однако носят фрагментарный характер и не дают системных рекомендаций по выбору технологических параметров 3D-печати.

4. Отсутствие систематизированных данных о влиянии параметров 3D-печати и конструкции гибочного шаблона на его стойкость и качество готовых деталей, а также недостаточная изученность геометрических параметров после гибки трубопроводов полимерным инструментом.

В условиях все больше набирающего темпа производства авиадвигателей в нашей стране, решение задач по снижению затрат и времени на подготовку производства гибки трубопроводов из стали 12X18H10T на основе применения гибочного шаблона из полилактида имеет важное значение для авиационной промышленности и является актуальным направлением диссертационного исследования.

Цель работы: Определение методов совершенствования процесса гибки криволинейных трубопроводов из стали 12X18H10T с использованием гибочного шаблона из полилактида.

Основные задачи работы:

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.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Химический состав и свойства исследуемых материалов.

Исследования выполняли с применением бесшовных трубопроводов диаметром от 6 до 36 мм и толщиной стенки 1 мм из стали марки 12X18H10T, химический состав которой (% (мас.): Fe – осн., Cr – 18, Ni – 10, Ti – 0.7) таблица 2.1, поставляемые по ГОСТ 9941-2022 [86].

Таблица 2.1 – Химический состав стали 12X18H10T, вес.%

Fe	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	Cu	Ti
основа	< 0,12	0,8	<2,0	9,0-11,0	<0,02	<0,035	17,0-19,0	<0,2	<0,3	0,4- 0,8

Материалом для изготовления гибочного шаблона был выбран полимер полилактид (ПЛА). ПЛА это термопластичный полиэфир, мономером которого является молочная кислота. Производитель ПЛА приводит следующие основные свойства: температура плавления 170-180 °С, температура стеклования 60 °С, относительное удлинение при разрыве 12%, предел прочности на разрыв 60 МПа, модуль упругости 2102 МПа, плотность 1,23-1,25 г/см³ и усадка после печати 0,2% таблица 2.2.

Таблица 2.2 – Основные свойства ПЛА

№ п/п	Величина	Значение
1	Температура плавления, °С	173
2	Температурный диапазон печати, °С	205-225
3	Температура стеклования, °С	60 - 65
4	Относительное удлинение при разрыве, %	12
5	Предел прочности на разрыв, МПа	60
6	Модуль упругости на изгиб, МПа	2102

№ п/п	Величина	Значение
7	Плотность, г/см ³	1,23—1,25
8	Усадка, %	0,2

2.2 Методы исследования образцов

Для комплексного исследования и прогнозирования свойств трубопроводов из стали 12Х18Н10Т диаметром 6-36 мм и толщиной стенки 1 мм после гибки формообразующим гибочным шаблоном из ПЛА изготовленным методом 3D-печати по технологии FDM были изготовлены образцы для лабораторных исследований и гибочные шаблоны для гибки трубопроводов. Для повышения эффективности технологии гибки на автоматическом трубогибочном станке с ЧПУ были применены нижеследующие методы исследования.

2.2.1 Методика изготовления образцов и гибочных шаблонов

Для определения реологических свойств и угла разрушения θ ПЛА были изготовлены образцы в количестве 140 единиц для испытания на растяжение согласно действующему стандарту ГОСТ 33693-2015 [87] (рисунок 2.1).

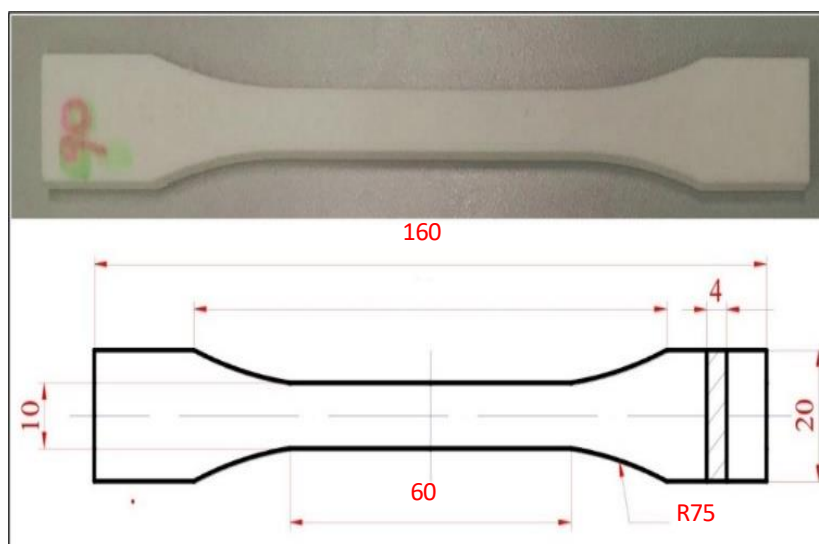


Рисунок 2.1 – Образец ГОСТ 33693-2015

Образцы из ПЛА изготавливались методом 3D-печати по технологии FDM на 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 (рисунок 2.2).

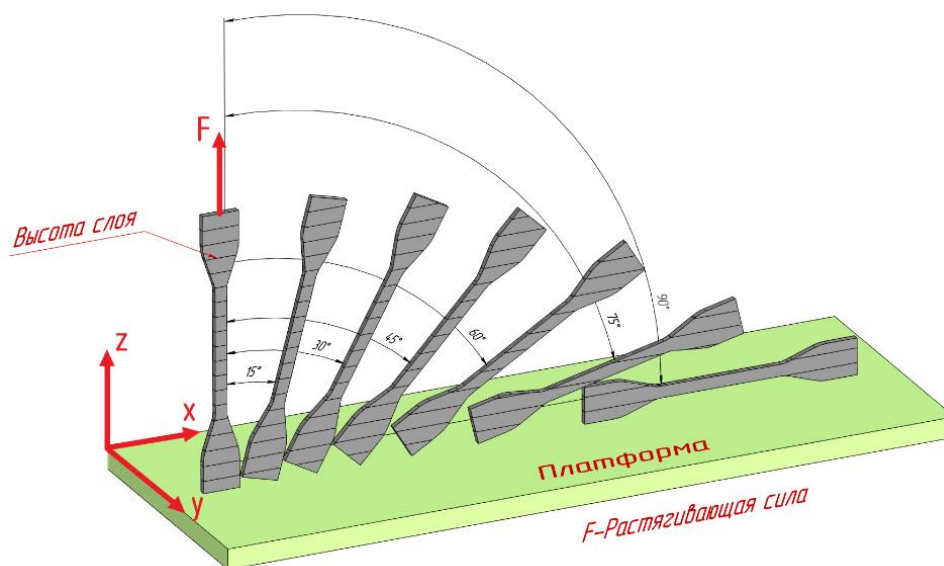


Рисунок 2.2 – Ориентация образцов на платформе построения.

Матрица экспериментов по исследованию реологических свойств ПЛА и угла разрушения представлена в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Матрица экспериментов по исследованию реологических свойств ПЛА

Высота слоя	Количество образцов при угле печати α , $^\circ$						
	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

Влияние термической обработки на механические характеристики ПЛА изучали на образцах, испытанных на растяжение (см. рисунок 2.3, а) двух типов: выращенных горизонтально на рабочей платформе под углом 0° и вертикально

относительно платформы под углом 90° и образцах на сжатие диаметром и высотой 10 мм (рисунок 2.3, б).

Образцы на растяжение были изготовлены по технологии FDM из материала ПЛА согласно ГОСТ 33693-2015 [87], уменьшенного масштаба (тип A12) (рисунок 2.3, а).



а б
Рисунок 2.3 – Образцы на растяжение (а) и сжатие (б)

Образцы для определения механических свойств ПЛА и гибочные шаблоны для гибки трубопроводов были изготовлены на 3D-принтере Raise3D Pro2 Plus по технологии FDM (рисунок 2.4). Для 3D-печати создавали 3D-модели образцов и гибочных шаблонов в формате *.prt при помощи системы автоматизированного проектирования NX 12, которые экспортировали в формат *.stl для последующей 3D-печати по технологии FDM.



Рисунок 2.4 – FDM принтер Raise 3D Pro2 Plus

Технические характеристики, размер области построения, точность печати, скорость перемещения экструдера и рабочая температура сопла FDM принтера Raise 3D Pro2 Plus указаны в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Характеристики FDM принтера Raise 3D Pro2 Plus

№п/п	Параметр	Значение
1	Технология печати	FDM
2	Диаметр нити	1.75 мм
3	Тип материала	ABS, ПЛА , PETG и другие
4	Температура подогрева площадки	до 110 °С
5	Точность позиционирования по оси XY	0.0125 мм
6	Точность позиционирования по оси Z	0.025 мм
7	Высота слоя	0,01-0,03 мм
8	Диаметр сопла (мм)	0.4
9	Рабочая температура экструдера	до 300 °С
10	Скорость перемещения экструдера	30-150 мм/с

Режимы печати образцов и гибочного шаблона на 3D-принтере Raise 3D Pro2 Plus составляли следующие параметры: температура сопла – 205 °С, температура рабочего стола – 60 °С, скорость заполнения 80 мм/с, диаметр сопла – 0,4 мм, высота слоя печати – 0,2 мм, толщина стенки – 6 мм, обдув – 100 %, плотность заполнения – 100%, тип заполнения сетка [117].

2.2.2 Методика исследования микроструктуры ПЛА.

С целью изучения структурных изменений проводили микроструктурные исследования. Для создания микрошлифов использовались образцы, подвергнутые охлаждению до -20 °С с последующей разрезкой поперек направления слоев

3D-печати (рисунок 2.3 б). Морфологические исследования ПЛА проводились на бинокулярном микроскопе ZEISS «Axiovert 40 MAT» с увеличениями 50×, 100×, 200× и 500× (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Бинокулярный микроскоп ZEISS «Axiovert 40 MAT»

2.2.3 Методы и оборудование для определения реологических свойств

Квазистатические испытания на одноосное растяжение [88] выполнили на управляемой компьютером электронной универсальной машине для растяжения, «Tinius Olsen 50ST» двухколонного типа с максимальной нагрузкой 50 кН (рисунок 2.6). Во всех квазистатических испытаниях на растяжение образцы растягивали с постоянной скоростью 100 мм/мин и при комнатной температуре 23°C.



Рисунок 2.6 – Испытательные машины моделей Tinius Olsen 50ST

Сжатие [89] цилиндрических образцов диаметром и высотой 10 мм выполнили на испытательной машине модели LFM50 со скоростью 2 мм/мин (рисунок 2.7);



Рисунок 2.7 – Испытательные машины моделей LFM50

2.2.4 Методы и оборудование для определения степени кристаллизации ПЛА

Дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК) ПЛА провели на оборудовании компании «Mettler Toledo» (рисунок 2.8). Режим испытаний следующий:

- нагрев в диапазоне 0 – 350 °C,
- скорость нагрева 20 К/мин,
- среда - азот.



Рисунок 2.8 – Термоанализатор «Mettler Toledo»

ДСК позволяет определить, что при нагреве филамента ПЛА на температуру выше 100 °С имеет место его значительная деформация, что недопустимо для последующей термической обработки изделий. Термограмма ПЛА демонстрирует, что основные структурные изменения происходят при нагреве филамента от 63 °С до 100 °С. На основании чего для изучения влияния термической обработки на ПЛА были выбраны температуры: 70 °С, 85 °С и 100 °С.

2.2.5 Методы проведения термической обработки

Для определения влияния термической обработки на образцы из ПЛА, напечатанные методом 3D-печати по технологии FDM были выбраны следующие режимы:

1. Загрузка образцов в сушильный шкаф, предварительно нагретый до требуемой температуры (70 °С, 85 °С или 100 °С).
2. Выдержка образцов при назначенной температуре в течение 60 минут.
3. Охлаждение образцов до комнатной температуры (20 °С – 25 °С) в сушильном шкафу.

Термообработку образцов и гибочных шаблонов из ПЛА проводили в сушильном шкафу [90] «СНОЛ» (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Сушильный шкаф «СНОЛ»

2.3 Методы моделирования процесса формообразования трубопроводов

Определение напряженно-деформируемого состояния трубопровода и гибочного шаблона

Процесс гибки трубопроводов моделировали с применением метода конечных элементов (МКЭ) [91,92] в программе QForm.

В расчете [37,93,94] учитывался гибочный шаблон, трубопровод, прижим задний, прижим передний, дорн, выравниватель. В качестве материала трубопровода была применена сталь 12Х18Н10Т. Свойства стали для расчета взяты из базы деформируемых материалов: плотность 7776 кг/м^3 , теплопроводность 38 Вт/мК , теплоемкость $499 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, модуль Юнга $210\,000 \text{ МПа}$, материал выравнивателя – бронза БрАЖ10-10-4; объем трубопровода неизменный; напряженное состояние трехмерное (3D расчет); температура гибки – $20 \text{ }^\circ\text{C}$; 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 [95].

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/м^3 , теплопроводность 0.13 Вт/мК , теплоемкость $1800 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ (рисунок 2.10).

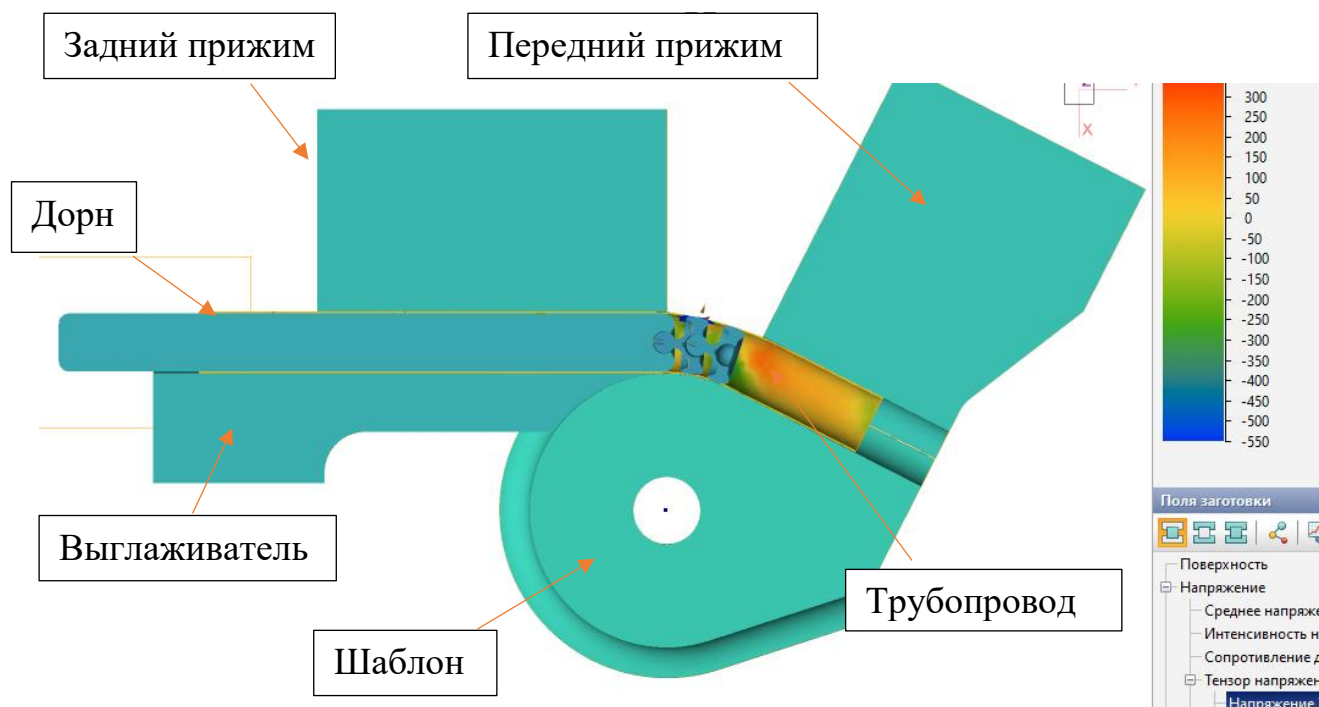


Рисунок 2.10 – Напряженно-деформируемое состояние в трубопроводе и гибочном шаблоне

Определение величины упругой деформации гибочного шаблона

С учетом значительных действующих на гибочный шаблон сил был выполнен сравнительный анализ [96,97,98-99] 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 [116] (рисунок 2.11):

- шаблон исходной конструкции (рисунок 2.11, а), геометрия которого разработана для изготовления из металла;
- шаблон повышенной прочности (рисунок 2.11, б), усиленная геометрия дополнительными ребрами для изготовления из полилактида.

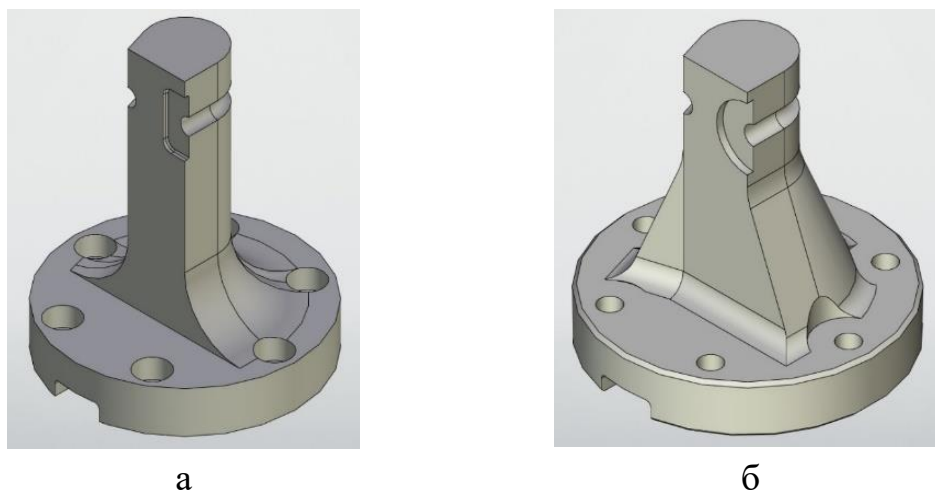


Рисунок 2.11 – Гибочные шаблоны

а – шаблон исходной конструкции, б – шаблон повышенной жесткости

При расчете статической прочности гибочного шаблона в программе T- Flex для каждого из шаблонов создавалась расчетная модель; геометрический образ шаблона замещался его конечно-элементной сеткой [117], размерность которого и характеристики представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Параметры конечно-элементной модели [117]

Параметры	шаблон 1	шаблон 2
Качество сетки конечных элементов: размер сетки (относительный)	0,025	0,025
Тип конечного элемента	криволинейный тетраэдр	
Количество конечных элементов	78591	133502
Количество вершин	17265	28226
Тип нагрузки, приложенной к шаблону, в каких точках прикладывалась нагрузка и какое её значение для каждого типа нагрузки: давление полное закрепление	28 МПа имитация закрепления по фланцу	28 МПа имитация закрепления по фланцу

Методы определения овальности и пружинения трубопроводов

Для определения геометрической точности трубопроводов из стали 12X18H10T [100] при гибке на трубогибочном станке с ЧПУ с использованием гибочного шаблона из ПЛА использовалось моделирование с применением МКЭ в программе QForm 11.2.400.3 (рисунок 2.12).

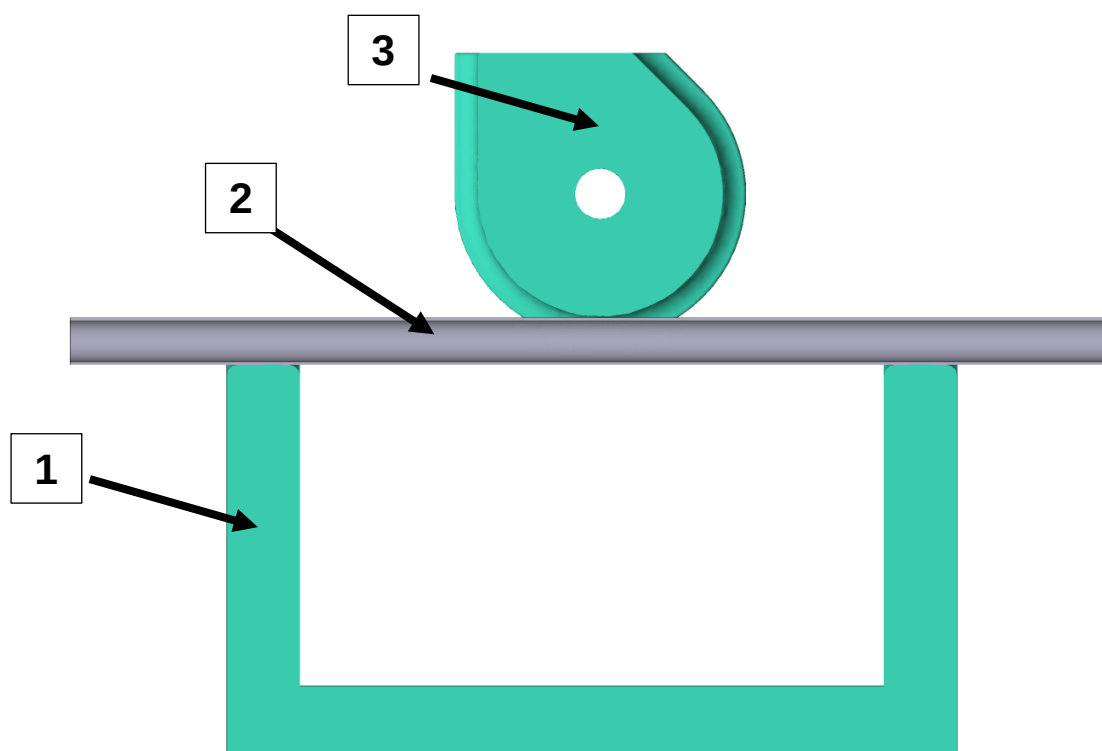


Рисунок 2.12 – Расчетная модель определения геометрических параметров трубопровода;

1 – стойка; 2 – трубопровод; 3 – гибочный шаблон из ПЛА

В качестве материала стойки использовалась сталь 4140; материал трубопровода 12X18H10T [116]; гибочный шаблон изготовлен из материала ПЛА.

2.4 Методы получения гнутых трубопроводов

Для определения стабильности работы гибочного шаблона, изготовленного методом 3D-печати по технологии FDM из полимерного материала ПЛА были испытаны трубопроводы из стали 12X18H10T длиной 400 мм, диаметрами 6, 12, 18, 24, 28 и 36 толщиной стенки 1 мм по три в каждой партии [116] на углы гибки

45°, 90° и 135°. Эксперименты по гибке трубопроводов гибочным шаблоном из ПЛА проведены на автоматическом трубогибочном станке [117] с ЧПУ мод. SILFAX SE 50L/R (рисунок 2.13) со скоростью 1 об/мин и силой давления 7000 Н.



Рисунок 2.13 – Трубогибочный автомат с ЧПУ мод. SILFAX SE 50L/R

Матрица экспериментов для определения величины овальности, угла пружинения и угла гибки трубопроводов из стали 12X18H10T с применением гибочного шаблона из ПЛА представлена в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Матрица экспериментов по гибке трубопроводов на трубогибочном станке

№ образца	Диаметр трубопровода, мм	Угол гибки, °	Количество образцов	Скорость гибки, об/мин
1	6	45	3	1
2	6	90	3	1
3	6	135	3	1
4	12	45	3	1
5	12	90	3	1
6	12	135	3	1
7	18	45	3	1
8	18	90	3	1
9	18	135	3	1
10	24	45	3	1
11	24	90	3	1
12	24	135	3	1
13	28	45	3	1
14	28	90	3	1
15	28	135	3	1
16	36	45	3	1

2.5 Методы контроля трубопроводов после гибки

Геометрические параметры гнутых трубопроводов контролировали с помощью, автоматизированной оптической измерительной системы мод. TubeInspect фирмы «AICON» (рисунок 2.14). Точность измерения составляла $\pm 0,1$ мм. На каждую точку исследования использовали по три замера овальности и угла пружинения трубопровода [95].



Рисунок 2.14 – Измерительная система AICON мод. TubeInspect

Для измерения наибольшего и наименьшего значений диаметров трубопроводов применяли электронный штангенциркуль с ценой деления 0,01 мм.

2.6 Статистическая обработка экспериментальных данных

К изготавливаемым трубопроводам ГТД предъявляются высокие требования по точности геометрических параметров [23]. Допускаемая овальность должна находиться в пределах 3 – 10% и зависит от длины трубопровода и условий его применения. Наличие гофров в трубопроводах гидравлических систем, которые часто возникают в процессе операции гибки, недопустимы. Утонение стенок в зоне гибки трубопроводов не должно превышать 15-20 % исходной толщины [49].

Относительная овальность (отклонение от круглой формы) в зоне гибки согласно ГОСТ 494-2014 определялась как разность наибольшего и наименьшего значений диаметров ΔD деленная на диаметр трубопровода D , измеренных в одном

поперечном сечении, перпендикулярном к оси трубопровода. Для определения каждого диаметрального размера использовали три трубопровода и рассчитывали среднее значение овальности.

Пружинение углов гибки определялась как разница между максимальным и минимальным значениями угла трех изогнутых трубопроводов на трубогибочном станке с использованием гибочного шаблона из ПЛА при одинаковых технологических параметрах.

Для определения стабильности геометрических параметров овальности [49], обеспечиваемых гибочным шаблоном из ПЛА изготовленного методом 3D-печати по технологии FDM, для гибки трубопроводов диаметром 6 мм с толщиной стенки 1 мм на углы 45° , 90° и 135° было измерено по десять исследуемых образцов трубопроводов.

Обработку экспериментальных данных осуществляли с применением метода наименьших квадратов.

Выводы по 2 главе

1. В качестве материала для изготовления гибочного шаблона выбран полилактид (ПЛА). Для гибки трубопроводов определена нержавеющая сталь марки 12X18Н10Т диаметром 6, 12, 18, 24, 28 и 36 мм с толщиной стенки 1 мм, что позволяет оценить работоспособность полимерного гибочного шаблона в реальных условиях деформирования.

2. Определены режимы 3D-печати по технологии FDM на принтере Raise3D Pro2 Plus для изготовления образцов и гибочных шаблонов, включающие температуру сопла 205°C , температуру подогрева стола 60°C , 100% заполнение и высоту слоя 0,2 мм. Это обеспечивает изготовление гибочного шаблона с заданными геометрическими параметрами и плотностью.

3. Предложен комплекс методов для изучения свойств ПЛА: микроструктурный анализ на микроскопе мод. ZEISS «Axiovert 40 MAT», механические испытания на машинах мод. Tinius Olsen 50ST и мод. LFM50, а также проведение дифференциальной сканирующей калориметрии на термоанализаторе

мод. «Mettler Toledo». Для оценки влияния термической обработки на прочность ПЛА использовали сушильный шкаф мод. «СНОЛ».

4. С применением МКЭ в пакете QForm 11.2.400.3 создана модель процесса гибки трубопровода, учитывающая свойства материала трубопровода из стали 12X18H10T и трехмерное напряженно-деформированное состояние. Модель позволяет прогнозировать поведение трубопровода без учета тепловых процессов.

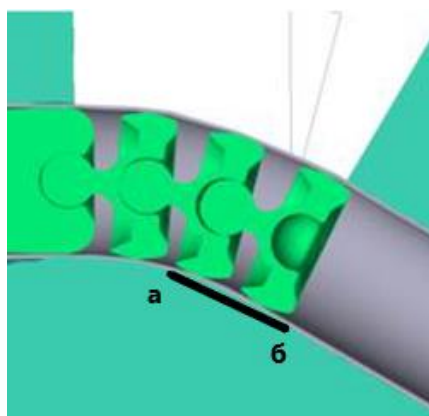
5. Разработана методика натурных испытаний гибочного шаблона из ПЛА на автоматическом трубогибочном станке с ЧПУ мод. «SILFAX SE 50L/R» для трубопроводов из стали 12X18H10T диаметром от 6 до 36 мм и толщиной стенки 1 мм на углы гибки 45°, 90° и 135° [116]. Для контроля геометрической точности полученных гнутых трубопроводов предложено использовать оптическую измерительную систему мод. «TubeInspect» (AICON) с точностью $\pm 0,1$ мм.

ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

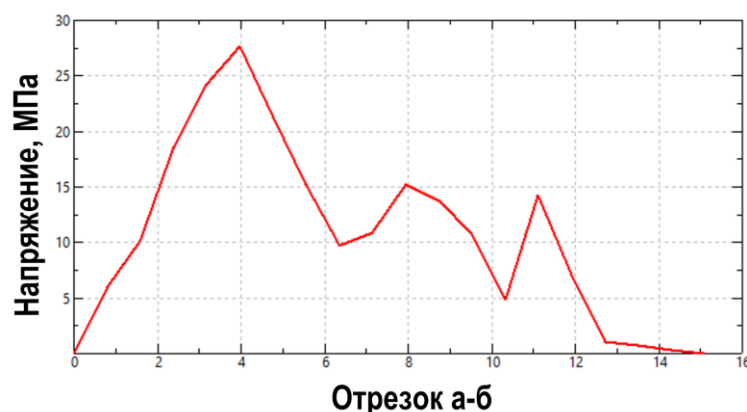
3.1 Определение напряженно-деформируемого состояния гибочного шаблона из ПЛА в процессе гибки

Диапазон напряжений, возникающих в полимерном гибочном шаблоне из ПЛА и в трубопроводе из стали 12Х18Н10Т, а также стабильность овальности и пружинения получаемых заготовок в зависимости от диаметров применяемых трубопроводов и углов гибки [117], был определен методом конечно-элементного анализа.

При определении напряженно-деформируемого [101] состояния наиболее нагруженными элементами при гибке трубопровода являются гибочный шаблон и сам трубопровод. Для анализа действующих на них напряжений [5,102] было выполнено моделирование процесса гибки (рисунок 2.10). Анализ действующих на гибочный шаблон сил на выделенном отрезке «а – б» (рисунок 3.1 - 1) показал, что максимальное давление на шаблон составляло 28 МПа (рисунок 3.1 - 2) при максимальной силе деформирования трубопровода 0,6 кН (рисунок 3.2) [116], а среднее напряжение деформируемого трубопровода из стали 12Х18Н10Т в процессе гибки гибочным шаблоном из ПЛА достигает 300 МПа (рисунок 3.3).



1



2

Рисунок 3.1 – Давление (МПа) на гибочный шаблон на отрезке *а-б* при максимальной деформирующей силе (время деформации 4,5 сек)

1 – схема гибки трубопровода;

2 – график зависимости напряжения на отрезке *а-б*

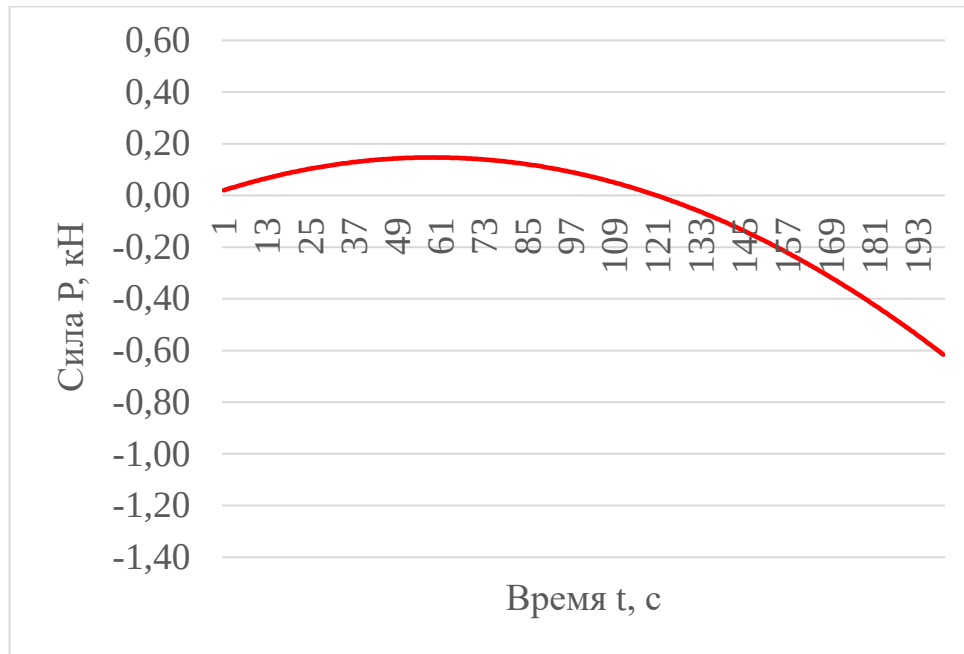


Рисунок 3.2 – Зависимость «сила деформирования – время» в процессе деформации

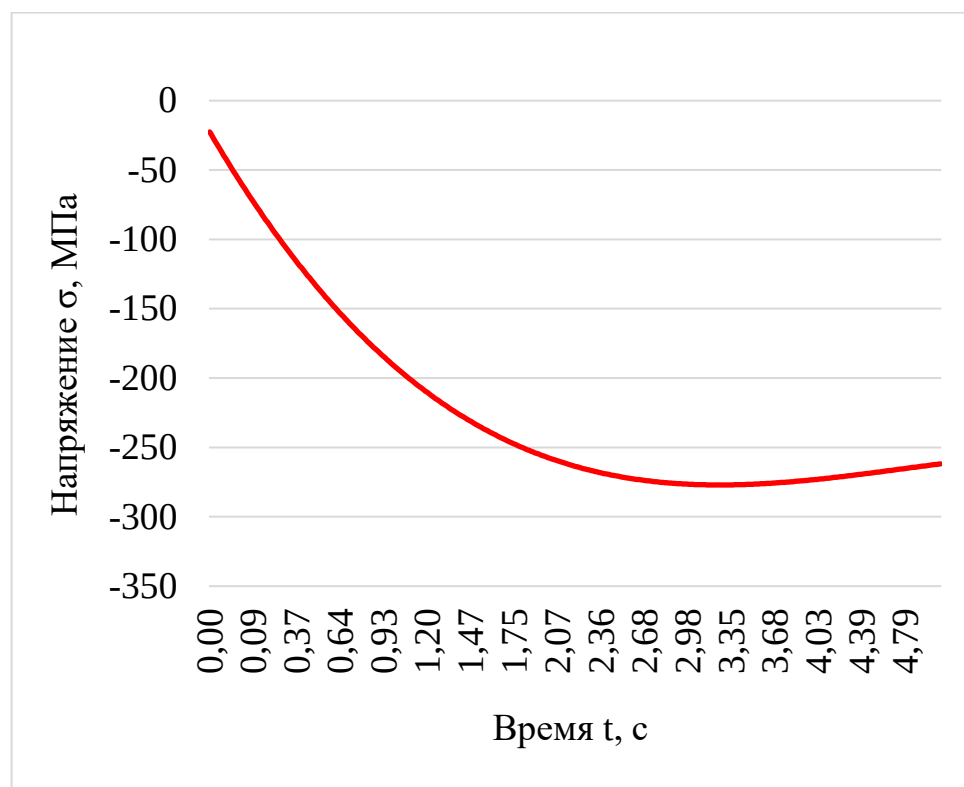


Рисунок 3.3 – Изменение средних напряжений в деформируемом трубопроводе при гибке полимерным гибочным шаблоном

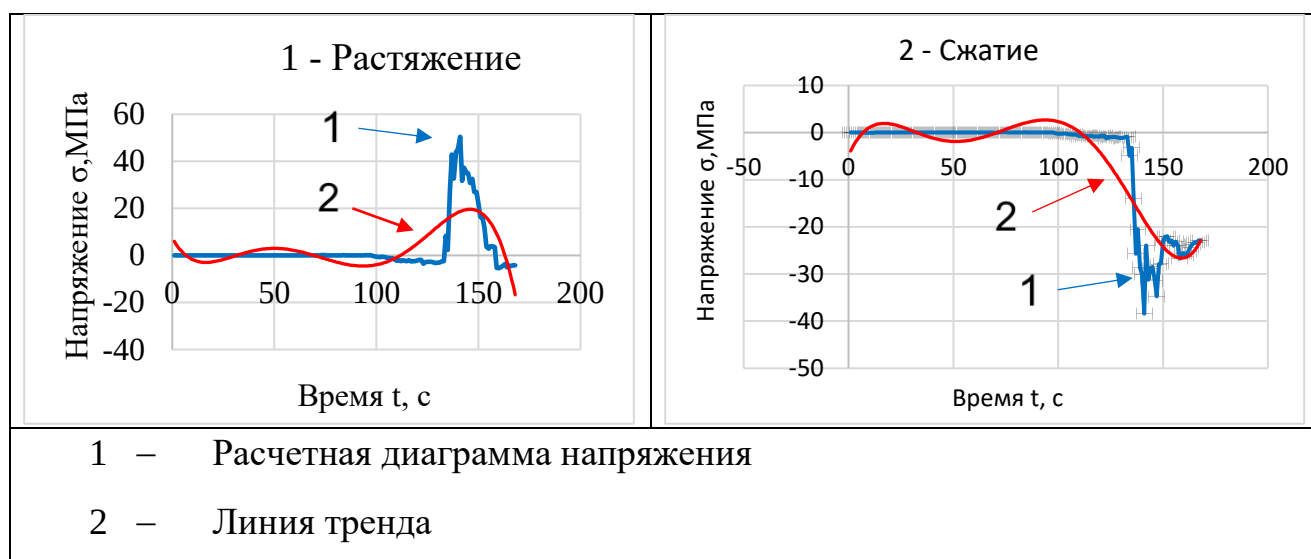


Рисунок 3.4 – Средние напряжения в трассируемых точках гибочного шаблона

Исследование напряженно-деформированного состояния гибочного шаблона при гибке трубопровода из стали 12X18H10T длиной 400 мм, диаметром 18 мм и толщиной стенки 1 мм в программе QForm позволило установить, что гибочный шаблон испытывает как сжимающие, так и растягивающие напряжения [5,102] (рисунок 3.4).

3.2 Исследование статической прочности конструкции гибочного шаблона из ПЛА с учетом действующих на него сил

Результаты моделирования в программе T-FLEX (рисунок 3.5) показывают, что при одинаково приложенном напряжении в 65 МПа на ручей гибочного шаблона исходной конструкции б) и шаблон повышенной жесткости г) изготовленных по технологии FDM из ПЛА имеют разные величины перемещений.

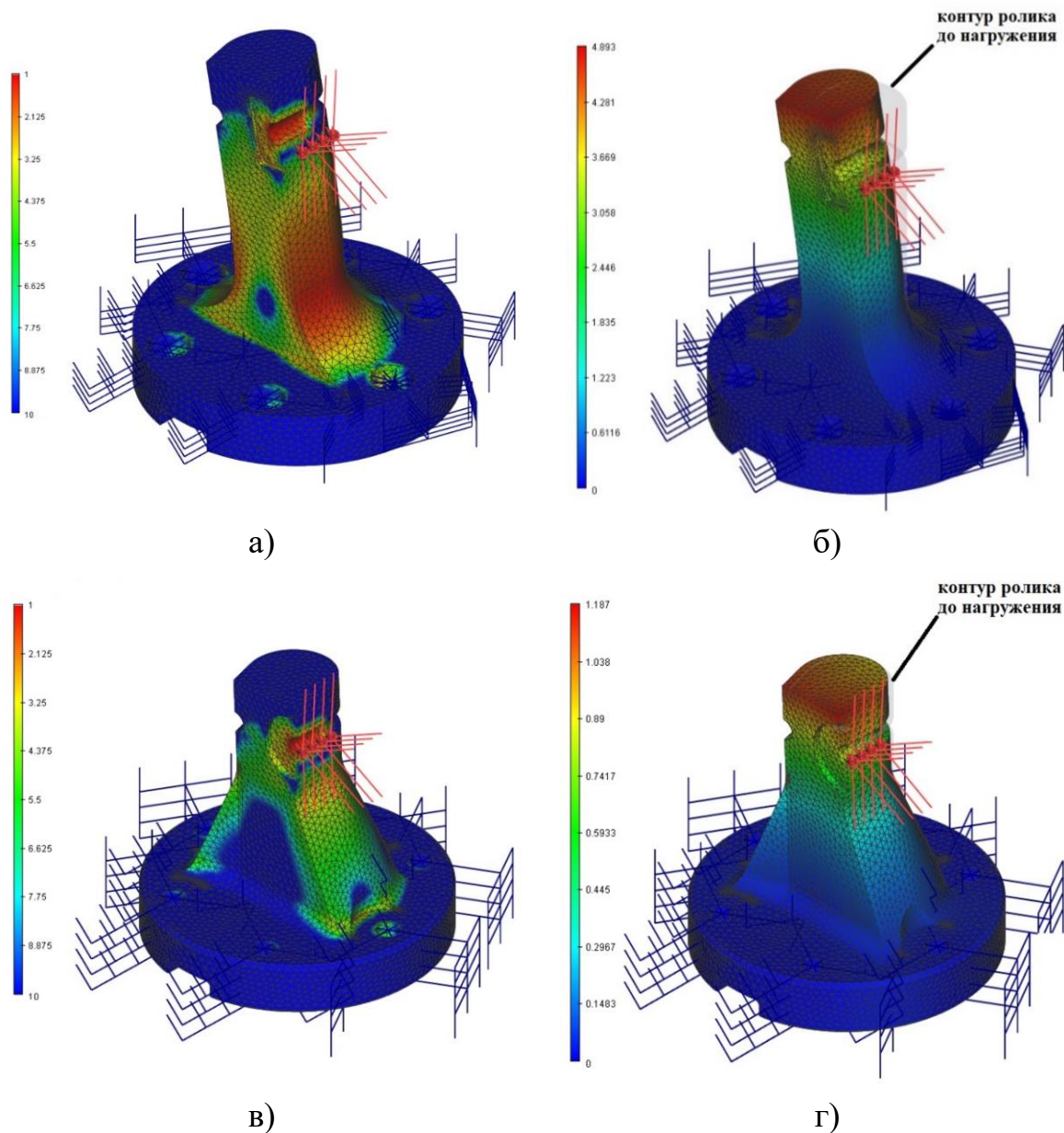


Рисунок 3.5 – Статическая прочность в программе T-FLEX.

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

Конструкция шаблона повышенной прочности (г) снижает максимальное перемещение с 4,893 до 1,2 мм [116]. Коэффициент запаса прочности при этом увеличивается в 1,5-2 раза.

3.3 Угол пружинения и относительная овальность трубопроводов при гибке гибочным шаблоном из ПЛА

Расчетная величина пружинения

Для прогнозирования точности изгибаемых трубопроводов большое значение имеет величина пружинения после операции гибки. В частности, при анализе пружинения трубопровода в программе QForm длиной 400 мм, диаметром 18 мм и толщиной стенки 1 мм на угол 45° , 90° и 135° ее величина составила $2^\circ 40'$. (рисунок 3.6).

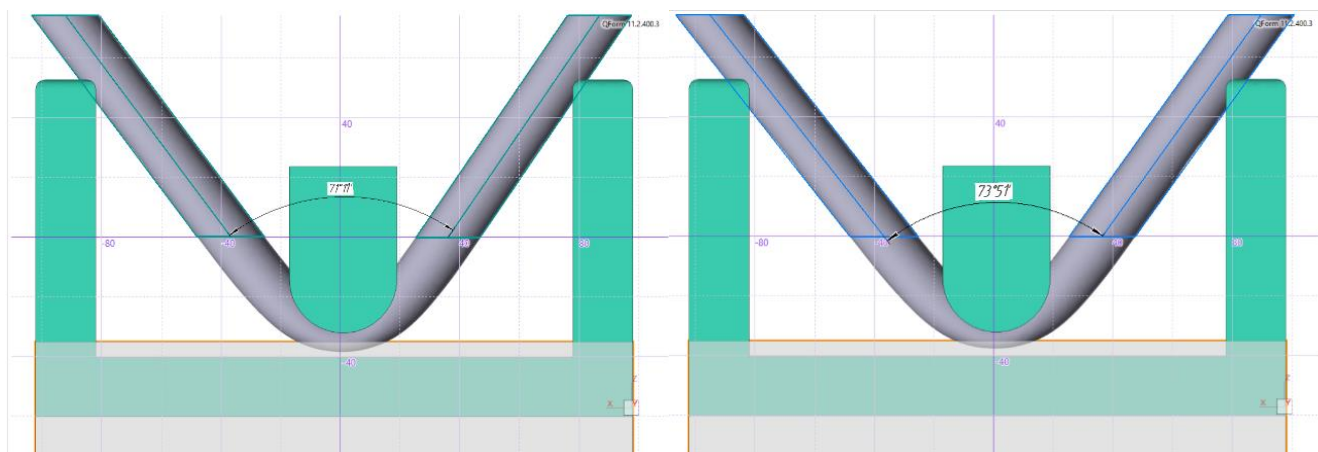
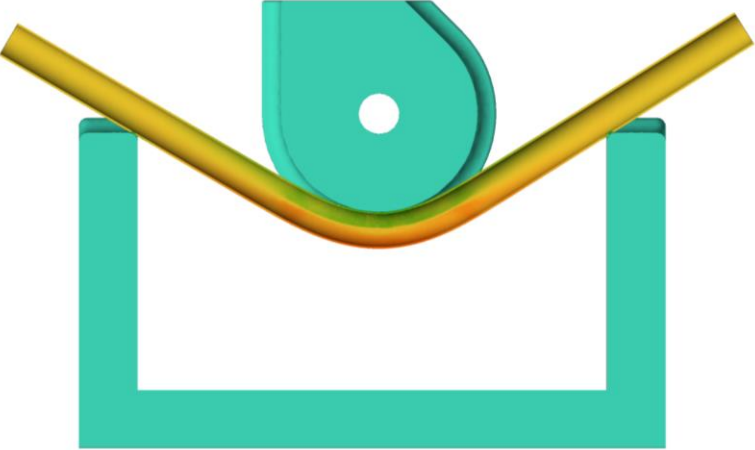
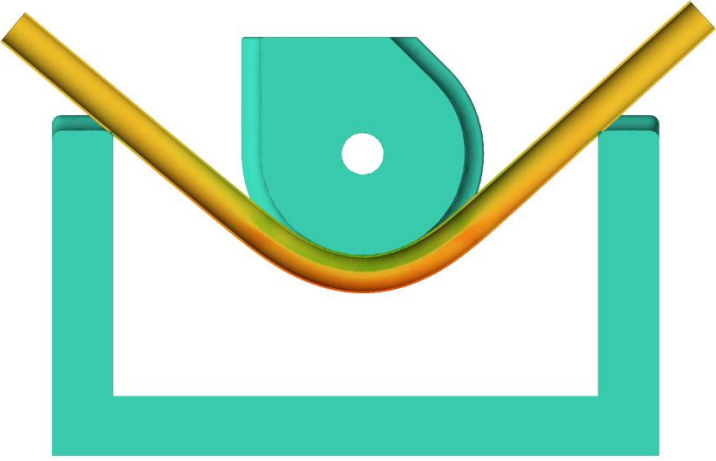
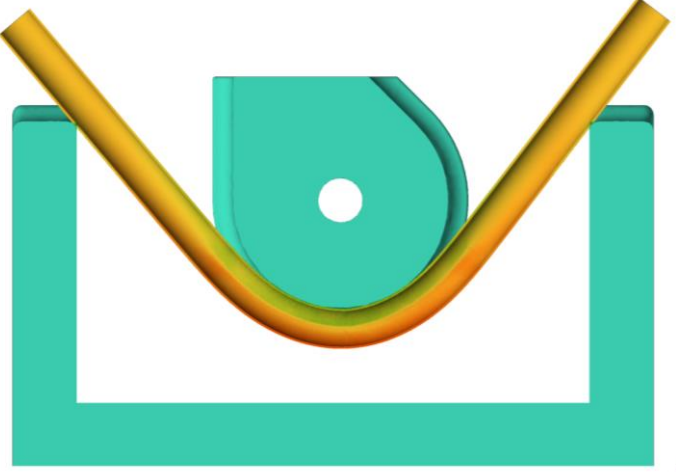


Рисунок 3.6 – Расчетный угол пружинения трубной заготовки диаметром 18 мм

Расчетная величина овальности

Величина расчетной овальности трубопроводов длиной 400 мм, диаметром 18 мм и толщиной стенки 1 мм определялась методом моделирования в программе QForm при гибке на углы 45° , 90° и 135° (таблице 3.1).

Таблица 3.1 – Расчетные напряжения в трубопроводе

Угол гибки, °	$\sigma_{\max}$, МПа	$\sigma_{\min}$, МПа	Гибка трубопровода (моделирование)
45	208	-308	
90	211	-313	
135	215	-294	

Конечно-элементный анализ процесса гибки трубопровода длиной 400 мм, из стали 12 X18H10T диаметром 18 мм и толщиной стенки 1 мм на углы 45°, 90° и 135° позволил установить, что относительная овальность $\Delta D/D$ увеличивается прямо пропорционально углу гибки. Минимальное значение относительной овальности при гибке трубопровода на угол 45° составило 0,016, а максимальное при угле 135° достигает значения 0,026 (рисунок 3.7). Таким образом МКЭ показал, что с увеличением угла гибки трубопровода из стали 12X18H10T диаметром 18 мм и толщиной стенки 1 мм величина относительной овальности увеличивается с 0,016 до 0,026.

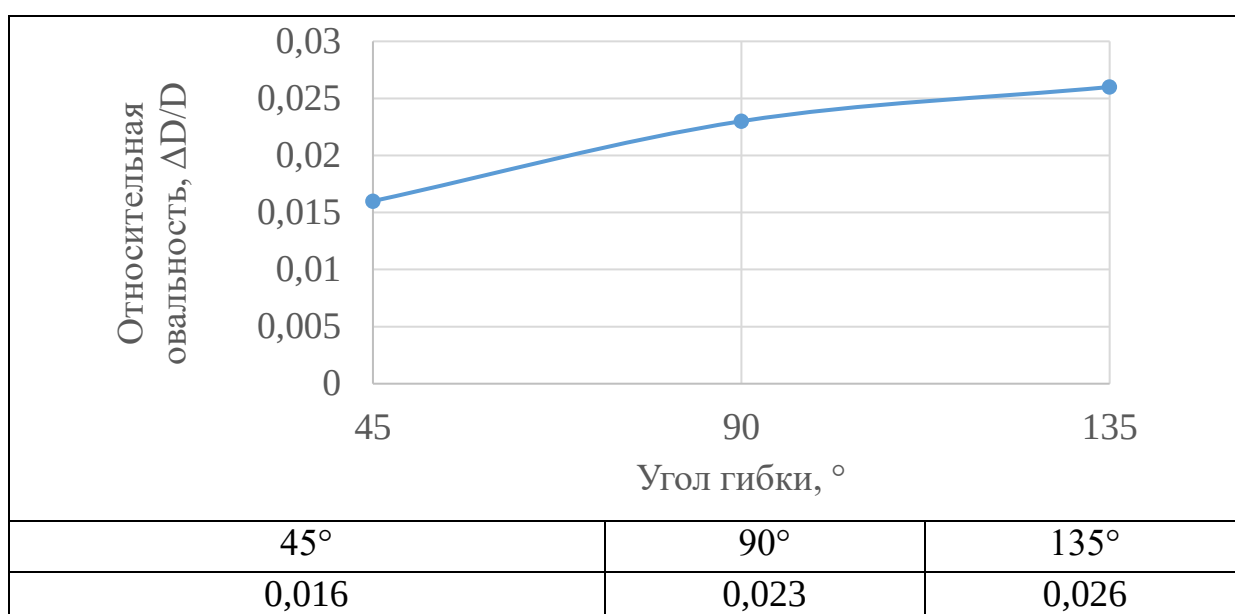


Рисунок 3.7 – Результаты расчета относительной овальности

3.4 Установление угла разрушения ПЛА под действием растягивающих напряжений

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 отдельными 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 3.8). Для условий перехода между этими механизмами разрушения необходимо установить критический угол разрушения θ ПЛА.

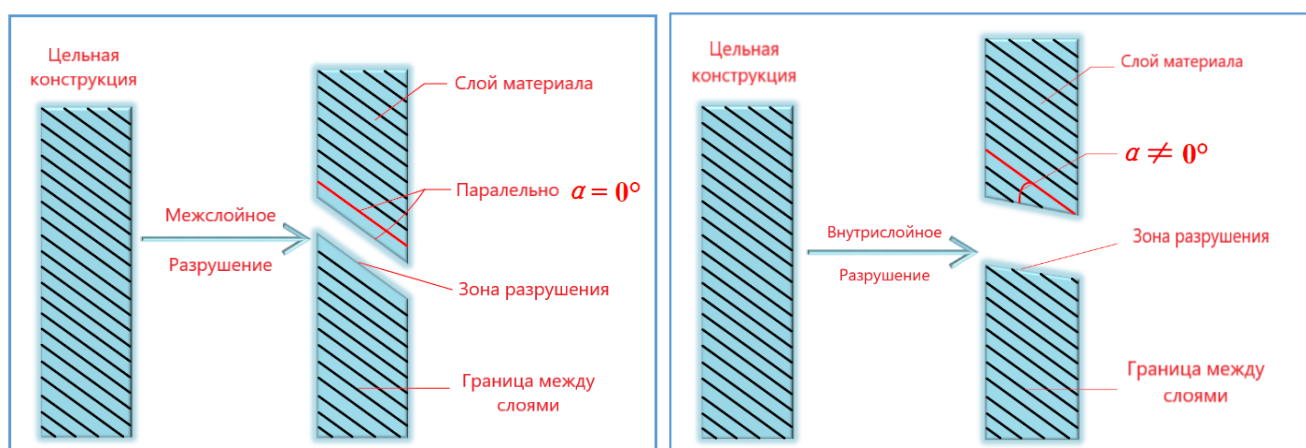


Рисунок 3.8 – Характер разрушения ПЛА

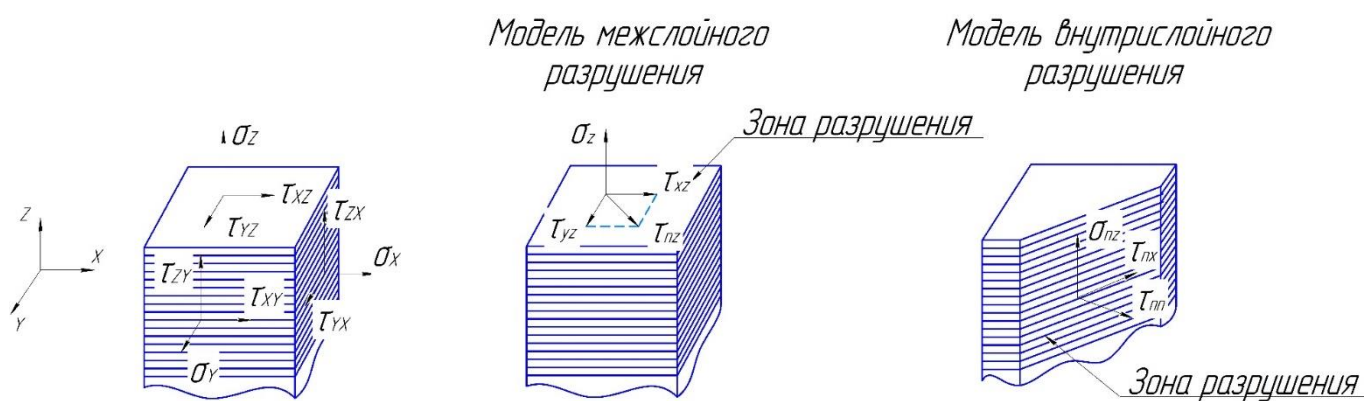


Рисунок 3.9 – Модель разрушения ПЛА

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

Межслойный режим разрушения:

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

Если на образец приложено только одноосное напряжение σ то это приводит к межслойному разрушению.

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

Внутрислойный режим разрушения:

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

Если на образец действует напряжение σ 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 приведенной 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 θ_σ (рисунок 3.10).
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 θ_τ (рисунок 3.10).

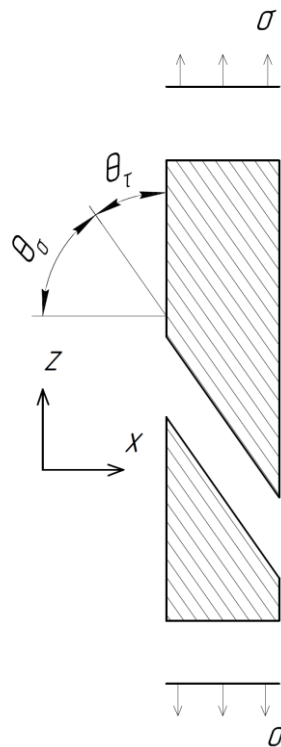


Рисунок 3.10 – Ориентация слоев при 3D-печати

Зная механические свойства ПЛА можно получить расчетные значения угла разрушения θ (5). Значения угла разрушения θ в зависимости от толщины слоя представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Угол разрушения θ для ПЛА

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

На основе определения расчетных углов разрушения θ была разработана конструкция гибочного шаблона с учетом формирования слоев при 3D-печати материалом ПЛА в зависимости от угла гибки трубопроводов (рисунок 3.11).

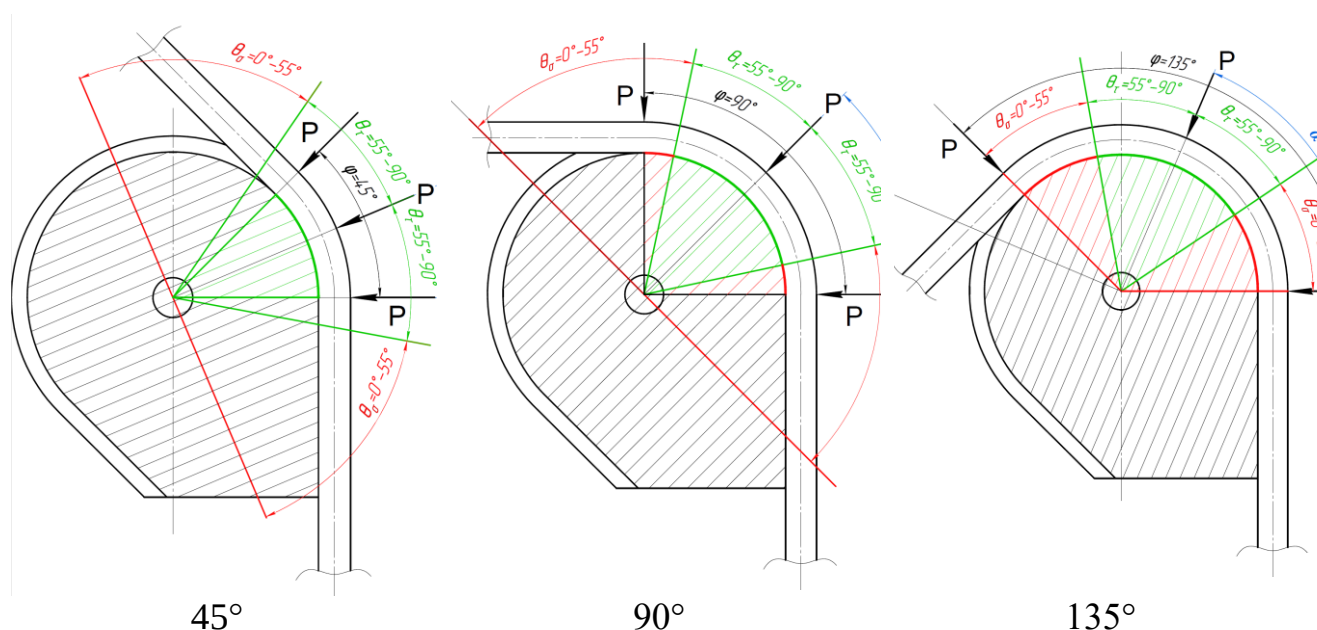


Рисунок 3.11 – Ориентация слоев гибочного шаблона из ПЛА в зависимости от угла гибки трубопроводов 45°, 90° и 135°

α - угол ориентации слоев печати; $\theta\tau$ – зона повышенной прочности;

$\theta\sigma$ – зона пониженной прочности

Углы ориентации слоев α при 3D-печати по технологии FDM на принтере Raise3D Pro2 Plus для гибочного шаблона с учетом углов гибки трубопроводов представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Угол ориентации слоев гибочного шаблона из ПЛА

Угол гибки $\varphi, ^\circ$	Угол ориентации слоев печати $\alpha, ^\circ$	Угол межслойного разрушения $\theta_\sigma, ^\circ$	Угол внутрислойного разрушения $\theta_\tau, ^\circ$
45	23	0 - 55	55 - 90
90	45	0 - 55	55 - 90
135	67	0 - 55	55 - 90

Полученные данные по расчетному углу разрушения ПЛА позволили прогнозировать разрушение и определить области пониженной прочности гибочного шаблона в самых нагруженных местах при гибке трубопроводов из стали 12X18H10T.

3.5 Исследование структурных изменений в материале ПЛА при термической обработке.

Это исследование направлено на повышение производительности деталей из ПЛА, напечатанных методом FDM, путем оптимизации параметров термической обработки для улучшения их механических свойств. В отличие от предыдущих исследований, которые часто фокусируются на отдельных механических характеристиках или ограниченных экспериментальных диапазонах, данная работа охватывает более широкую область, исследуя влияние различных температур и времени термической обработки на прочность при растяжении и сжатии. Достигая баланса кристалличности, эта работа расширяет применимость ПЛА в высокопроизводительных FDM принтерах, внося ценный вклад в стратегии постобработки для аддитивного производства [76-78].

Для определения вида термической обработки была проведена дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) материала ПЛА. Как видно на термограмме (рисунок 3.11) структурные изменения в ПЛА происходят в

диапазоне между температурами плавления ($170\text{ }^{\circ}\text{C}$) и стеклования ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$), что, по всей видимости, меняет соотношение аморфной и кристаллической составляющих структуры [71-75].

Первый нагрев, показанный на термограмме (рисунок 3.13, линия 1) соответствует термическим процессам, происходящим при 3D-печати по экструзионной технологии FDM. Второй нагрев (рисунок 3.13, линия 2) отображает процессы, происходящие при термической обработке ПЛА. Для исследования режима термической обработки на свойства ПЛА используем данные о втором нагреве [90].

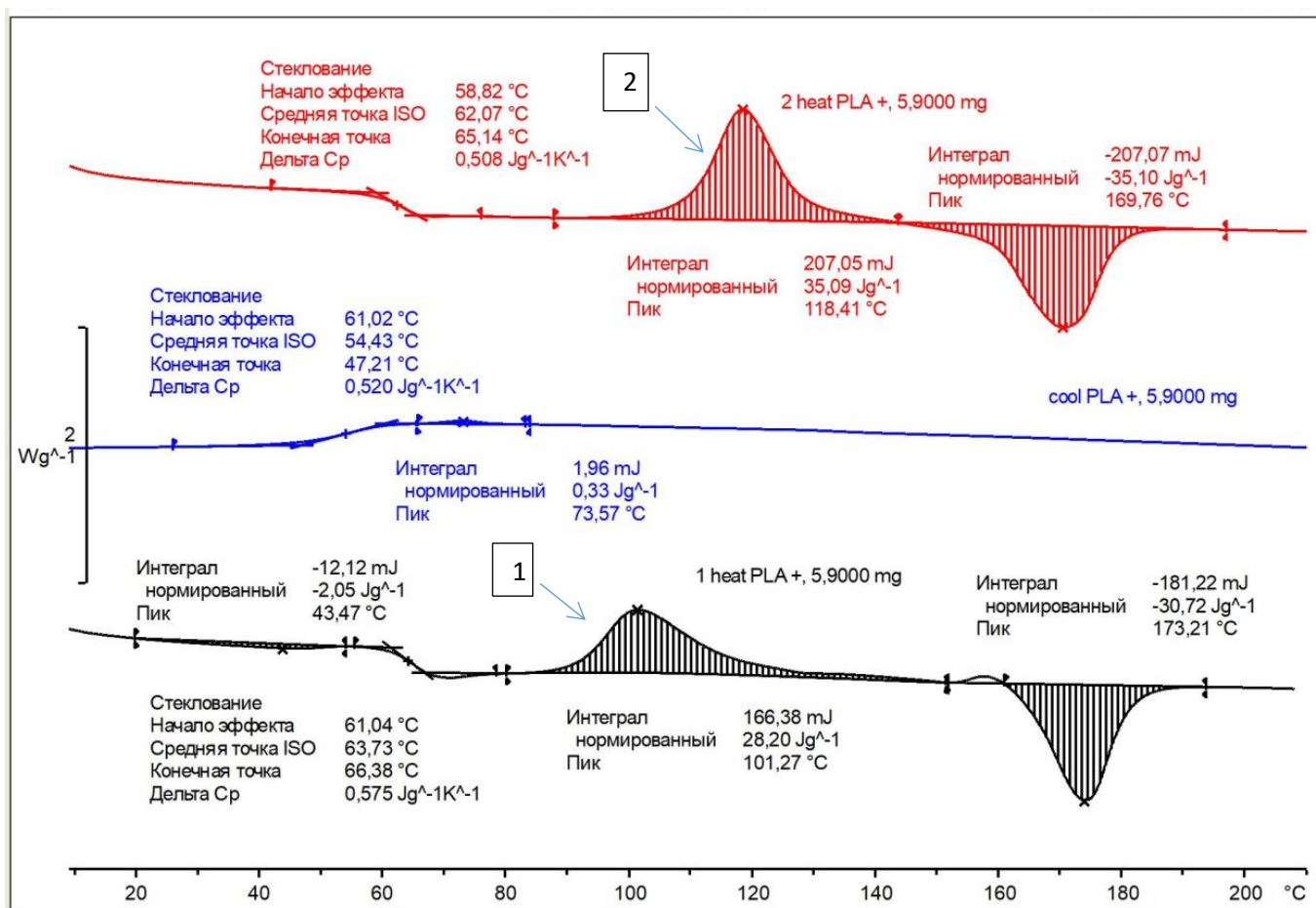


Рисунок 3.13 – Термограмма полилактида ПЛА

На этом основании и с учетом того факта, что при нагреве ПЛА на температуру выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ имеет место его значительная деформация, для исследования влияния термической обработки на структуру полимера были

выбраны три температуры: 70, 85 и 100 °С. Выбранные значения [90] термической обработки ПЛА позволяют поменять соотношение аморфной и кристаллической структуры.

Выводы по главе 3

В ходе теоретических исследований, выполненных в третьей главе, были получены следующие основные результаты:

1. Моделирование процесса гибки трубопровода из стали 12X18H10T в программе QForm показало, что максимальное давление на гибочный шаблон из ПЛА составляет 28 МПа при максимальной силе деформирования 0,6 кН. Наиболее нагруженным элементом при гибке трубопровода является гибочный шаблон, который испытывает как сжимающие до 40 МПа, так и растягивающие до 50 МПа напряжения.

2. Анализ в системе T-Flex (рис. 3.4) выявил, что при одинаковом приложенном напряжении (65 МПа) гибочный шаблон исходной конструкции имеет перемещение 4,893 мм – больше, чем у шаблона повышенной прочности в 4 раза. Это указывает на необходимость оптимизации геометрии гибочного шаблона для снижения его деформаций в процессе гибки.

3. При гибке трубопровода диаметром 18 мм, толщиной стенки 1 мм на угол 45° 90° и 135° расчётная величина угла пружинения составила 2° 40'.

4. Установлено, что образцы из ПЛА имеют два механизма разрушения: межслойное разрушение – при малых углах печати и внутрислойное разрушение – при больших углах печати. Разработана теоретическая модель поперечно-изотропного разрушения ПЛА, позволяющая прогнозировать предел прочности на разрыв в зависимости от угла слоев печати.

5. Получены значения угла разрушения θ в зависимости от толщины слоя печати:

- толщина слоя печати 0,15 мм → 56°;
- толщина слоя печати 0,25 мм → 52°;
- толщина слоя печати 0,35 мм → 53°.

Это позволило рационально распределить ориентацию слоёв печати при изготовлении гибочного шаблона по технологии FDM для гибки трубопроводов на трубогибочном станке на углы 45° , 90° и 135° (табл. 3.2).

6. Дифференциальная сканирующая калориметрия филамента ПЛА показала, что структурные изменения происходят в интервале между 60°C (стеклование) и 170°C (плавление). Для термической обработки выбраны температуры 70 , 85 и 100°C , что позволяет изменять соотношение аморфной и кристаллической структуры и улучшать механические свойства ПЛА. Обзор литературы подтверждает, что термическая обработка может повысить прочность на растяжение и сжатие до 28%.

7. На основе расчётных углов разрушения разработана конструкция гибочного шаблона с учётом ориентации слоёв при 3D-печати по технологии FDM, что позволяет прогнозировать и предотвращать разрушение шаблона в наиболее нагруженных зонах.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1 Исследование структурных изменений в полилактиде при термообработке

При нагреве в материале филамента ПЛА протекают сложные структурные изменения, которые происходят в диапазоне между температурами плавления (170°C) и стеклования (63°C) [90], что, меняет соотношение аморфной и кристаллической составляющих структуры [69,70].

Для изучения влияния термической обработки [103] на образцы из ПЛА изготовленные методом 3D-печати по технологии FDM была выбрана температура 70°C , 85°C и 100°C , которая проводится между температурой стеклования и плавления полилактида с последующим медленным охлаждением [104].

Образцы загружали в предварительно разогретую до требуемой температуры печь (70°C , 85°C и 100°C), выдерживали в течение 60 минут и охлаждали вместе с печью до комнатной температуры ($20 - 25^{\circ}\text{C}$). Микроструктуры образцов до и после термической обработки показана на рисунках 4.1 и 4.2.

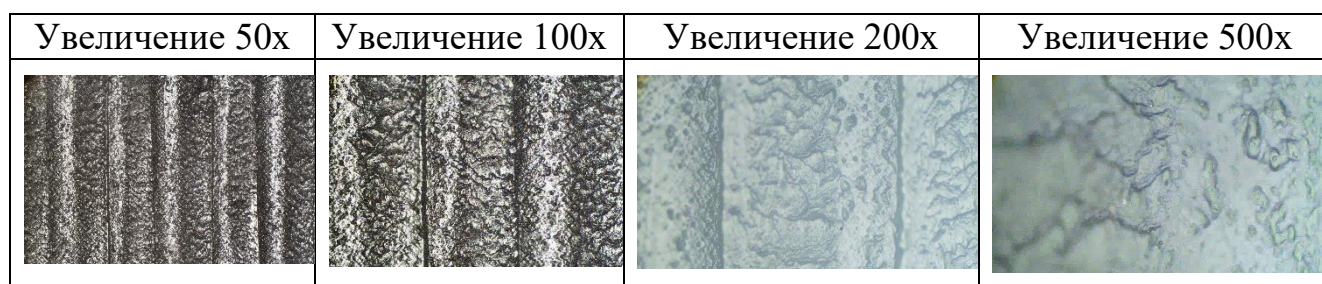


Рисунок 4.1 – Микроструктура полилактида ПЛА без термической обработки

Наиболее заметные структурные изменения ПЛА (рисунки 4.1 и 4.2) наблюдали после термической обработки при температуре $T = 85^{\circ}\text{C}$ 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 [42].

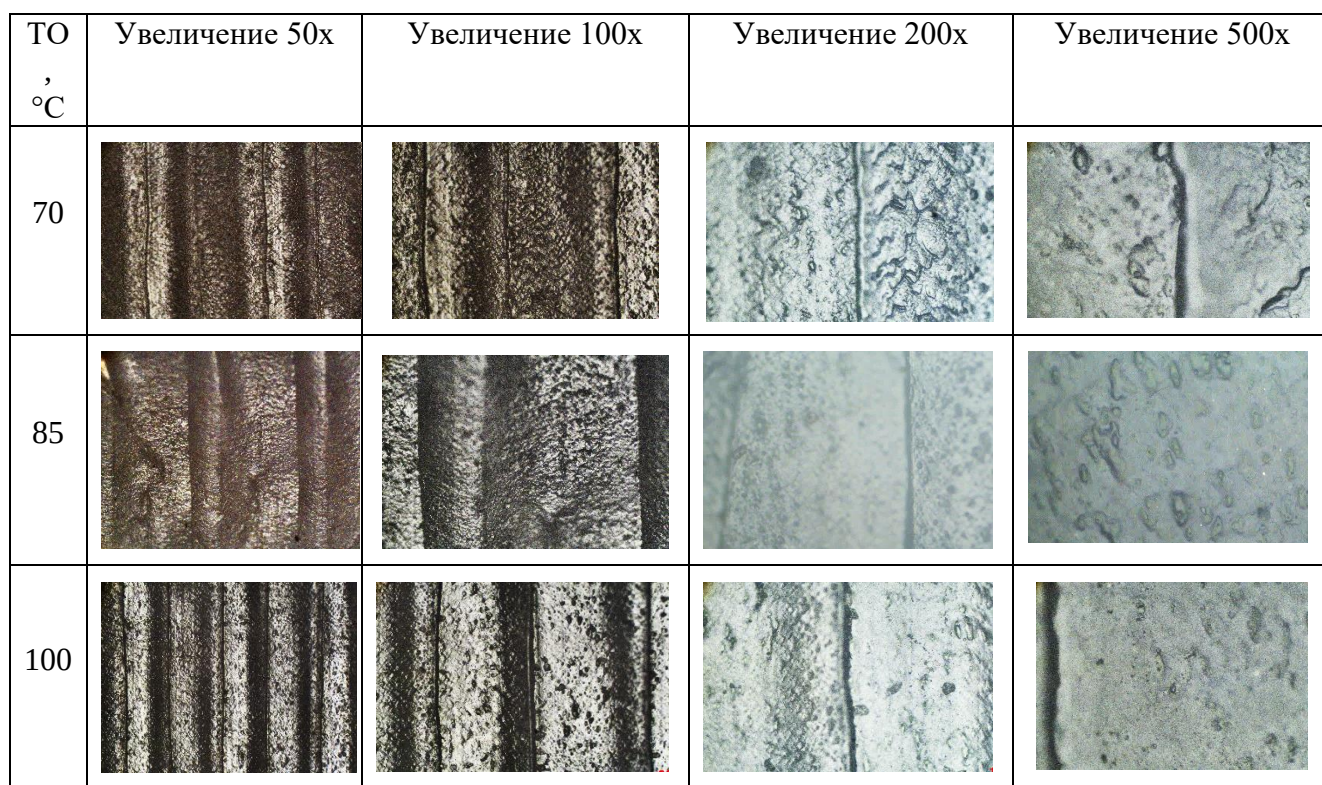
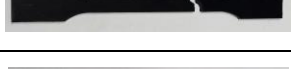
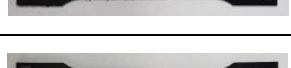
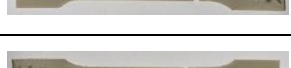


Рисунок 4.2 – Микроструктура образцов полилактида ПЛА после термической обработки с температурами 70, 85 и 100 °С

4.2 Прочностные характеристики полилактида в зависимости от угла печати

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 позволили установить, что при угле печати 90° прочностные характеристики на 200% выше, чем при печати с углом 0° (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Результаты механических испытаний образцов из ПЛА

№	Толщина слоя печати, мм	Угол печати, °	Фото образца	Тип разрушения	Напряжение, МПа	Величина деформации, ϵ
1	0,1	0		межслойное	29,3	0,035
2	0,1	15		межслойное	26,4	0,034
3	0,1	30		межслойное	31,6	0,034
4	0,1	45		межслойное	33,9	0,040
5	0,1	60		внутрислойное	46,8	0,050
6	0,1	75		внутрислойное	54,2	0,057
7	0,1	90		внутрислойное	61,0	0,061
8	0,2	0		межслойное	30,0	0,033
9	0,2	15		межслойное	32,6	0,039
10	0,2	30		межслойное	31,2	0,036
11	0,2	45		межслойное	42,4	0,057
12	0,2	60		внутрислойное	50,3	0,059
13	0,2	75		внутрислойное	55,2	0,061
14	0,2	90		внутрислойное	58,4	0,054
15	0,3	0		межслойное	32,9	0,039
16	0,3	15		межслойное	27,5	0,033
17	0,3	30		межслойное	34,4	0,040
18	0,3	45		межслойное	38,1	0,049

№	Толщина слоя печати, мм	Угол печати, °	Фото образца	Тип разрушения	Напряжение, МПа	Величина деформации, ϵ
19	0,3	60		внутрислойное	42,6	0,058
20	0,3	75		внутрислойное	53,1	0,063
21	0,3	90		внутрислойное	55,8	0,060

По результату механических испытаний ПЛА [29,105-115] на растяжение отмечается значительное влияние угла печати на характер разрушения и прочностные свойства ПЛА (рисунки 4.3-.4.5).

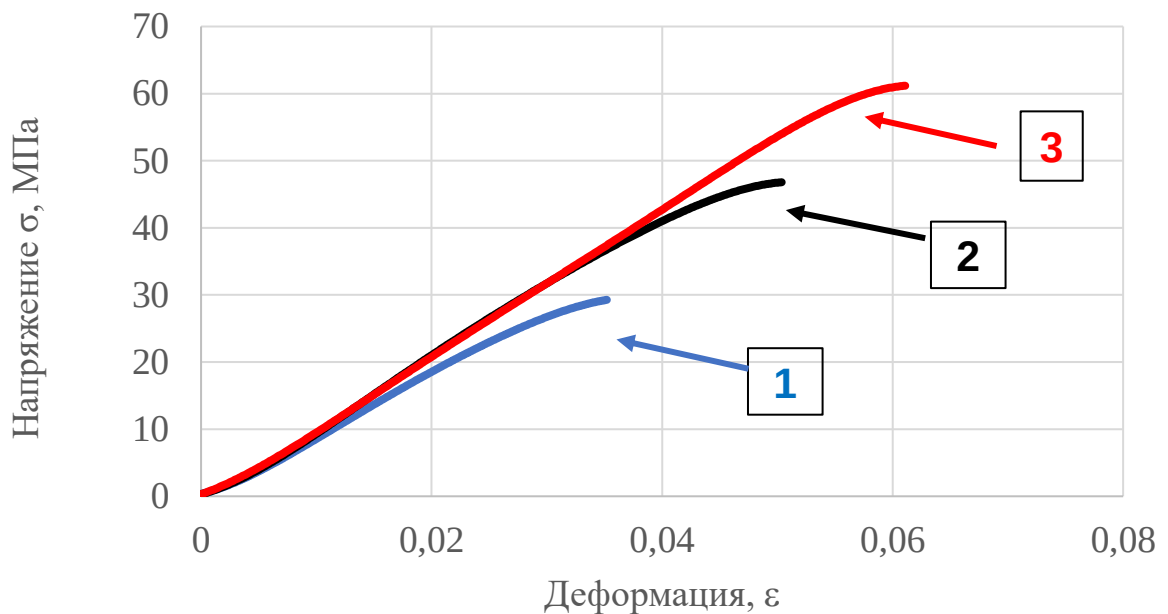


Рисунок 4.3 – Зависимость напряжения от деформации образцов из ПЛА с толщиной слоя печати 0,1 мм

1 – угол печати 0°; 2 – угол печати 45°; 3 – угол печати 90°

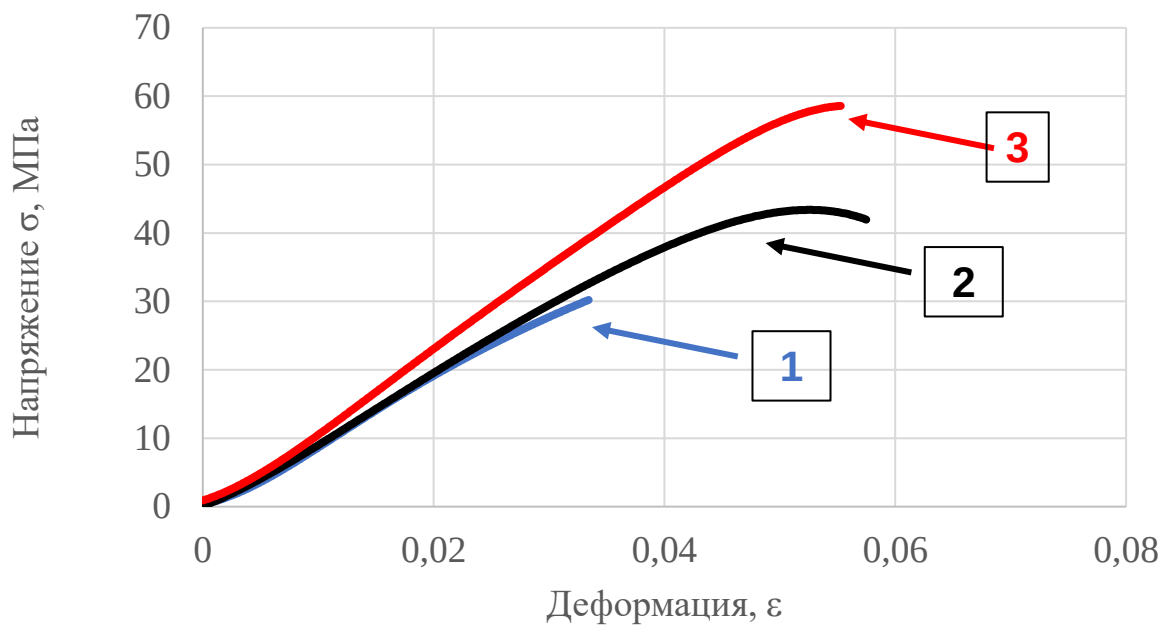


Рисунок 4.4 – Зависимость напряжения от деформации образцов из ПЛА
с толщиной слоя печати 0,2 мм

1 – угол печати 0°; 2 – угол печати 45°; 3 – угол печати 90°.

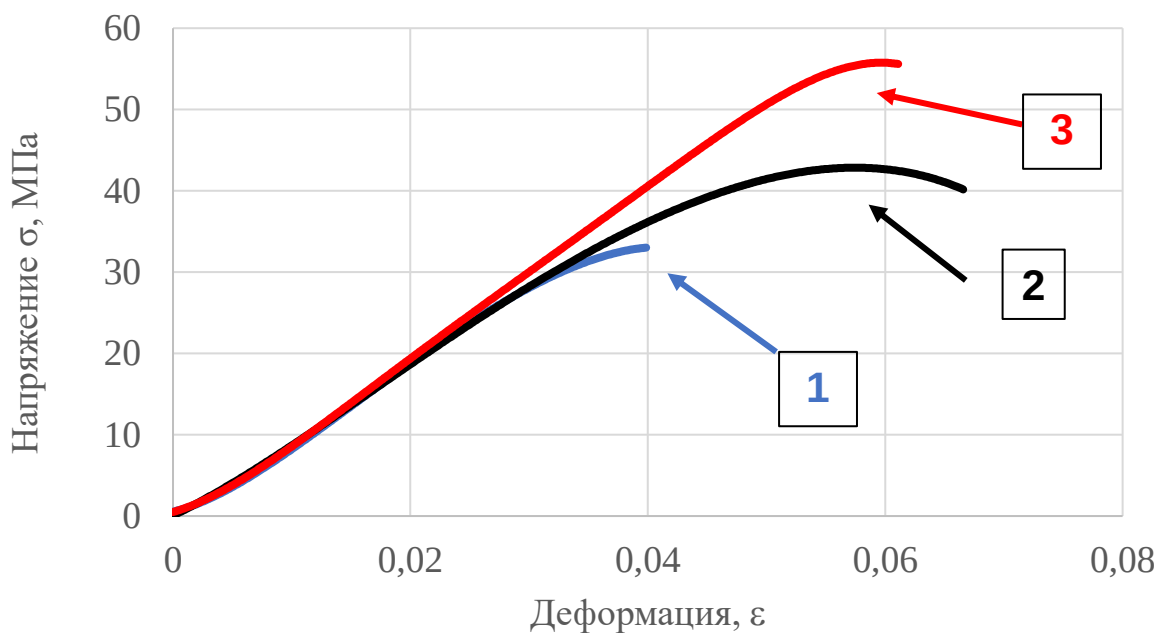


Рисунок 4.5 – Зависимость напряжения от деформации образцов из ПЛА
с толщиной слоя печати 0,3 мм

1 – угол печати 0°; 2 – угол печати 45°; 3 – угол печати 90°

Установлено минимальное влияние толщины слоя печати на разброс прочностных характеристик ПЛА, находящийся в пределах 5 – 10%. Максимальные прочностные характеристики демонстрируют образцы изготовленные под углом печати 90° и составляют 60 МПа, что на 200% больше чем при угле печати 0°, которые составляют 30 МПа. Экспериментальные данные показали, что напряжение текучести при растяжении возрастает с увеличением угла печати или при уменьшении толщины слоя. Угол печати образца от 60° до 90° демонстрирует увеличение напряжения текучести ПЛА от 10 до 46% [80-85].

Влияние температуры термической обработки образцов из ПЛА на прочностные свойства

Растяжение

Результаты моделирования позволили установить, что в процессе формообразования трубопроводов на поверхности гибочного шаблона возникают как растягивающие, так и сжимающие напряжения. Для повышения механических свойств ПЛА проведено исследование по определению влияния термической обработки на предел прочности при растяжении и сжатии. Дифференциальная сканирующая калориметрия филамента ПЛА показала, что структурные изменения происходят в интервале между 60 °С (стеклование) и 170 °С (плавление). Образцы для испытаний на прочность уменьшенного масштаба тип А12 (ГОСТ 33693-2015) изготовлены по технологии FDM на 3D-принтере Raise 3D Pro2 Plus при углах печати 0° и 90° были подвержены термической обработке в течении 60 минут при 70, 85 и 100 °С (рисунок 4.6).

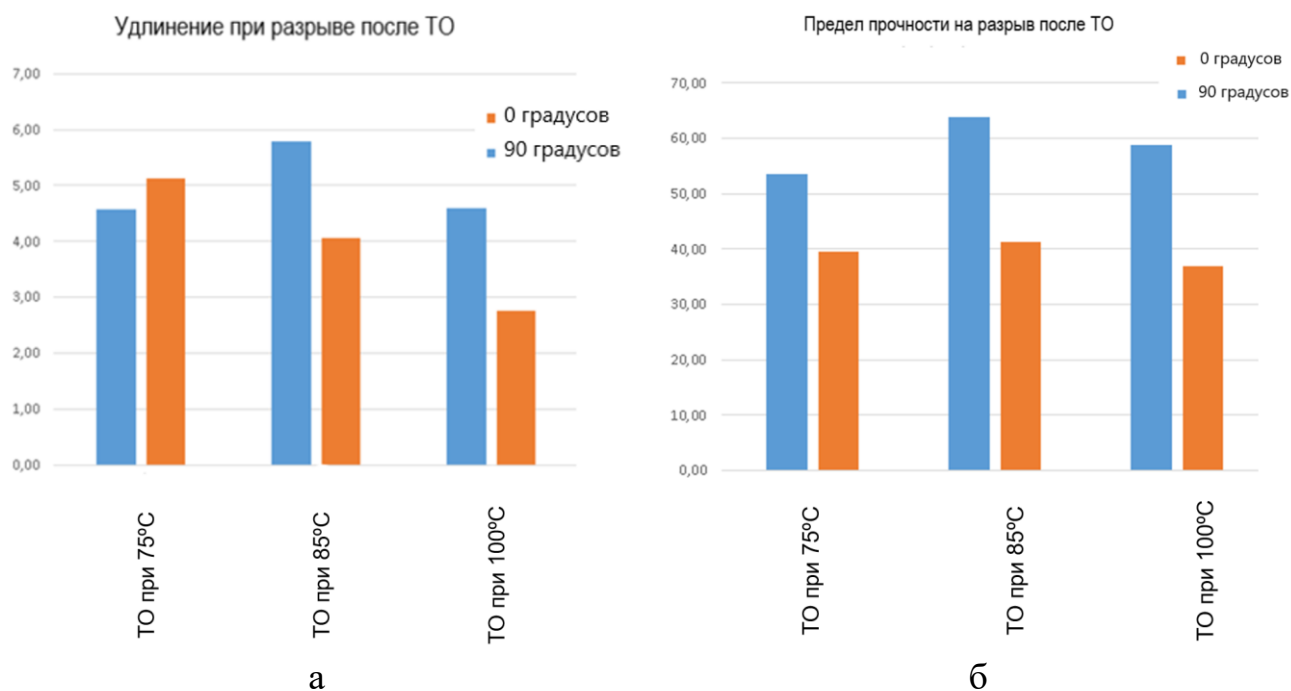


Рисунок 4.6 – Механические характеристики образцов из полилактида ПЛА , термообработанных при температурах 70, 85 и 100°C

а – относительное удлинение δ , %, б – прочность на растяжение σ_b , МПа

Полученные данные по испытанию на прочность образцов из ПЛА изготовленных по технологии FDM при углах печати 0° и 90° и подверженные термической обработке по 70°, 85° и 100°C в течении 60 минут, позволили установить:

- выращенные горизонтально на рабочей платформе (90 градусов) образцы в целом обладают более высокими характеристиками, как по относительному удлинению, так и по прочности;
- наиболее высокими прочностными свойствами обладают образцы термообработанные при 85°C [90].

Сжатие

Результаты механических испытаний на сжатие цилиндрических образцов из ПЛА изготовленных методом 3D-печати [90] по технологии FDM термообработанных при температуре 70, 85 и 100 °C в течении 60 минут представлены на рисунке 4.7.

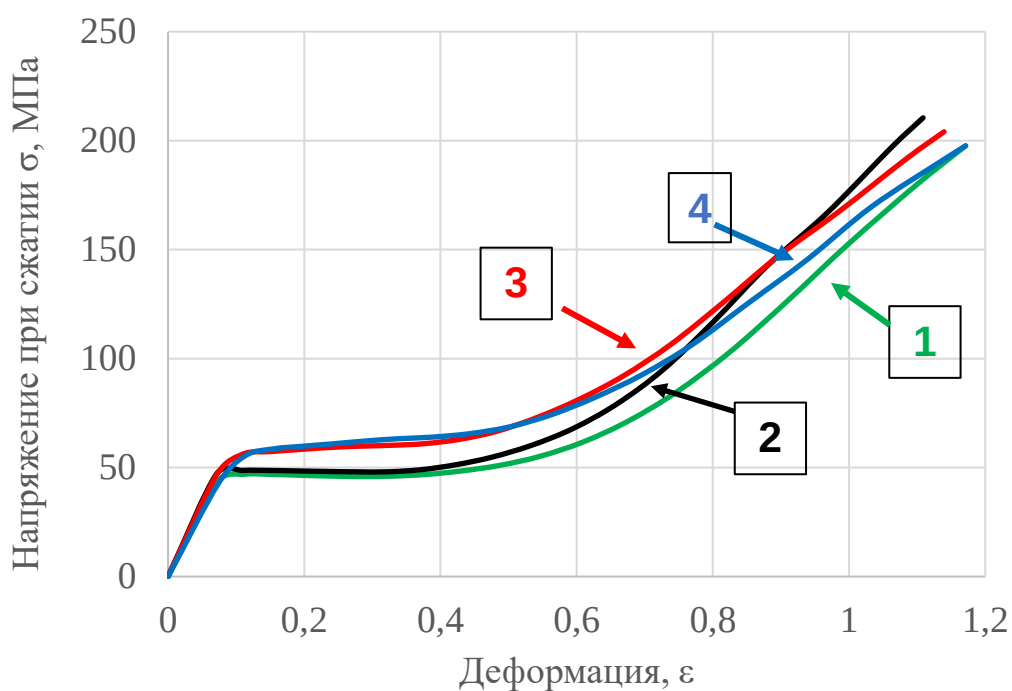


Рисунок 4.7 – Напряжение текучести при сжатии σ образцов из ПЛА в зависимости от температуры термической обработки.

1 – 20 °C, 2 – 70 °C, 3 – 85 °C, 4 – 100 °C;

Получены аналитические зависимости напряжения текучести σ при сжатии от деформации ϵ представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Аналитические зависимости напряжения текучести σ при сжатии от деформации ϵ

Температура, °C	Напряжение σ при сжатии, МПа
1 - 20	$\sigma = 882,24\epsilon^5 - 3275,5\epsilon^4 + 4446\epsilon^3 - 2475,3\epsilon^2 + 568,53\epsilon + 4,9089$
2 - 70	$\sigma = 1346,2\epsilon^5 - 4628,9\epsilon^4 + 5822,9\epsilon^3 - 3012,1\epsilon^2 + 643,13\epsilon + 4,7706$
3 - 85	$\sigma = 1369,9\epsilon^5 - 4751,6\epsilon^4 + 6013,6\epsilon^3 - 3191,1\epsilon^2 + 725,91\epsilon + 3,4853$
4 - 100	$\sigma = 931,08\epsilon^5 - 3477,6\epsilon^4 + 4750,5\epsilon^3 - 2729,2\epsilon^2 + 682,66\epsilon + 2,4978$

Полученные данные позволили установить:

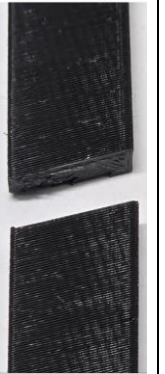
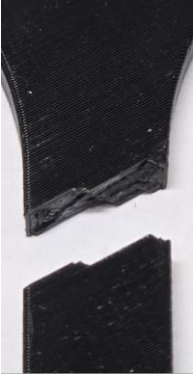
- В процессе сжатия цилиндрических образцов из ПЛА (рисунок 2.3) не происходит разрушения;
- ПЛА обладает большой способностью к деформационному упрочнению при сжатии и напряжение текучести при разрушении примерно в три раза выше, чем при растяжении [108];
- наиболее высокими пластическими и прочностными свойствами обладают образцы термообработанные при 85°C [90].

4.3 Определение экспериментального угла разрушения материала полилактид

На основании теоретической модели поперечно-изотропного разрушения ПЛА установлено, что образцы, изготовленные по технологии FDM, имеют два режима разрушения – межслойный и внутрислойный (рисунок 3.9). Межслойное разрушение возникает при зарождении трещины на границе раздела двух соседних слоев материала и слои материала остаются неповрежденными после разрушения, а угол θ_{σ} между поверхностью разрушения и слоями материала равен от 0° до 45°. Режим внутрислойного разрушения возникает, когда слои материала ломаются, а угол θ_{τ} между поверхностью разрушения и слоями сломанного материала лежит в диапазоне от 60° до 90°.

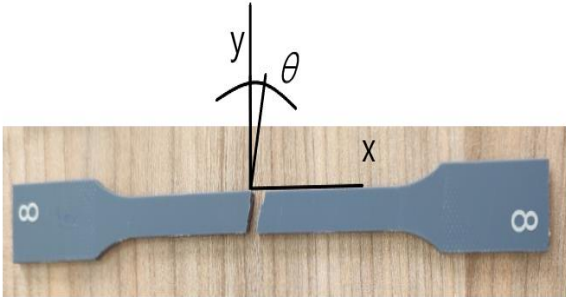
Анализ результатов экспериментальных исследований образцов с толщинами слоев печати 0,1 мм, 0,2 мм, 0,3 мм, приведенных в таблице 4.1, позволил более точно установить характер разрушения (таблица 4.3), где хорошо виден характер межслойного (θ_{σ}), так и внутрислойного (θ_{τ}) разрушения.

Таблица 4.3 – Внешний вид угла разрушения образцов из ПЛА

						
0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Межслойное разрушение - θ_σ				Внутрислойное разрушение - θ_τ		

Экспериментальные результаты определения угла разрушения θ в зависимости от толщины слоя при различных углах печати образцов (ГОСТ 33693-2015) методом 3D-печати FDM позволили установить, что все случаи межслойного разрушения происходят, когда угол печати составляет от 0° до 45°, а внутрислойное разрушение происходит, когда углы печати составляют диапазон от 60° до 90°. Результаты замеров угла разрушения в зависимости от толщины слоя печати на образцах ПЛА представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Экспериментальные результаты определения угла разрушения θ

Образец (ГОСТ 33693-2015)	Толщина слоя печати, мм	Экспериментальный угол разрушения θ для ПЛА, °
	0,1	57
	0,2	55
	0,3	56

Таким образом переход от межслойного разрушения к внутрислойному разрушению происходит на образцах из ПЛА при углах печати от 45° до 60° . Наименьший угол разрушения составил 55° для толщины слоя печати 0,2 мм, а наибольший 57° при толщине слоя 0,1 мм. Исходя из полученных расчетных и экспериментальных данных по характеру разрушения ПЛА был выбран угол печати слоев 67° для изготовления гибочных шаблонов по технологии FDM для гибки трубопроводов на угол до 135° (рисунок 3.11).

4.4 Оценка влияния геометрии гибочного шаблона на овальность и пружинение трубопроводов

Овальность трубопроводов

Найденные экспериментальным путем, угол разрушения θ и данные по характеру разрушения ПЛА были использованы при разработке конструкции гибочного шаблона с повышенной прочностью (рисунок 4.8). Так как гибку трубопроводов диаметром 6 мм с толщиной стенки 1 мм совершали на угол 45° , 90° и 135° , угол печати гибочного шаблона повышенной прочности составил 67° .



а



б

Рисунок 4.8 – Гибочные шаблоны из ПЛА для гибки трубопроводов
диаметром 6 мм из 12X18H10T,

а – шаблон исходной конструкции, б – шаблон повышенной прочности

Для изучения овальности, возникающей при гибке трубопроводов из стали 12X18H10T 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 4.9) видно, что после гибки 3 – 4 первых заготовок наступает стабилизация геометрических параметров [117] и далее овальность практически не изменяется [116]. Все значения овальности на базе испытания 10 образцов находятся в 5% интервале достоверности.

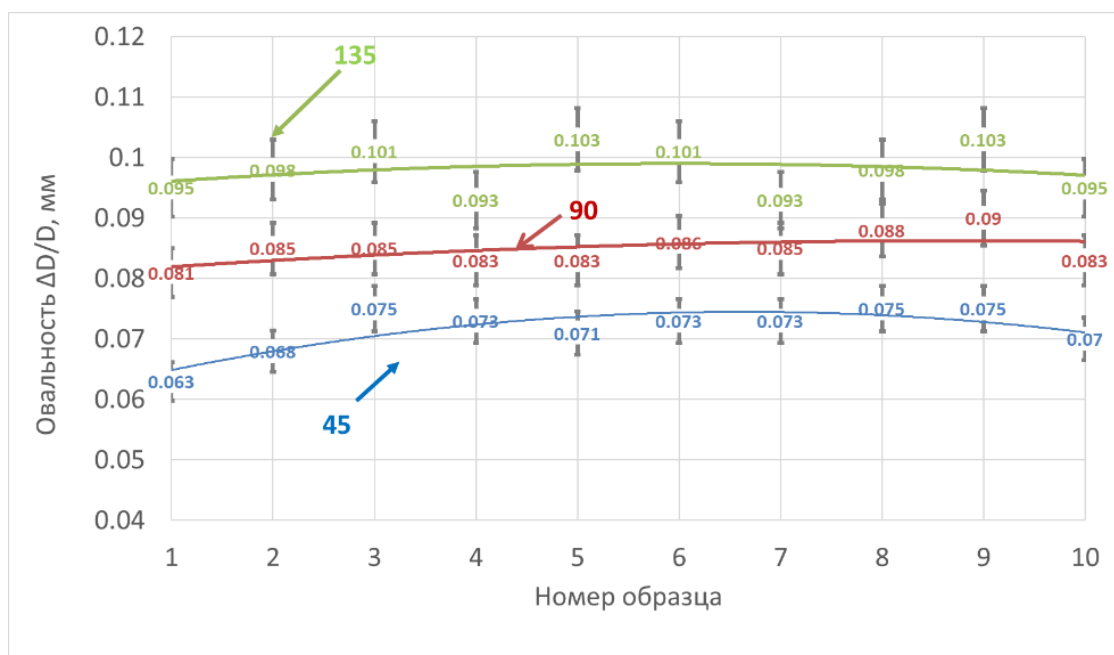


Рисунок 4.9 – Изменение относительной овальности $\Delta D/D$ в процессе гибки 10 заготовок диаметром 6 мм. 45, 90 и 135 – углы гибки

Большое влияние на овальность гнутых трубопроводов оказали геометрические параметры формообразующего гибочного шаблона [116], изготовленного по технологии 3D-печати методом FDM из ПЛА. Испытание двух шаблонов различной конструкции (рисунок 4.8) показало, что использование шаблона повышенной прочности (рисунок 4.8, б), позволяет существенно повысить его прочность, что дало возможность уменьшить овальность в полтора-два раза (рисунок 4.10).

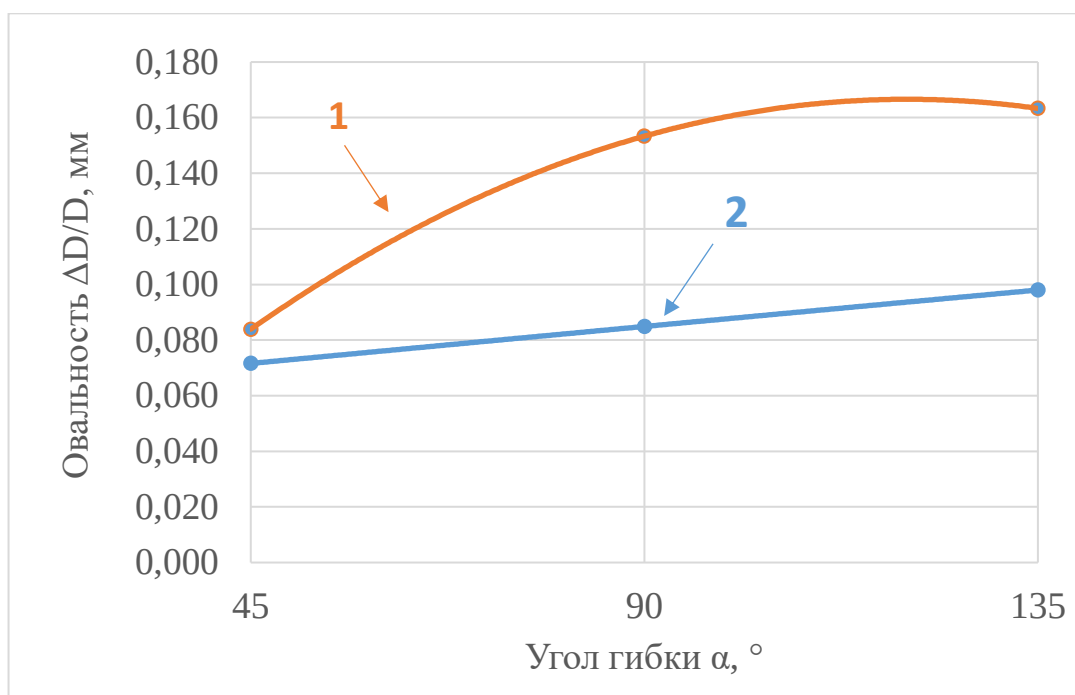


Рисунок 4.10 – Величина овальности трубопровода диаметром 6 мм на угол гибки $\alpha = 45^\circ$; 90° и 135° в зависимости от применяемого гибочного шаблона [116]

1 - шаблон исходной конструкции, 2 - шаблон повышенной прочности

Найденные аналитические зависимости гнутого трубопровода диаметром 6 мм и толщиной стенки 1 мм [100] от угла гибки α для обоих типов гибочных шаблонов позволяют прогнозировать относительную овальность (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Аналитические зависимости относительной овальности $\Delta D/D$ от угла гибки α

№ Шаблона	Относительная овальность, $\Delta D/D$
1	$\Delta D/D = -0.0297\alpha^2 + 0.1586\alpha - 0.045$
2	$\Delta D/D = -0,0001\alpha^2 + 0,0136\alpha + 0,0581$

Определение овальности для трубопроводов диаметром от 6 до 28 мм и толщиной стенки 1 мм в зоне гибки выполнили согласно матрице экспериментов (таблица 2.6). 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 [100].

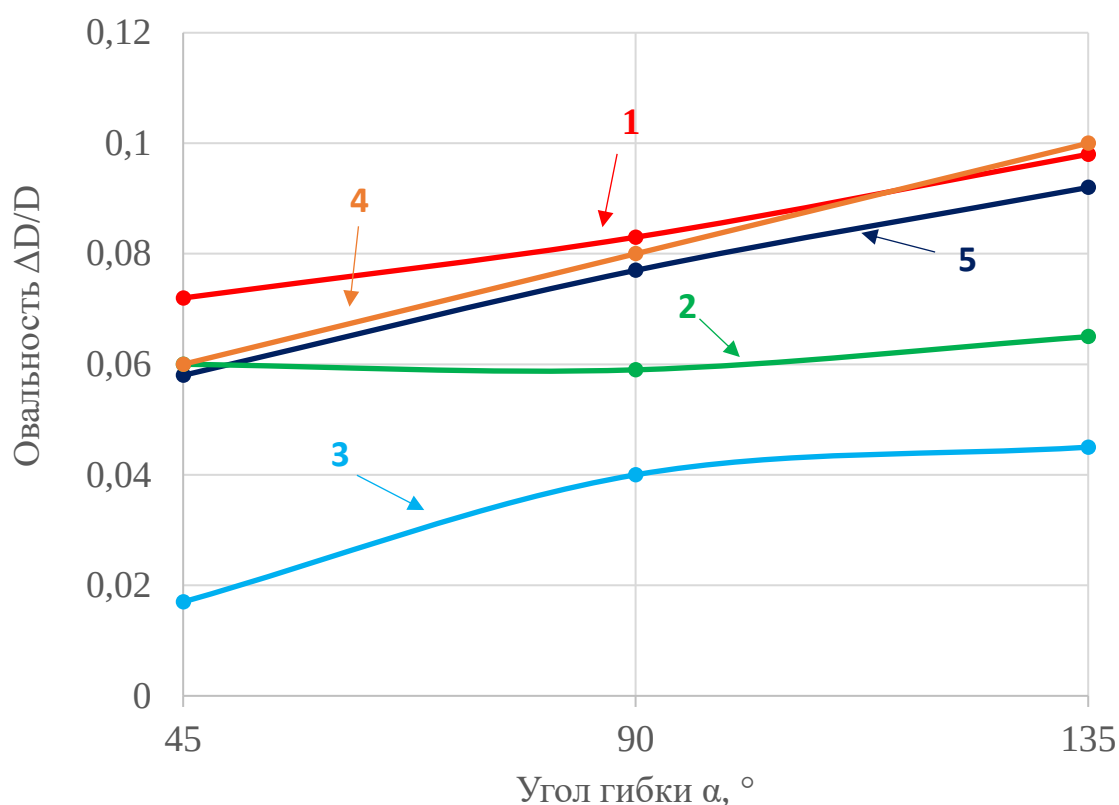


Рисунок 5.1 – Зависимость относительной овальности $\Delta D/D$ от угла гибки α
1 - 6 мм; 2 – 12 мм; 3 – 18 мм; 4 – 24 мм; 5 – 28 мм

Получены аналитические зависимости относительной овальности $\Delta D/D$ в зависимости от угла гибки α для изгибаемых трубопроводов от 6 до 28 мм и толщиной стенки 1 мм на автоматическом трубогибочном станке при помощи гибочного шаблона, изготовленного по технологии FDM из ПЛА (таблица 4.6).

Таблица 4.6 - Аналитические зависимости относительной овальности $\Delta D/D$ от угла гибки α

Д трубы, мм	Относительная овальность, $\Delta D/D$
6	$\Delta D/D = 0,000001\alpha^2 + 0,0001\alpha + 0,065$
12	$\Delta D/D = 0,000002\alpha^2 - 0,0003\alpha + 0,068$
18	$\Delta D/D = -0,000004\alpha^2 + 0,0011\alpha - 0,024$
24	$\Delta D/D = 0,0004\alpha + 0,04$
28	$\Delta D/D = -0,000001\alpha^2 + 0,0006\alpha + 0,035$

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°.

Пружинение трубопроводов

Упругая деформация трубопроводов из стали 12Х18Н10Т характеризуется углом пружинения и существенно зависит от угла гибки [116]. 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 4.11).

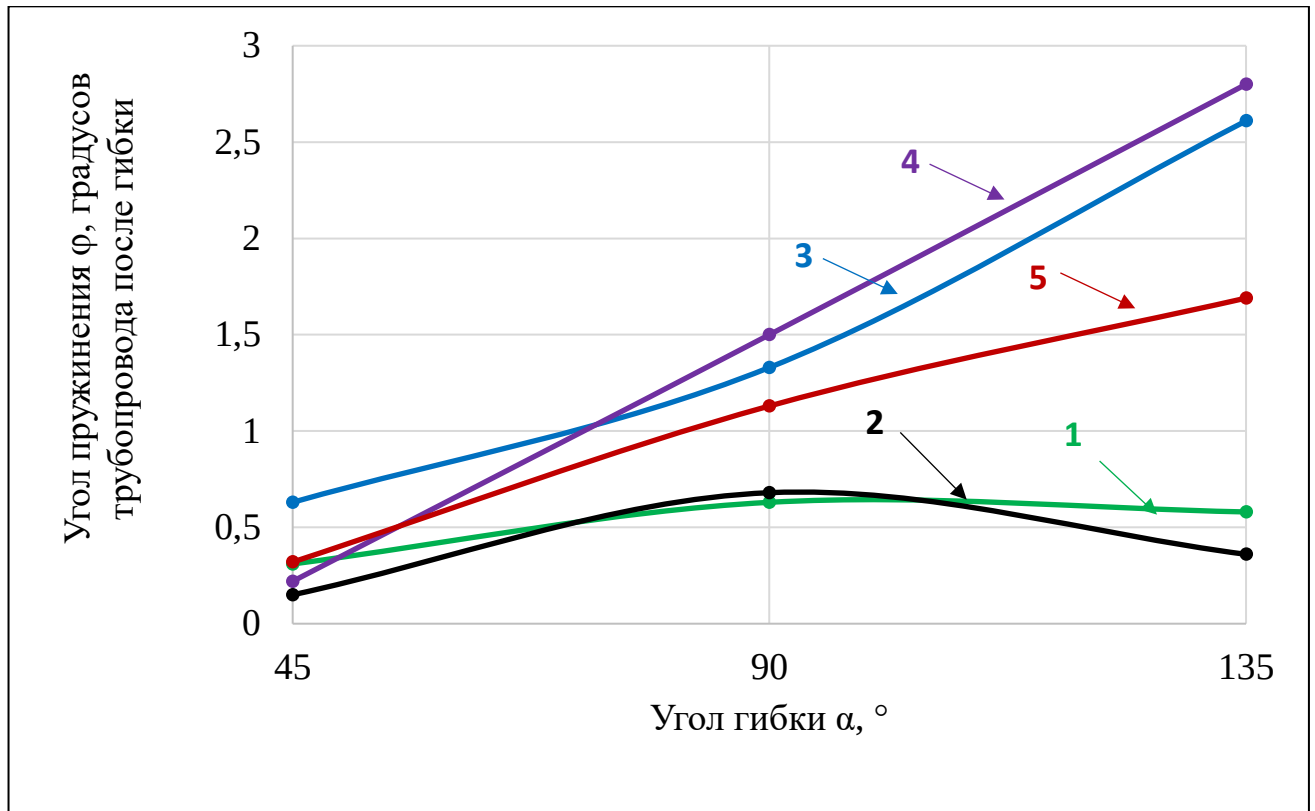


Рисунок 4.11 – Зависимость углов гибки от угла пружинения φ , для изгибаемых трубопроводов 1 – 6 мм; 2 – 12 мм, 3 – 18 мм, 4 – 24 мм и 5 – 28 мм.

Получены аналитические зависимости угла пружинения φ в зависимости от угла гибки α для изгибаемых трубопроводов от 6 до 28 мм толщиной стенки 1 мм на автоматическом трубогибочном станке [116] при помощи гибочного шаблона, изготовленного по технологии FDM из ПЛА (таблица 4.7).

Таблица 4.7 - Аналитические зависимости угла пружинения φ от угла гибки α

Д трубы, мм	Угол пружинения φ , °
6	$\varphi = -0,00009\alpha^2 + 0,0194\alpha - 0,38$
12	$\varphi = -0,0002\alpha^2 + 0,0401\alpha - 1,23$
18	$\varphi = 0,0001\alpha^2 - 0,0038\alpha + 0,51$
24	$\varphi = 0,000005\alpha^2 + 0,0278\alpha - 1,04$
28	$\varphi = -0,00006\alpha^2 + 0,0263\alpha - 0,74$

Полученные аналитические зависимости позволяют прогнозировать относительную овальность и угол пружинения трубопроводов при разработке технологического процесса.

Вывод по главе 4

1. Установлено влияние термической обработки на структурное состояние и механические свойства ПЛА, изготовленного методом FDM. Наиболее выраженные структурные изменения наблюдаются после выдержки при температуре 85 °С в течение 60 мин, что связано с образованием кристаллических структур и изменением соотношения аморфной и кристаллической составляющих материала.

2. Экспериментально установлено существенное влияние угла печати на прочностные характеристики ПЛА. При увеличении угла печати от 0° до 90° предел прочности при растяжении возрастает примерно с 30 до 60 МПа, при этом характер разрушения изменяется от межслойного к внутрислойному. Влияние толщины печатного слоя на прочностные характеристики оказалось менее выраженным и составило порядка 5–10 %.

3. Образцы, термообработанные при 85 °С в течение 60 мин, характеризуются наиболее высокими прочностными и пластическими свойствами как при растяжении, так и при сжатии. Горизонтально выращенные образцы (90°) имеют более высокие характеристики по относительному удлинению и прочности.

4. Экспериментально определен диапазон перехода между основными механизмами разрушения ПЛА. Межслойное разрушение характерно для углов печати 0–45°, внутрислойное — для 60–90°, а переход между механизмами разрушения происходит в диапазоне 45–60°. Средний экспериментальный угол разрушения составил 55–57°, в связи с чем для изготовления гибочных шаблонов выбран угол слоев печати 67°.

5. Установлено влияние конструкции гибочного шаблона из ПЛА на геометрическую точность гнутых трубопроводов. Применение шаблона повышенной прочности позволило снизить овальность труб диаметром 6 мм с толщиной стенки 1 мм в 1,5–2 раза по сравнению с шаблоном исходной

конструкции. Стабилизация овальности наступает после гибки 3–4 первых гибов, далее параметры практически не изменяются. Все значения овальности находятся в 5% интервале достоверности.

6. Установлена закономерность увеличения овальности трубопроводов с ростом угла гибки. Для труб диаметром 6–28 мм при толщине стенки 1 мм увеличение угла гибки от 45° до 135° сопровождается ростом относительной овальности примерно от 0,02 до 0,10. При этом основным геометрическим фактором, влияющим на овальность, является диаметр трубопровода.

7. Установлена зависимость угла пружинения трубопроводов от угла гибки и диаметра трубы. С увеличением угла гибки величина пружинения в общем случае возрастает; наиболее выраженная зависимость наблюдается для труб диаметром 18–28 мм, тогда как для диаметров 6 и 12 мм значения пружинения находятся примерно в диапазоне $0,3\text{--}0,5^\circ$.

8. 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.

ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ

5.1 Анализ и учет угла разрушения ПЛА при изготовлении гибочного шаблона

При проектировании гибочного шаблона для гибки трубопроводов из стали 12Х18Н10Т, изготавливаемого методом 3D-печати по технологии FDM из ПЛА, одним из ключевых технологических параметров, определяющих работоспособность и долговечность гибочного шаблона, является угол печати α (ориентация слоёв материала относительно направления действия растягивающих нагрузок) (рисунок 3.10).

Экспериментальные и теоретические исследования, проведённые в главах 3 и 4, а также известные данные из литературы показывают, что при растяжении образцов из ПЛА 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 θ , значение которого для ПЛА составляет от 50° до 60° в зависимости от толщины слоя печати. При углах печати меньше угла разрушения θ доминирует межслойное разрушение, характеризующееся значительно более низкой прочностью на разрыв, тогда как при углах печати больше угла разрушения реализуется внутрислойное разрушение с существенно более высокими прочностными характеристиками.

Результаты моделирования напряжённо-деформированного состояния гибочного шаблона в процессе гибки показали, что на формообразующий инструмент действуют как сжимающие, так и растягивающие напряжения, причём наибольшую опасность для целостности конструкции представляют именно растягивающие напряжения. Исходя из этого, для обеспечения максимальной стойкости гибочного шаблона необходимо ориентировать слои печати таким образом, чтобы направление действия растягивающих нагрузок соответствовало внутрислойному механизму разрушения, то есть угол печати должен превышать угол разрушения θ . Рекомендуемое значение угла печати для гибочного шаблона

составляет от 60° до 90° , а для изготовления опытных гибочных шаблонов для гибки трубопроводов на углы до 135° был выбран угол печати 67° .

Дополнительным подтверждением правильности такого выбора служат результаты механических испытаний, показавшие, что предел прочности на растяжение образцов с углом печати 90° примерно на 200 % выше, чем у образцов с углом печати 0° . Кроме того, при выборе угла печати необходимо учитывать толщину слоя: для нагруженного гибочного шаблона предпочтительна толщина слоя печати 0,2 миллиметра, что обеспечивает не только более высокую 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 прочность и ресурс гибочного шаблона.

Таким образом, экспериментальные результаты подтвердили достоверность предложенной теоретической модели поперечно-изотропного угла разрушения θ для ПЛА (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Сравнение экспериментального и расчетного угла разрушения

Толщина слоя печати, мм	Угол разрушения θ для ПЛА, $^\circ$		
	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 θ в образцах из ПЛА, изготовленных методом 3D-печати по технологии FDM позволяют проектировать конструкцию формообразующего гибочного шаблона с учетом его самых нагруженных участков при гибке трубопроводов.

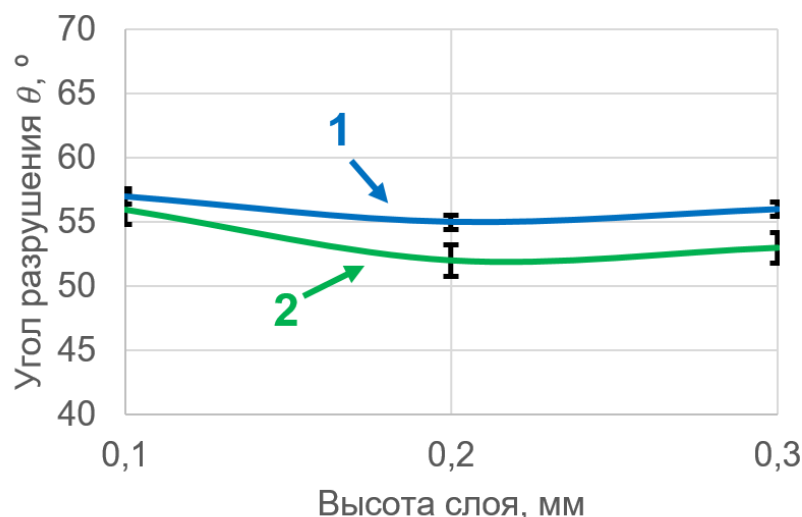


Рисунок 5.1 – Угол разрушения θ в зависимости от толщины слоя печати.

Величина фактора достоверности 6%

1 – экспериментальные данные; 2- расчетные данные

Таким образом расчетная модель угла разрушения ПЛА в зависимости от угла толщины слоя печати соответствует экспериментальному с погрешностью, не превышающей 6%.

5.2 Геометрические параметры трубопроводов, получаемые при гибке гибочным шаблоном из ПЛА

В процессе гибки трубопроводов из стали 12X18H10T с использованием гибочного шаблона, изготовленного по технологии FDM из ПЛА [116], установлен ряд закономерностей, определяющих геометрическую точность получаемых трубопроводов после гибки. Основными контролируемыми геометрическими параметрами являются относительная овальность поперечного сечения и угол пружинения заготовки после снятия нагрузки.

Экспериментальные исследования, выполненные на трубогибном автомате с применением гибочных шаблонов из ПЛА, показали, что в процессе последовательной гибки партии заготовок наблюдается стабилизация геометрических параметров. Установлено, что после формообразования 3–4

первых заготовок наступает период, в котором овальность и точность угла гибки практически не изменяются. Все последующие значения овальности при испытании партии из 10 заготовок находятся в пределах 5 % интервала достоверности. Это свидетельствует о том, что полимерный гибочный шаблон после начальной приработки обеспечивает стабильные условия гибки без существенного износа или деградации свойств.

Зависимость овальности от угла гибки

Характер изменения овальности в зависимости от угла гибки различается для инструментов разной жесткости. Для гибочного шаблона исходной конструкции с увеличением угла гибки от 45° до 135° наблюдается более выраженный рост овальности, тогда как для гибочного 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 12X18H10T 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 зонегиба. При этом усиливаются растяжение наружной и сжатие внутренней поверхностей трубопровода, что приводит к большему сплющиванию поперечного сечения и росту величины овальности.

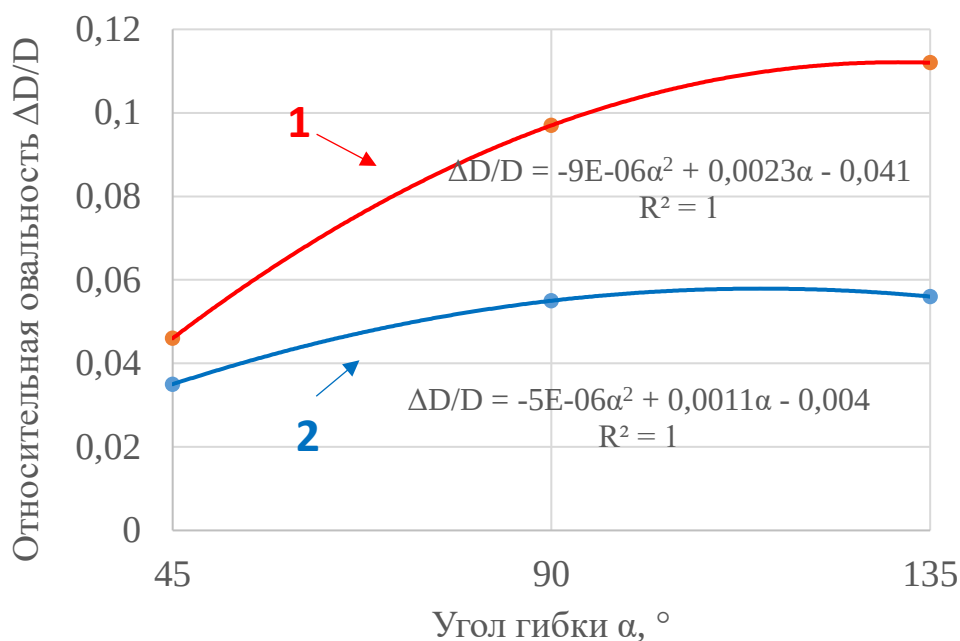


Рисунок 5.2 – Сравнение расчетной и экспериментальной овальности трубной заготовки диаметром 18 мм толщиной стенки 1 мм

1 – расчетные данные овальности; 2 – экспериментальные данные овальности

Влияние свойств гибочного шаблона на пружинение

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 5.3).

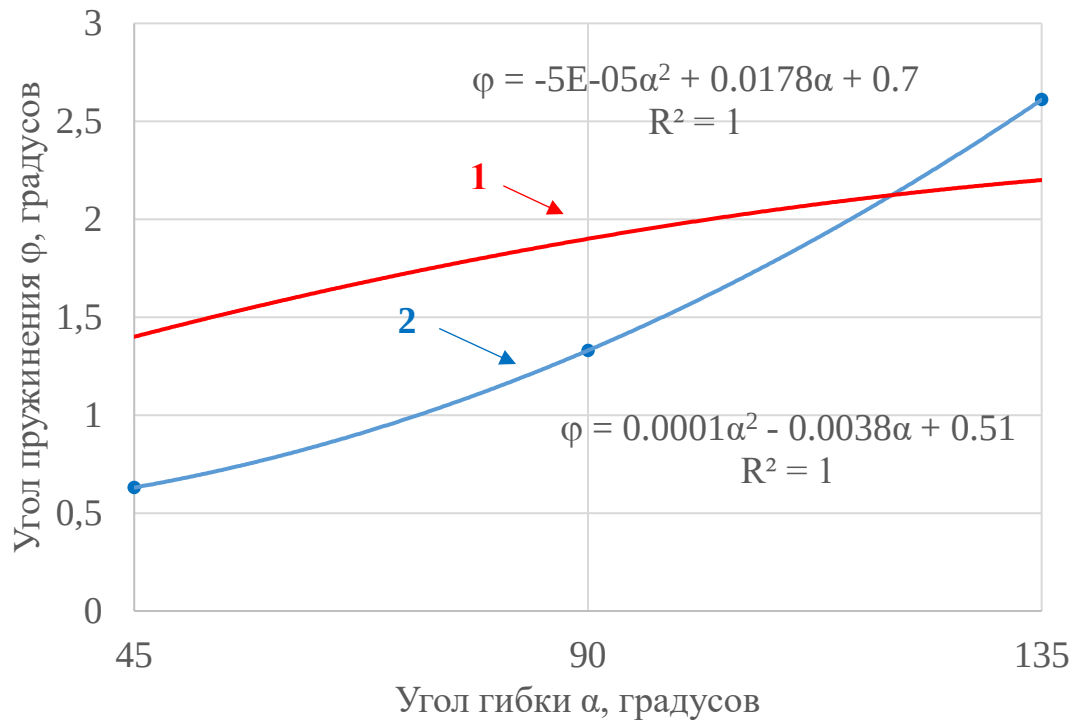


Рисунок 5.3 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных по углу пружинения трубной заготовки диаметром 18 мм; на угол гибки 45°, 90° и 135°

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.

5.3 Анализ растягивающих и сжимающих напряжений в инструменте из ПЛА в процессе формообразования трубной заготовки

При исследовании напряженно-деформируемого состояния гибочного шаблона, изготовленного методом 3D-печати по технологии FDM из полимерного материала ПЛА для гибки трубопроводов из стали 12X18Н10Т было установлено, что ручей шаблона испытывает как сжимающие, так и растягивающие напряжения (рисунок 3.6).

Сравнение расчетных и экспериментальных данных при растягивающих и сжимающих нагрузках на гибочный инструмент из материала ПЛА показывает, что расчетные данные по моделированию прочностных свойств гибочного шаблона (рисунок 3.4) не выходят за пределы прочностных характеристик материала ПЛА, определенных экспериментальным путем (рисунки 5.4-5.5).

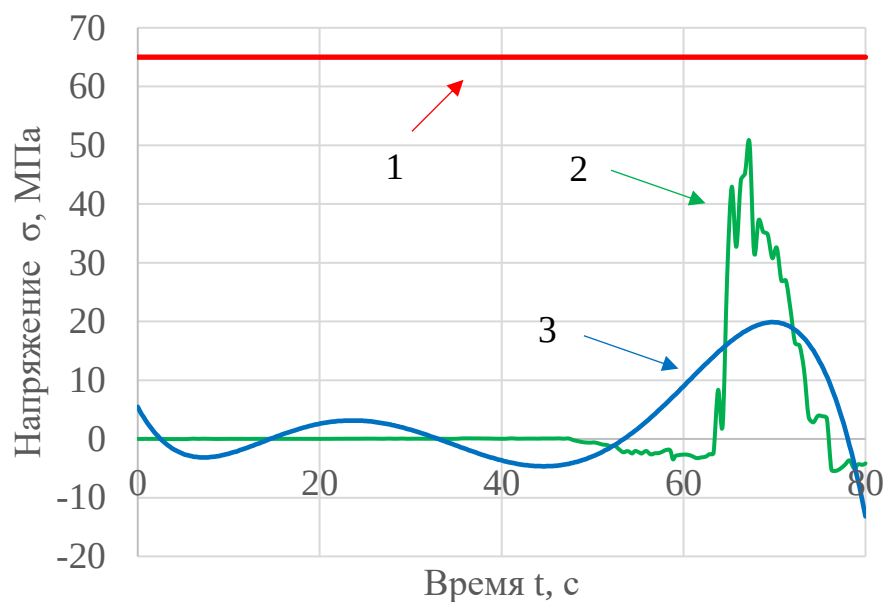


Рисунок 5.4 – Сравнение расчетных и экспериментальных растягивающих напряжений на гибочном шаблоне из ПЛА

- 1- напряжение текучести ПЛА при растяжении;
- 2- растягивающие напряжения в гибочном шаблоне (моделирование)
- 3- линия тренда

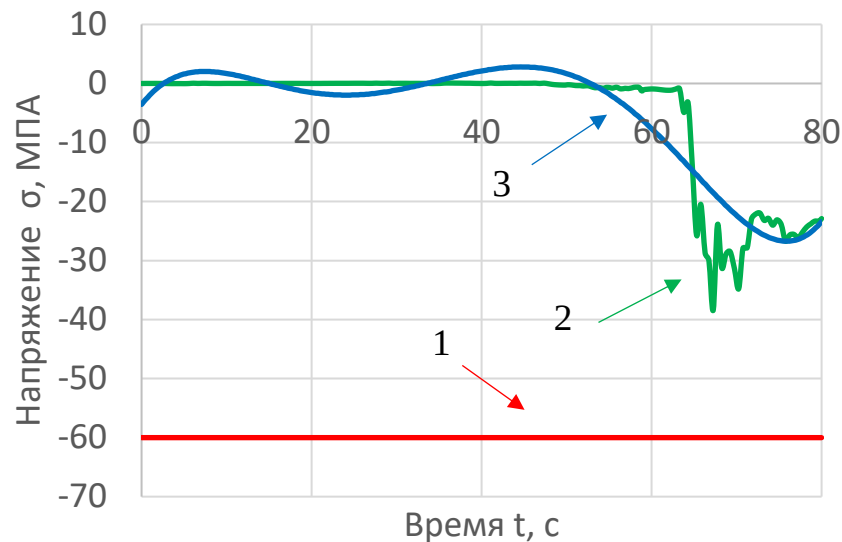


Рисунок 5.5 – Сравнение расчетных и экспериментальных растягивающих напряжений на гибочном шаблоне из ПЛА

1- напряжение текучести ПЛА при сжатии;

2- сжимающие напряжения в гибочном шаблоне (моделирование)

3- линия тренда

Таким образом гибочный шаблон изготовленный по технологии FDM из ПЛА может быть успешно использован при гибке на автоматизированном трубогибочном станке с ЧПУ для гибки трубопроводов диаметром от 6 до 36 мм.

5.4 Анализ структурных изменений в ПЛА

При нагреве в материале филамента ПЛА протекают сложные структурные изменения, которые происходят в диапазоне между температурами плавления (170 °С) и стеклования (63 °С) [90], что, меняет соотношение аморфной и кристаллической составляющих структуры [69-70,39-44].

На этом основании и с учетом того факта, что при нагреве ПЛА на температуру выше 100 °С имеет место его значительная деформация, для термической обработки образцов были выбраны три температуры: 70, 85 и 100 °С. Выбранные значения [90] термической обработки ПЛА позволяют изменить соотношение аморфной и кристаллической структуры. Метод определения степени

кристаллизации дифференциальная сканирующая калориметрия филамента ПЛА и экспериментальные работы по термической обработке с изучением структурных изменений полимера показали, что механические свойства ПЛА возможно повысить за счет проведения термической обработки и увеличить его прочность на 20 - 28%.

Наиболее заметные структурные изменения ПЛА (рисунок 5.6, а) наблюдали после термической обработки при температуре $T = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выдержкой в печи в течение 60 минут. В процессе термической обработки произошло образование кристаллических структур, способных повлиять на многие свойства полилактида, такие как плотность, предел прочности при растяжении и сжатии, что подтверждается исследованиями других авторов [42]. Выбор температуры термической обработки основан на дифференциальной сканирующей калориметрии филамента ПЛА, который показал, что структурные изменения происходят в диапазоне от $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $170\text{ }^{\circ}\text{C}$.

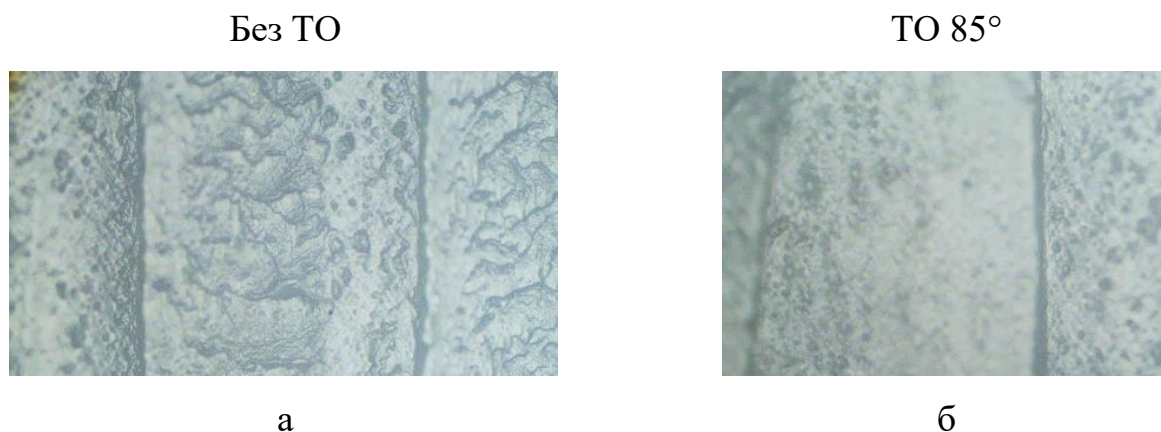


Рисунок 5.6 – Сравнение структурных изменений ПЛА до и после ТО

Полученные данные позволили установить, что термическая обработка при 85° в течении 60 минут приводит к структурной релаксации материала и повышению степени кристалличности. В результате происходит упорядочивание структуры полимерных цепей, уменьшение внутренних напряжений, сформированных при аддитивном изготовлении, и изменение морфологии

материала, это сопровождается повышением структурной стабильности и прочности ПЛА, увеличивающие предел текучести на 15-20%.

Вывод по главе 5

В ходе выполнения экспериментальных и расчётных исследований, представленных в главе 5, были получены следующие основные результаты и сделаны обоснованные выводы:

1. Подтверждена достоверность теоретической модели поперечно-изотропного угла разрушения ПЛА. Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями угла разрушения для толщины печатного слоя 0,1–0,3 мм не превышает 6 %, что позволяет использовать модель при проектировании гибочных шаблонов с учетом наиболее нагруженных участков.

2. Определены рациональные параметры изготовления гибочного шаблона из ПЛА методом FDM: угол ориентации слоев 67° , толщина печатного слоя 0,2 мм и последующая термическая обработка при 85°C в течение 60 мин. Выбранная ориентация слоев обеспечивает переход от преимущественно опасного межслойного к внутрислойному механизму разрушения и повышает прочность и ресурс гибочного шаблона.

3. Сравнение расчетной и экспериментальной овальности при гибке трубопровода из стали 12X18H10T диаметром 18 мм и толщиной стенки 1 мм демонстрирует стабильное увеличение относительной овальности с увеличением угла гибки от 45° до 135° .

4. Установлено влияние угла гибки на овальность и пружинение трубопроводов из стали 12X18H10T. С увеличением угла гибки от 45° до 135° происходит увеличение относительной овальности вследствие роста пластической деформации и усиления растяжения наружной и сжатия внутренней поверхности трубопровода. Одновременно возрастает угол пружинения вследствие увеличения накопленной упругопластической деформации.

5. Установлено соответствие расчетных и экспериментальных данных по напряженно-деформированному состоянию гибочного шаблона из ПЛА.

Полученные результаты показывают, что расчетные растягивающие и сжимающие напряжения не превышают экспериментально определенных прочностных характеристик ПЛА, что подтверждает возможность применения FDM-шаблона для гибки трубопроводов диаметром 6–36 мм на автоматизированном трубогибочном станке с ЧПУ.

6. Установлено влияние термической обработки на структуру и механические свойства ПЛА. Термообработка при 85 °С в течение 60 мин приводит к структурной релаксации, повышению степени кристалличности, упорядочиванию полимерных цепей и снижению внутренних напряжений, сформированных при FDM-печати. В результате прочность ПЛА повышается на 20–28 %, а предел текучести — на 15–20 %.

ГЛАВА 6. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

6.1 Разработка технологии, промышленное освоение и оценка эффективности применения гибочного шаблона с регламентированной структурой и повышенным комплексом эксплуатационных свойств для гибки трубопроводов из стали 12X18H10T

Для выполнения цели исследования были изготовлены методом 3D-печати FDM гибочные шаблоны из материала ПЛА для гибки трубопроводов из стали 12X18H10T диаметром от 6 до 36 мм, толщиной стенки 1 мм (рисунок 6.1) [116]. При изготовлении гибочных шаблонов был выбран угол печати 67 градусов и проведена термическая обработка в течение 60 минут при 85°C.

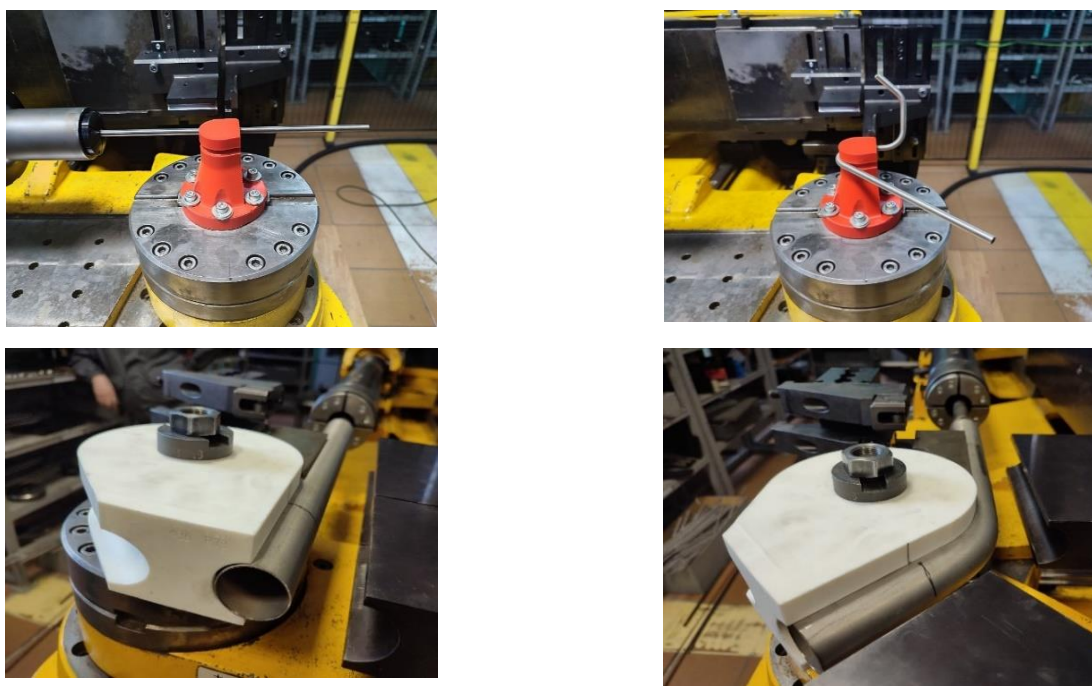
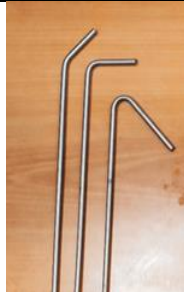


Рисунок 6.1 – Гибочные шаблоны для гибки трубопроводов из стали 12X18H10T

Результаты применения гибочного шаблона изготовленного по технологии 3D-печати методом FDM из ПЛА для гибки трубопроводов из стали 12X18H10T на автоматическом трубогибочном станке с ЧПУ мод. SILFAX SE 50L/R [116] представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Трубопроводы диаметром 6, 12, 18, 24, 28 и 36 мм. Угол гибки 45°, 90° и 135° градусов

Трубопроводы после гибки, Ø мм					
6	12	18	24	28	36
					

Ключевые достижения от внедрения гибочного шаблона изготовленного методом 3D-печати по технологии FDM:

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 гибочного шаблона под конкретную задачу;
4. Надежность – после 1500 рабочих циклов инструменты не показали признаков разрушения или критической деформации. Овальность трубопроводов соответствовала техническим требованиям.

6.2 Обоснование экономической эффективности внедрения разработанной технологии при производстве трубопроводов.

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 6.2.

Таблица 6.2 – Сравнение времени изготовления гибочного шаблона традиционным способом и методом 3D-печати

№ П/П	Гибочный шаблон для гибки трубопроводов Ø, мм	Время изготовления традиционным способом, н/ч	Время изготовления методом 3D-печати, н/ч
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 (T_1 и T_2), стоимость нормо-часа ($Ч_1$ и $Ч_2$), общее количество изделий (Π).

Экономический эффект рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{фот}} = (T_1 \times Ч_1 - T_2 \times Ч_2) \times \Pi \quad (6.1)$$

В таблице приведены данные трудоемкости и стоимости изготовления гибочных шаблонов для гибки трубопроводов диаметром от 6 до 36 мм.

Таблица 6.3 – Трудоемкость и стоимость работ изготовления гибочного шаблона

№ п/п	Гибочный шаблон для гибки трубопроводов Ø, мм	T_1 , н/ч	T_2 , н/ч	$Ч_{1\text{cp}}$	$Ч_{2\text{cp}}$
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 типовых изделий гибочного шаблона выведены средние значения трудоемкости и стоимости нормо-часа на изготовления 1 комплекта гибочного инструмента, по которым рассчитан экономический эффект:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{фот}} &= (T_{1\text{ср}} \times Ч_{1\text{ср}} - T_{2\text{ср}} \times Ч_{2\text{ср}}) \times \Pi = (63,3 \times 352,39 - 10,85 \times 406) \times 6 \\ &= 107\,405 \text{ руб.} \end{aligned}$$

В результате за счет изменения трудоемкости изготовления изделий экономический эффект на 1 мотор-комплект 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 главе 6

В ходе оценки эффективности разработанной технологии изготовления гибочного шаблона из ПЛА методом 3D-печати FDM для гибки трубопроводов из стали 12X18Н10Т были получены следующие основные результаты и сделаны обоснованные выводы:

1. Изготовлен комплект гибочных шаблонов для гибки трубопроводов длиной 400мм, диаметром от 6 до 36 мм с толщиной стенки 1 мм. При изготовлении учтены рациональные параметры 3D-печати (ориентация слоёв, толщина слоя и % заполнения) и проведена термическая обработка (при 85 °С в течение 60 минут).

2. Испытания гибочного шаблона на трубогибочном станке с ЧПУ SILFAX SE 50L/R показали, что после 1500 рабочих циклов шаблон не имеет признаков разрушения или критической деформации, а овальность готовых трубопроводов соответствует техническим требованиям. Это подтверждает достаточную стойкость и ресурс полимерного гибочного шаблона для серийного производства.

3. Время производства гибочного шаблона сократилось в 5 раз по сравнению с традиционными технологиями его изготовления из стали. Снижение

трудоемкости при 3D-печати достигнуто для гибочного шаблона диаметром 36 мм – с 93 до 20,5 нормо-часов, что составляет снижение на 78 %.

4. Себестоимость оснащения гибочными шаблонами снизилась на 80%. Расчёт экономического эффекта по фонду оплаты труда, выполненный на основе средних значений трудоемкости и стоимости нормо-часа для комплекта гибочного шаблона, показал экономию в размере 107 405 рублей на 1 мотор-комплект.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в теоретическом обосновании, разработке и промышленной реализации технологии гибки трубопроводов из стали 12X18H10T длиной 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 12X18H10T. 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 °С 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 $45\text{--}60^\circ$. 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 12X18H10T 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марьин Б.Н., Сапожников В.М., Иванов Ю.Л. и др. Изготовление трубопроводов гидрогазовых систем летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1998. 400 с.
2. Циолковский К.Э., Хейн Вин Зав. Экспериментальные исследования процесса ротационного обжима труб в производстве деталей летательных аппаратов. Фундаментальные исследования. 2014. №12. Ч. 8. С. 1714 – 1718.
3. Гальперин А.И. Машины и оборудование для гнутья труб. – М.: Машиностроение, 1967. 52 с.
4. Никитин В.А. Проектирование станков холодной и горячей гибки труб. СПб.: ОАО «ЦТСС», 2011. 236 с.
5. Туркин В.С. Деформации металла труб в упругопластической стадии. М.: ВНИИСТ ГЛАВГАЗА СССР, 1961. 87 с.
6. Лукьянов В.П., Маткава И.И., Бойко В.А., Доценко Д.В. Параметры холодной гибки листовых заготовок, прутков и труб. – М.: Машиностроение-1, 2005. 151 с.
7. Yang H., Li H., Zhang Z. et al. Advances and Trends on Tube Bending Forming Technologies // Chinese Journal of Aeronautics. 2012. Vol. 25, No. 1. P. 1–12. DOI: 10.1016/S1000-9361(11)60356-7.
8. Jiang L., Zhang S., Wang Y. et al. Research on bending forming method of large diameter-thickness ratio thin-walled tubes for aerospace // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 102. P. 3037–3049.
9. SAE International. AIR5378A: Aircraft Tube Bending Methods, Techniques and Tooling. SAE International. 2022.
10. Гальперин А.И. Машины и оборудование для изготовления криволинейных участков трубопроводов. М.: НЕДРА, 1983. 203 с.
11. Алексеев Ю.Н. Вопросы пластического течения металлов. – Харьков: Издательство Харьковского университета. 1958. 214 с.

12. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ганаго О.А. и др. Теория обработки металлов давлением (Вариационные методы расчета усилий и деформаций) / под ред. И.Я. Тарновского. М.: Metallurgizdat. 1963. 672 с.
13. Колмогоров В.Л. Вариационные (энергетические) методы // Теория пластических деформаций металлов / под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. М.: Машиностроение. 1983. С. 212–279.
14. Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки. М.: Машиностроение. 1989. 304 с.
15. Билобран Б.С. Сплющивание тонкостенных труб при холодном пластическом изгибе // Кузнечно-штамповочное производство. 1968. № 7. С. 20–23.
16. Билобран Б.С. Об изгибающем моменте и остаточной кривизне при пластическом изгибе труб // Кузнечно-штамповочное производство. 1969. № 6. С. 18–20.
17. Билобран Б.С. Влияние сплющивания на основные параметры свободного пластического изгиба тонкостенных труб // Кузнечно-штамповочное производство. 1969. № 6. С. 18–20.
18. Вдовин С.И. Расчет параметров оси трубы при изгибе поперечной силой // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2010. № 11. С. 14–19.
19. Мордасов В.И. Исследование анизотропии свойств в тонкостенных трубах из цветных сплавов // Теория и технология обработки металлов давлением: межвузовский сборник. Вып. 71. Куйбышев: КуАИ. 1975. С. 111–117.
20. Корнилов В.А. Совершенствование технологии многоколенной пространственной гибки труб проталкиванием на роликовой машине: диссертация канд. техн. наук. М., 2013. 105 с.
21. Марьин Б.Н., Марьин С.Б., Прохоров А.Г. и др. Газовые системы летательных аппаратов. Владивосток: Дальнаука. 2006. 459 с.
22. Рубанов В.Г., Филатов А.Г. Моделирование систем: учебное пособие. Белгород: Изд-во БГТУ, 2006. 349 с.

23. Феоктистов С.И. и др. Теория и практика изготовления элементов трубопроводов летательных аппаратов. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ». 2013. 88 с.
24. Kyriakides S., Yeh M.K. Plastic Anisotropy in Drawn Metal Tubes // *Journal of Engineering for Industry*. 1988. Vol. 110. P. 303–310.
25. Corona E., Lee L.-H., Kyriakides S. Yield anisotropy effects on buckling of circular tubes under bending // *International Journal of Solids and Structures*. 2006. Vol. 43, No. 22–23. P. 7099–7118.
26. Franz W.-D. Maschinelles Rohrbiegen. Verfahren und Maschinen. Dusseldorf: VDI-Verlag, 1988. 237 p.
27. 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*. 2020. № 4. С. 90–96.
28. Глазков А.В. Технология холодной гибки труб методом продольного раскатывания // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование*. 2012. № 4. С. 133–134.
29. Di Angelo L., Di Stefano P., Dolatnezhadsomarin A., Guardiani E., Khorram E. A reliable build orientation optimization method in additive manufacturing: the application to FDM technology // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 108. P. 263–276.
30. Дожделев А.М. и др. Обзор расходных материалов для 3D печати методом послойного наплавления // *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2019. Vol. 8-2. С. 16–18. DOI: 10.24411/2500-1000-2019-11481.
31. Алсайд 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: 10.37890/jwt.vi63.73.

32. Жуков А.В., Никифоров А.А., Яковишин А.С. Пластмассы для аддитивных технологий (обзор) // Вестник СГТУ. Машиностроение и машиноведение. 2021. № 4 (91). С. 57–69.
33. Залогин М.Ю. и др. Экспериментальное определение и сравнительный анализ характеристик прочности полимеров PPH030GP, ABS и PLA при различных скоростях деформации // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 3. С. 223–239. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-3-233-239.
34. He Y., Shen M., Wang Q., Wang T., Pei X. Effects of FDM parameters and annealing on the mechanical and tribological properties of PEEK // Composite Structures. 2023. Vol. 313. 116901.
35. 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. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-2-107-113.
36. Машков Ю.К., Байбарацкая М.Ю., Григоревский Б.В. Конструкционные пластмассы и полимерные композиционные материалы: учеб. пособие. Омск: Издательство ОмГТУ. 2002. 129 с.
37. Кунин С. Вычислительная физика. М.: Мир, 1992. 518 с.
38. Chueca de Brujin A., Gomez-Gras G., Fernandez-Ruano L., Farras-Tasias L., Perez M.A. Optimization of a combined thermal annealing and isostatic pressing process for mechanical and surface enhancement of Ultem FDM parts using Doehler experimental designs // Journal of Manufacturing Processes. 2023. Vol. 85. P. 1096–1115.
39. Kartal F., Kaptan A. Effects of Annealing Temperature and Duration on Mechanical Properties of PLA Plastics Produced by 3D Printing // Turkish Journal of Engineering. 2023. Vol. 7. P. 152–159.
40. Pazhamannil R.V., Krishnan C.N., Edacherian G.P.A. Investigations into the effect of thermal annealing on fused filament fabrication process // Advances in Materials and Processing Technologies. 2022. Vol. 8. P. 710–723.

41. Chen J., Deng C., Hong R., Fu Q., Zhang J. Effect of thermal annealing on crystal structure and properties of PLLA/PCL blend // *Journal of Polymer Research*. 2020. Vol. 27. Article 312.
42. Jayanth N., Jaswanthraj K., Sandeep S., Mallaya N.H., Siddharth S.R. Effect of heat treatment on mechanical properties of 3D printed PLA // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2021. Vol. 123. 104764.
43. Windheim N., Collinson D.W., Lau T., Brinson L.C., Gall K. The influence of porosity, crystallinity and interlayer adhesion on the tensile strength of 3D printed polylactic acid (PLA) // *Rapid Prototyping Journal*. 2021. Vol. 27. P. 1327–1336.
44. Zisopol D.G., Portoaca A.I., Nae I., Ramadan I.N. A comparative analysis of the mechanical properties of annealed PLA // *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2022. Vol. 12. P. 8978–8981.
45. Сухоруков Д.В., Прусов Е.С., Деев В.Б., Вахидов У.Ш. Повышение износостойкости модельной оснастки из полимерных композиционных материалов // *Ползуновский вестник*. 2025. № 1. С. 262–266.
46. NTNU (Norwegian University of Science and Technology). Additive manufacturing of low-cost tooling for rotary draw bending of aluminium tubes: a combined metal-polymer mandrel design // *Materials Research Proceedings*. 2023. Vol. 37. P. 89–98.
47. Nature Scientific Reports. Evaluation of FDM-printed polymer dies for cup drawing and V-bending of stainless steel SS304 and aluminium AA6061 // *Scientific Reports*. 2026. Vol. 16. Article 12458.
48. Giorleo L., Deniz K.I. Effectiveness of FDM-printed polymer punches and dies in bending of AISI 314 stainless steel sheets: effect of printing orientation // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2024. Vol. 8(3). P. 112.
49. Abe Y., Sato Y., Kondo T., Hasegawa T. Digital image correlation-based deformation analysis of PLA tools in V-bending processes // *Key Engineering Materials*. 2025. Vol. 1002. P. 55–62.

50. DLR (German Aerospace Center). Comparative analysis of laminate properties formed on metal and PA6 polymer tooling for automated tape laying // CEAS Aeronautical Journal. 2025. Vol. 16. P. 211–223.

51. Исследование Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ). Разработка технологии изготовления полимерной оснастки для штамповки авиационных деталей из листового алюминия с использованием реактивных пластиков // Известия вузов. Машиностроение. 2025. № 4. С. 56–67.

52. Tronvoll S.A., Treffen H., Ma J., Welo T. Low-cost tooling concept for customized tube bending by the use of additive manufacturing // Materials Research Proceedings. 2023. Vol. 28. P. 969–976. DOI: 10.21741/9781644902479-106.

53. Giorleo L., Ceretti E. Deep drawing punches produced using fused filament fabrication technology: Performance evaluation // Journal of Manufacturing Processes. 2022. Vol. 84. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.09.054.

54. Giorleo L., Ceretti E. Aluminium deep drawing with additive manufacturing polymer punches: analysis of performance in small batch production // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023. Vol. 128. P. 2175–2185. DOI: 10.1007/s00170-023-12066-w.

55. Giorleo L., Deniz K.I. Polymer Tools Produced by Fused Filament Fabrication for Steel-Bending Process: Effect of Layering Orientation // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2024. Vol. 8, No. 6. Article 243. DOI: 10.3390/jmmp8060243.

56. Nakamura N., Hata Y., Daodon W., Ikeda D. et al. Design of Tool Shape and Evaluation of Deformation Behavior by Digital Image Correlation Method in V-Bending of Sheet Metal Using Plastic Tools Manufactured by 3D Printer // Materials. 2025. Vol. 18, No. 3. Article 608. DOI: 10.3390/ma18030608.

57. Gaudenzi G., Giorleo L., Ceretti E. Performance analysis of composite and steel deep drawing tools combination // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2025. Vol. 136, No. 2. P. 581–600. DOI: 10.1007/s00170-024-14875-z.

58. Giorleo L., Ceretti E. Rapid tooling with polymer tools: dry deep drawing process of aluminum and stainless-steel blanks // Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology. 2025. Vol. 5, No. 4. Article 2025027. DOI: 10.51393/j.jamst.2025027.
59. Сухоруков Д.В., Прусов Е.С., Деев В.Б., Вахидов У.Ш. Повышение износостойкости модельной оснастки из полимерных композиционных материалов // Ползуновский вестник. 2025. № 1. С. 262–266. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.035.
60. Как развивается в России рынок аддитивных технологий // СберПро. 2025. 2 апреля.
61. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 14.07.2021 № 1913-р (ред. от 21.10.2024 № 2963-р) «Об утверждении Стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года».
62. ИННОПРОМ-2025: как аддитивные технологии меняют российскую промышленность // Центр развития базовых отраслей промышленности. 2025. 9 июля.
63. i3D и AM Solid: новый этап в развитии аддитивных технологий в России [Интервью с А. Ембулаевым] // Аддитивные технологии. 2025. 31 октября.
64. Итоги Rosmould, Rosplast и 3D-TECH 2025 // Химическая Техника. 2025. 1 июля.
65. Аддитивные технологии в России и в мире: современное состояние, тренды, перспективы развития и сравнительный анализ // Группа «ДЕЛОВОЙ ПРОФИЛЬ». 2025. 19 августа.
66. От строительства до малых архитектурных форм: применение 3D-принтеров в российской промышленности // Инвест-Форсайт. 2025. 26 ноября.
67. Аддитивные технологии – инструмент промышленного «художника» // Полимерные материалы. 2024. № 6. С. 30–31.
68. Аддитивные технологии перестраивают промышленность // Monocle. 2025. 21 июля.

69. Refaa Z., Boutaous M., Signer D.A. PLA crystallization kinetics and morphology development // *International Polymer Processing*. 2018. Vol. 33. P. 336–344.
70. Clarkson C.M., El Awad Azrak S.M., Schueneman G.T., Snyder J.F., Youngblood J.P. Crystallization kinetics and morphology of small concentrations of cellulose nanofibrils (CNFs) and cellulose nanocrystals (CNCs) melt-compounded into poly(lactic acid) (PLA) with plasticizer // *Polymer*. 2020. Vol. 187. 122101.
71. Valvez S., Silva A.P., Reis P.N.B., Berto F. Annealing effect on mechanical properties of 3D printed composites // *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 37. P. 738–745.
72. Zhao X., Liu J., Li J., Liang X., Zhou W., Peng S. Strategies and techniques for improving heat resistance and mechanical performances of poly(lactic acid) (PLA) biodegradable materials // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022. Vol. 218. P. 115–134.
73. Chikkanna N., Krishnapillai S., Ramachandran V. Static and dynamic flexural behaviour of printed polylactic acid with thermal annealing: parametric optimisation and empirical modelling // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 119. P. 1179–1197.
74. Vaes D., Van Puyvelde P. Semi-crystalline feedstock for filament-based 3D printing of polymers // *Progress in Polymer Science*. 2021. Vol. 118. 101411.
75. Zennaki A., Zair L., Arabeche K., Benkraled L., Maschke U., Berrayah A. Effect of annealing on thermal and dynamic mechanical properties of poly(lactic acid) // *Journal of Applied Polymer Science*. 2022. Vol. 139. P. 1–12.
76. Luna C.B.B., Siqueira D.D., Araujo E.M., Wellen R.M.R. Annealing efficacy on PLA: insights on mechanical, thermomechanical and crystallinity characters // *Matéria (Rio de Janeiro)*. 2021. Vol. 26. e13045.
77. Reis I.A., Cunha Claro P.I., Marcomini A.L., Capparelli Mattoso L.H., da Silva S.P., de Sena Neto A.R. Annealing and crystallization kinetics of poly(lactic acid) pieces obtained by additive manufacturing // *Polymer Engineering and Science*. 2021. Vol. 61. P. 2097–2104.

78. Stojkovic J.R., Turudija R., Vitkovic N., Sanfilippo F., Pacurar A., Plesa A., Ianoji-Andreeva-Dimitrova A., Pacurar R. An experimental study on the impact of layer height and annealing parameters on the tensile strength and dimensional accuracy of FDM 3D printed parts // *Materials*. 2023. Vol. 16. 4574.
79. Valvez S., Reis P.N.B., Ferreira J.A.M. Effect of annealing treatment on mechanical properties of 3D-Printed composites // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 23. P. 2101–2115.
80. Tuncel O., Tufekci K., Kahya C. Multi-objective optimization of 3D printing process parameters using gray-based Taguchi for composite PLA parts // *Polymer Composites*. 2024. Vol. 45. P. 12870–12884.
81. Tuncel O., Kahya C., Tufekci K. Optimization of flexural performance of PETG samples produced by fused filament fabrication with response surface method // *Polymers*. 2024. Vol. 16. 2020.
82. Kechagias J., Zaoutos S. Effects of 3D-printing processing parameters on FFF parts' porosity: outlook and trends // *Materials and Manufacturing Processes*. 2024. Vol. 39. P. 804–814.
83. Kechagias J.D., Zaoutos S.P. An investigation of the effects of ironing parameters on the surface and compression properties of material extrusion components utilizing a hybrid-modeling experimental approach // *Progress in Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 9. P. 1683–1695.
84. Zaoutos S.P., Kechagias J.D. Optimizing bonding conditions between multilayer FFF material extrusion // *Materials and Manufacturing Processes*. 2024. Vol. 39. P. 1–8.
85. Vorkapic M., Mladenovic I., Ivanov T., Kovacevic A., Hasan M.S., Simonovic A., Trajkovic I. Enhancing mechanical properties of 3D printed thermoplastic polymers by annealing in moulds // *Advances in Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 14. P. 1–15.
86. ГОСТ 9941-2022. Трубы бесшовные холоднодеформированные из коррозионностойкой стали. Технические условия. М.: Российский институт стандартизации. 2022.

87. ГОСТ 33693-2015 (ISO 20753). Пластмассы. Образцы для испытаний. М.: Издательство стандартов. 2015.
88. ГОСТ 11262-2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М.: Издательство стандартов. 2017.
89. ГОСТ 4651-2014. Пластмассы. Метод испытания на сжатие. М.: Издательство стандартов. 2014.
90. Петров П.А., Бурлаков И.А., Полшков П.А. и др. Повышение прочности формообразующего инструмента из полилактида PLA методом закалки. // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 1 (2023). стр. 58-65.
91. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1968. 356 с.
92. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем: искусство и наука. М.: Мир. 1978. 302 с.
93. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматлит. 2001. 320 с.
94. Федоренко Р.П. Введение в вычислительную физику: учеб. пособие для вузов. М.: Издательство Московского физ. тех. Института. 1994. 528 с.
95. Бурлаков И.А., Полшков П.А., Петров П.А., Шаболин М.В. Гибка тонкостенных труб с применением инструмента из полилактида. // КШП. Обработка металлов давлением. 1 (2024). С. 27-32.
96. Боев В.Д., Сыпченко Р.П. Компьютерное моделирование. М.: ИНТУ-ИТ.РУ, 2010. 349 с.
97. Дворецкий С.И., Муромцев Ю.Л., Погонин В.А. Моделирование систем. — М.: Изд. центр «Академия». 2009. 320 с.
98. Паничев В.В., Соловьев Н.А. Компьютерное моделирование: учебное пособие. — Оренбург: ГОУ ОГУ. 2008. 130 с.
99. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: учеб. для вузов. — М.: Высш. шк.. 2001. 343 с.
100. Бурлаков И.А., Полшков П.А., Петров П.А., Шаболин М.В. Зависимость геометрической точности труб от технологических параметров гибки

инструментом из полилактида PLA. // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. №3. С. 136-141.

101. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука. 1967. 984 с.

102. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов. М.: Наука. 1986. 512 с.

103. Cao L., Xiao J., Kim J.K., Zhang X. Effect of post-processes treatments on mechanical properties and surface characteristics of 3D printed short glass fiber reinforced PLA/TPU using the FDM process // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2023. Vol. 41. P. 135–143.

104. Чуваев И.А., Габельченко Н.И. Термическая обработка 3D печатных изделий из пластмасс // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 6 (84). С. 70–75.

105. Atakok G., Kam M., Koc H.B. Tensile, three-point bending and impact strength of 3D printed parts using PLA and recycled PLA filaments: a statistical investigation // Journal of Materials Research and Technology. 2022. Vol. 18. P. 1542–1554.

106. Gordelier T.J., Thies P.R., Turner L., Johanning L. Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review // Rapid Prototyping Journal. 2019. Vol. 25. P. 953–971.

107. Yao T., Deng Z., Zhang K., Li S. A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations // Composites Part B: Engineering. 2019. Vol. 163. P. 393–402.

108. Петров П.А., Бурлаков И.А., Полшков П.А. и др. Изучение метода повышения прочности филамента PLA. // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 1 (034) (2024), С. 60-64.

109. Singh S., Singh G., Prakash C., Ramakrishna S., Lamberti L., Pruncu C.I. 3D printed biodegradable composites: an insight into mechanical properties of PLA/chitosan scaffold // Polymer Testing. 2020. Vol. 89. 106722.

110. Zisopol D.G., Tanase M., Portoaci A.I. Innovative strategies for technical-economical optimization of FDM production // Polymers. 2023. Vol. 15. 3787.

111. Wach R.A., Wolszczak P., Adamus-Włodarczyk A. Enhancement of mechanical properties of FDM-PLA parts via thermal annealing // *Macromolecular Materials and Engineering*. 2018. Vol. 303. P. 1–9.
112. Behzdanasab M., Yousefi A.A., Ebrahimbagha D., Nasiri F. Effects of processing conditions on mechanical properties of PLA printed parts // *Rapid Prototyping Journal*. 2020. Vol. 26. P. 381–389.
113. Arjun P., Bidhun V.K., Lenin U.K., Amritha V.P., Pazhamannil R.V., Govindan P. Effects of process parameters and annealing on the tensile strength of 3D printed carbon fiber reinforced polylactic acid // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 62. P. 7379–7384.
114. Ramasamy M., Moorthy E.S., Balasubramanian A., Kumaran P.K.S., Baig M.B.N., Alagappan S., Moorthy M. Effect of process parameters on tensile strength and surface quality of PLA-ABS part produced by fused deposition modeling // *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2021. Vol. 28. P. 300–310.
115. Carvalho W.S., Marzemin F., Belei C., Petersmann S., Arbeiter F., Amancio-Filho S.T. Statistical-based optimization of fused filament fabrication parameters for short-carbon-fiber-reinforced poly-ether-ether-ketone considering multiple loading conditions // *Polymer Testing*. 2023. Vol. 128. 108207.
116. Полшков П.А., Бурлаков И.А. Использование формообразующего инструмента из полилактида для улучшения геометрической стабильности труб топливной системы ГТД. // *Климовские чтения – 2025: перспективные направления развития авиадвигателестроения*. Санкт-Петербург, 2025. С. 272 – 284.
117. Полшков П.А., Бурлаков И.А., Петров П.А., Тарлавина А.А. Силовые и точностные параметры при гибке труб. // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 7 (2024), С. 598-604.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт №0065/09-42 от 14.12.2020

о выпуске промышленной партии деталей 991310020 «труба», изготовленных с применением инструмента, полученного аддитивным методом

«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер производственного
комплекса «Салют» АО «ОДК»

Ю.Р. Нуртдинов

«14» декабря 2020 г.

АКТ 0065/09-42

**о выпуске промышленной партии деталей 991310020 «труба»,
изготовленных с применением инструмента, полученного аддитивным методом**

Комиссия в составе:

А.В. Максимова	- главного технолога ПК «Салют» АО «ОДК»;
А.С. Золотова	- начальника цеха № 26;
Н.В. Галяткиной	- начальника БТК цеха № 26;
В.И. Жихарева	- начальника ТБЦ цеха № 26;
Р.В. Ванашева	- оператора ЧПУ цеха № 26;

составила настоящий акт о том, что опытная партия деталей 991310020 «труба», в количестве 480 ед. выпущена согласно плану цеха.

Гибка вышеупомянутых деталей выполнялась с применением следующего инструмента, изготовленного методом аддитивного выращивания из пластика PLA в лаборатории отдела главного сварщика ПК «Салют»:

- заднего прижима (дет. № 6423-0560),
- переднего прижима (дет. № 6423-0559 измененная),
- ролик (дет. № 6423-0495 доработанный).

Процесс гибки труб был осуществлен в соответствии с технологическими рекомендациями УГТ № 0065/09-1864 от 04.09.2020 года.

Качество поверхности выпущенных деталей соответствуют требованиям чертежа. Геометрические размеры деталей находятся в пределах допуска, установленного чертежом. Претензий к изготовленным деталям цех № 26 не имеет.

Главный технолог
ПК «Салют» АО «ОДК»

А.В. Максимов

Заместитель начальника цеха № 26

А.С. Золотов

Начальник отдела УГТ

Д.А. Матвеев

Главный специалист УГТ

И.А. Бурлаков

Начальник бюро ОГС

П.А. Полшков

Начальник БТК ц. № 26

Н.В. Галяткина

Начальник ТБЦ ц. № 26

В.И. Жихарев

Оператор ЧПУ ц. № 26

Р.В. Ванашев

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**Акт о качестве партии деталей 39.13.87.410 «труба» изготовленных с применением
инструмента, полученного аддитивным методом**

Утверждаю:
Зам. главного инженера
ПК «Салют» АО «ОДК»
С.В. Заикин

« 24 » сентября 2020 г.

АКТ

**о качестве опытной партии деталей 39.13.87.410 «труба»,
изготовленных с применением инструмента, полученного аддитивным
методом**

Комиссия в составе:

А.В. Максимова	- главного технолога ПК «Салют» АО «ОДК»;
А.С. Золотова	- начальника цеха № 26;
Н.В. Галяткиной	- начальника БТК цеха № 26;
С.И. Стрилец	- начальника ТБЦ цеха № 26;
Р.В. Ванашева	- оператора ЧПУ цеха № 26;

составила акт о том, что опытная партия деталей 39.13.87.410 в количестве 30 шт. выпущена согласно плану цеха.

Гибка вышеупомянутых деталей выполнялась в соответствии с технологическими рекомендациями УГТ № 0065/09-1864 от 04.09.2020 года с применением инструмента, изготовленного методом аддитивного выращивания.

Качество поверхности выпущенных деталей соответствуют требованиям чертежа. Геометрические размеры деталей находятся в пределах допуска, установленного чертежом.

Претензий к изготовленным деталям цех № 26 не имеет.

Главный технолог

ПК «Салют» АО «ОДК»

Заместитель начальника цеха № 26

Начальник БТК ц. № 26

Начальник ТБЦ ц. № 26

Оператор ЧПУ ц. № 26

А.В. Максимов

А.С. Золотов

Н.В. Галяткина

С.И. Стрилец

Р.В. Ванашев

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНСТРУКЦИЯ №05.65.013

по гибке труб на трубогибочном станке с ЧПУ фирмы SLFAX модели
SE50L\R

Ф. №65-288

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНСТРУКЦИЯ №05.85.109

Послойное наплавление экструзионным методом FDM на 3D-принтере
Raise3D Pro2 Plus

ПК «Салют» АО «ОДК»

СОГЛАСОВАНО

Главный сварщик

Э.М. Арутюнян

«20» 06 2023 г.

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер

Ю.Р. Нуртдинов

«20» 06 2023 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНСТРУКЦИЯ

Послойное наплавление экструзионным методом FDM на 3D-принтере Raise3D

Pro2 Plus

№ 05.85. 109

Согласовано

Зам. главного сварщика

подпись

20.06.23 А.В. Каверин

дата

Начальник ТБ ОГС

подпись

19.06.23 П.А. Полшков

дата

2023 г.

Изм. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Изм. № дубл.
Подпись и дата	

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ №

По гибке труб на трубогибочном станке с ЧПУ фирмы SILFAX модели SE50L\R
с применением формообразующего инструмента, полученного методом
аддитивной технологии

Настоящие рекомендации распространяются на гибку трубопроводов из стали типа 12X18H10T наружным диаметром от 6 до 36 мм с толщиной стенки 1 мм трубопроводов на автоматизированном станке с ЧПУ фирмы SILFAX модели SE50L\R с применением гибочного шаблона (далее инструмента), изготовленного методом аддитивной технологии из филамента ПЛА диаметром 1,75 мм.

К работе допускается только оператор, знакомый с особенностями монтажа инструмента. Он должен иметь необходимые средства защиты в соответствии с существующими правилами: спецодежду, рабочую обувь, очки и перчатки.

Процесс гибки осуществляется в обычно режиме:

1. Станок должен быть чистым и работоспособным. Перед запуском оператор должен убедиться, что **НИКТО** не стоит в запретной зоне и при включении подвижной консоли управления имеется возможность управлять станком и всеми его функциями.

2. Перед началом работы оператор проверяет инструмент (рисунок 1) на соответствие чертежным размерам, осуществляет визуальный контроль на предмет отсутствия видимых дефектов.

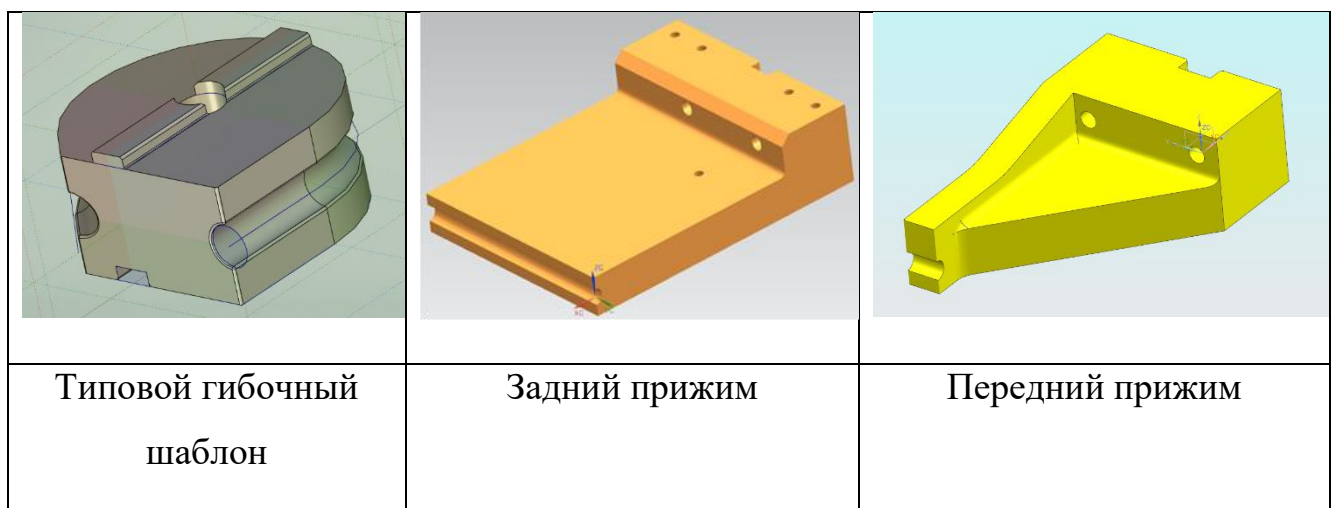


Рисунок 1. Инструмент, изготовленный аддитивным методом

3. Оператор в процессе монтажа устанавливает необходимый зазор между прижимом и инструментом.

4. Оператор монтирует прижим на станке с точностью $\pm 0,15$ мм и надежно фиксирует крепёжными болтами (рисунок 2)

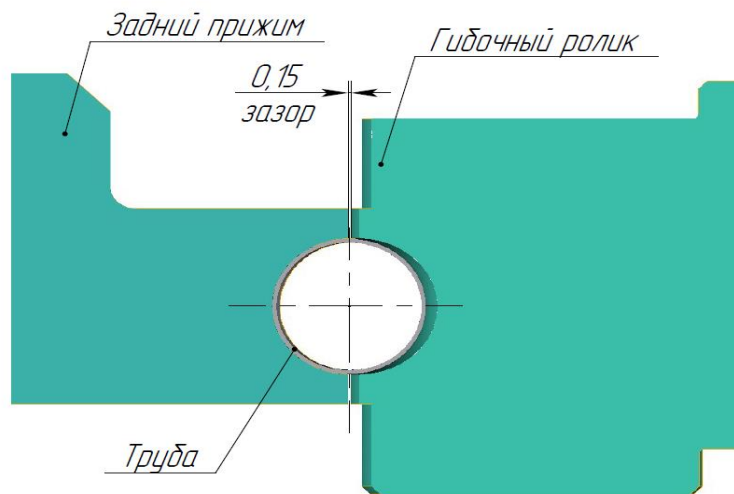


Рисунок 2. Схема наладки прижима

5. При работе необходимо проводить визуальный контроль первых 15...20 трубопроводов на отсутствие дефектов (задиры, царапины, риски) и, в случае их наличия, проверить рабочий инструмент на соответствие требованиям чертежа.

6. В процессе гибки трубопроводов во избежание пластической деформации инструмента из филамента ПЛА необходимо контролировать его температуру с помощью электронного термометра типа пирометра DT-810. Температура формообразующего инструмента не должна превышать 60°C . В случае ее превышения, необходимо сделать перерыв в работе до охлаждения инструмента до температуры $40 - 45^{\circ}\text{C}$.

6. В случае наличия дефектов на трубопроводе инструмент демонтируется и утилизируется.