

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический университет»
(ФГБОУ ВО «РТУ МИРЭА»)

На правах рукописи



Шилейко Андрей Алексеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА
ДЛЯ СВОБОДНОЙ ГИБКИ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА ПУТЕМ ПРИМЕНЕ-
НИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УСЛОВИЯХ ЕДИНИЧНОГО И
МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность: 2.5.6 «Технология машиностроения»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Преображенская Елена Викторовна

Москва – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ СВОБОДНОЙ ГИБКИ.....	10
1.1 Анализ научных работ обеспечения производства инструментом для свободной гибки в условиях единичного и мелкосерийного производства	10
1.2 Анализ экспериментальных работ по гибке на пластиковых матрицах ...	17
1.3 Выбор процесса, технологии и материала для 3D-печати.....	25
1.4 Анализ экспериментальных данных о механических свойствах FDM- образцов.....	29
1.5 Проблема разработки технологических процессов и определения технологических параметров 3D-печати, обеспечивающих требуемые показатели качества инструментов для свободной гибки	34
1.6 Выводы по главе 1	38
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ 3D-ПЕЧАТИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ИЗ ABS- И PLA-ПЛАСТИКОВ.....	41
2.1 Методика и последовательность проведения экспериментальных исследований	41
2.2 Исследования влияния температуры, скорости 3D-печати и степени обдува на механические характеристики образцов	45
2.3 Исследование влияния ориентации образцов на платформе построения на механические характеристики при сжатии	60
2.4 Выводы по Главе 2	68

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ГИБКИ ЛИСТОВОЙ СТАЛИ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ МАТЕРИАЛА	69
3.1 Исследование напряженного состояния матрицы в процессе свободной гибки с применением численного моделирования	69
3.2 Исследование влияния геометрической формы матрицы с применением численного моделирования на напряжения растяжения и сжатия	74
3.3 Экспериментальное исследование влияния ориентации матрицы на платформе построения при 3D-печати на её прочность	78
3.4 Экспериментальное исследование влияния плотности внутреннего заполнения на прочностные характеристики инструмента для свободной гибки	84
3.5 Выводы по Главе 3	92
ГЛАВА 4. АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ	94
4.1 Инженерная методика: проектирование матрицы по заданной силе гибки	94
4.2 Аprobация результатов в условиях производства.....	99
4.3 Расчет экономической эффективности применения 3D-печати для изготовления матриц.....	102
4.4 Выводы по Главе 4	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	109
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	111
ПРИЛОЖЕНИЕ А	125
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ В	134

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Частое обновление продуктовых линеек изделий для удовлетворения спроса потребителей из различных отраслей машиностроения, требует от предприятий быстрой реакции на переоснащение производственных участков. При единичном и мелкосерийном производстве деталей из листовых металлов неотъемлемой частью является участок гибки и наиболее универсальным оборудованием для него является листогибочный пресс. Наличие на предприятии большой номенклатуры инструмента для листогибочного пресса для свободной гибки листовых металлов имеет решающее значения в сокращении времени выпуска нового продукта и широкие возможности для инженеров при проектировании новых деталей.

Развитие современных технологий аддитивного производства позволяет изготавливать инструменты для гибки в рамках собственного производства. Аддитивные технологии позволяют создавать уникальные формы инструмента, которые недоступны при изготовлении традиционными технологиями (механической обработки), сокращать время производства и использовать недорогое для этого оборудование. Перечисленные выше факторы позволяют получить конкурентное преимущество в виде сокращения времени вывода нового продукта на рынок или экономии денежных средств при проектировании и изготовлении инструмента.

С каждым годом технологии аддитивного производства развиваются, появляется новое оборудование, программное обеспечение (ПО), материалы, технологии, все это ведет к удешевлению использования аддитивных технологий, появлению новых возможностей изготовления сложных деталей для предприятий и более глубокую интеграцию в технологические процессы предприятий.

Проблема изготовления пластикового инструмента методом FDM заключается в более низких механических свойствах пластиков по сравнению с металлами и наличием анизотропных свойств инструмента после изготовления.

В связи с этим, работа, направленная на повышение эффективности изготовления пластикового инструмента технологией FDM, имеет важное научное и прак-

тическое значение на основе проведения экспериментальных исследований и разработки инженерной методики, сокращающей время изготовления, расхода материала и получение стабильных значений механических свойств матрицы.

Степень разработанности. Вклад в разработку вопросов теории и практического применения пластиковых инструментов для операций гибки, изготовленных по технологии FDM 3D-печати внесли такие исследователи, как Евсюков С.А., Сережкин М.А., Плохих А.И., Петров П. А., Бурлаков И. А., Лавриненко В.Ю., Naotaka Nakamura, Yohei Abe, Zaragoza V. G., Strano M., Monno M., Giorleo L., Mandic V.

Несмотря на имеющиеся исследования, которые посвящены изучению использования пластиковых инструментов для гибки и штамповки, в настоящее время отсутствует методика назначения технологических параметров при изготовлении инструментов для свободной гибки листовых металлов по технологии FDM 3D-печати, а также практических рекомендаций для повышения эффективности использования инструмента.

Цель исследования: повышение эффективности изготовления инструмента для свободной гибки посредством сокращения времени изготовления и расхода материала на основе разработки и внедрения технологического процесса 3D-печати по технологии FDM.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Исследование влияние технологических параметров 3D-печати на прочностные характеристики инструмента.
2. Моделирование и экспериментальное обоснование назначения технологических параметров 3D-печати, обеспечивающих стабильность прочностных характеристик инструмента.
3. Определение технологических параметров 3D-печати, обеспечивающих минимальное время изготовления инструмента и сохраняющих требуемые прочностные характеристики.

4. Разработка инженерной методики выбора технологических параметров, обеспечивающих необходимые прочностные характеристики инструмента в процессе гибки деталей.

Объект диссертационного исследования: технологический процесс изготовления инструмента (матрицы) для свободной гибки с применением 3D-печати по технологии FDM.

Предмет диссертационного исследования: взаимосвязь показателей работоспособности инструмента (матрицы) для свободной гибки с технологическими параметрами FDM 3D-печати.

Научная новизна диссертационного исследования:

1. Раскрыты взаимосвязи основных физико-механических свойств инструмента с технологическими параметрами 3D-печати по технологии FDM.

2. Установлены экспериментальные зависимости допустимой силы свободной гибки от ориентации инструмента на платформе построения 3D-принтера в процессе изготовления по технологии FDM.

3. Установлена зависимость плотности внутреннего заполнения инструмента, изготовленного по технологии FDM, от допустимой силы свободной гибки.

Теоретическая значимость исследования обоснована, тем что предложены зависимости механических характеристик материала полученных образцов от технологических параметров 3D-печати по технологии FDM, а также раскрыто влияние плотности заполнения и ориентации инструмента на платформе построения 3D-принтера на допустимую силу свободной гибки.

Практическая значимость результатов исследования заключается в: разработанной инженерной методике выбора технологических параметров, обеспечивающих необходимые прочностные характеристики инструмента в процессе гибки деталей, и разработанных рекомендациях по проектированию и использованию матриц в производственных условиях.

Методы диссертационного исследования. Методологическая основа исследования базируется на основных положениях технологии машиностроения при

проектировании технологических процессов FDM-печати. При решении теоретических задач использованы методы моделирования, математической статистики и регрессионного анализа. Для 3D моделирования и подготовки управляющих программ 3D-печати для изготовления образцов и инструмента (матриц) использовались программы Компас-3D, Prusa Slicer, OrcaSlicer. Численное моделирование методом конечных элементов выполнялось в программе QForm. Экспериментальные исследования проводились на листогибочном прессе с ЧПУ Durma AD-R 30135. Для расчета, обработки и интерпретации полученных данных использовался Microsoft Excel.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Функциональные взаимосвязи технологических параметров FDM 3D-печати при проектировании и изготовлении инструмента с учетом свойств материала.
2. Инженерная методика выбора технологических параметров 3D-печати по технологии FDM, обеспечивающих необходимые прочностные характеристики инструмента в процессе гибки деталей.
3. Результаты экспериментальных исследований и рекомендации по проектированию матрицы и использованию в производственных условиях.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью постановки задач при построении математических моделей и обоснованностью принятых допущений. Адекватность полученных результатов подтверждена расчетами, а также результатами внедрения на предприятии машиностроения и учебный процесс.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа представляет собой научное обоснование совершенствования технологического процесса изготовления инструмента с использованием технологии FDM 3D-печати, для снижения себестоимости и срока изготовления за счет использования технологических параметров 3D-печати. По теме и содержанию материалов диссертационная работа соответствует научной специальности 2.5.6 – «Технология машиностроения» в части п. 4 «Совершенствование существующих и разра-

ботка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска».

Апробация результатов работы:

Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на всероссийских и международных научно-технических конференциях:

1. Российская научная-техническая конференция с международным участием «Инновационные технологии в электронике и приборостроении», г. Москва, РТУ МИРЭА, 2021 г.;
2. Международный специализированный проект и конференция по аддитивным технологиям в промышленности Additive Minded 2022 в рамках выставки «ИНТЕРПЛАСТИКА 2022», г. Москва, 2022 г.;
3. Международный форум по АТ и 3D-решениям INDUSTRY3D в рамках выставки «Металлообработка-2022», г. Москва, 2022 г.;
4. VII-я научно-техническая конференция студентов и аспирантов РТУ МИРЭА», 2022 г.;
5. Международная научно-техническая конференция «Оптические технологии, материалы и системы» («Оптотех - 2022»), г. Москва, РТУ МИРЭА, 2022 г.;
6. Специализированная выставка аддитивных технологий и 3D-печати в промышленности «Additive Minded 2023» в рамках выставки «RUPLASTICA 2023», г. Москва, 2023 г.;
7. II Международная научно-практическая конференция «Актуальные исследования и инновации в науке и технике», 2023 г.;
8. Форум аддитивных технологий и 3D-решений INDUSTRY3D, г. Москва, 2023 г.;
9. Международная научно-техническая конференция «Оптические технологии, материалы и системы» («Оптотех - 2023»), г. Москва, РТУ МИРЭА, 2023 г.;
10. Международный специализированный проект и конференция по аддитивным технологиям в промышленности «Additive Minded 2024» в рамках выставки «RUPLASTICA 2024», г. Москва, 2024 г.;

11. Международная научно-техническая конференция «Перспективные материалы и технологии» («ПМТ-2024»), г. Москва, РТУ МИРЭА, 2024 г.;
12. Международная научно-техническая конференция «Оптические технологии, материалы и системы» («Оптотех - 2024»), г. Москва, РТУ МИРЭА, 2024 г.;
13. Специализированная выставка аддитивных технологий и 3D-печати в промышленности «Additive Minded 2025» в рамках выставки «RUPLASTICA 2025», г. Москва, 2025 г.;
14. Национальная научно-техническая конференция с международным участием «Перспективные материалы и технологии» («ПМТ-2025»), г. Москва, РТУ МИРЭА, 2025 г.;
15. Национальная научно-техническая конференция с международным участием «Перспективные материалы и технологии» («ПМТ - 2026»), г. Москва, РТУ МИРЭА, 2026 г.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 10 научных работах, из них 4 в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ, общим объемом 4,72 п.л.

Структура и объем работ. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 122 наименований. Работа содержит 124 страницы машинописного текста, включая 72 иллюстрации и 31 таблицу, 3 приложения на 10 страницах.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ СВОБОДНОЙ ГИБКИ

1.1 Анализ научных работ обеспечения производства инструментом для свободной гибки в условиях единичного и мелкосерийного производства

Свободная гибка на листогибочных прессах является неотъемлемой частью производств, занимающихся выпуском единичных и мелкосерийных деталей из листового металла с большим количеством номенклатур гнутых деталей. Такой вид обработки металла давлением довольно универсален и позволяет выпускать детали разной серийности, сложности, при этом имеет возможность быстрой переналадки. Это связано с ускорением выпуска на рынок новой продукции, ее частым обновлением и снижением производимых партий. Схема свободной гибки и гибки с калибровкой представлена на рисунке 1.1 [10].

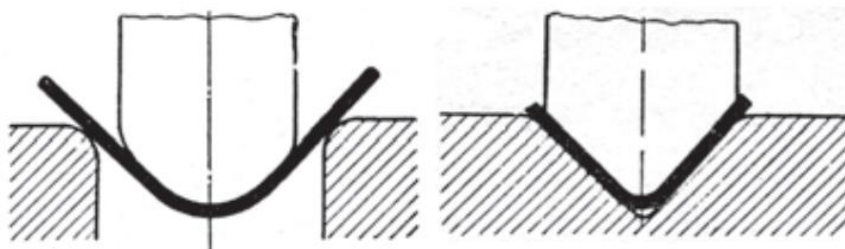


Рисунок 1.1 – Схемы гибки: слева – свободная гибка,
справа – угловая (с калибровкой)

Как отмечено в справочнике Григорьева Л.Л. и др. [10], до 70% операций гибки в мелкосерийном производстве выполняется по схеме свободной гибки, что обусловлено высокой универсальностью оборудования и возможностью быстрой переналадки. Большая номенклатура инструмента позволяет изготавливать большее количество разнообразных изделий, а правильная комбинация инструментов расширяет возможности оборудования еще больше.

К инструменту для свободной гибки предъявляется комплекс требований по показателям качества и эксплуатационным характеристикам [10, 17, 18, 19, 33, 54].

Показатели качества:

1. Качество поверхности рабочих частей инструментов (шероховатость). Если рабочие кромки металлических инструментов повреждены или имеют высокую шероховатость, то эти повреждения копируются на поверхности изготавливаемой детали, особенно на мягких материалах, таких как алюминий [10, 33].
2. Твердость рабочих поверхностей. Для достижения требуемой твердости и, как следствие, износостойкости инструмент подвергают поверхностной термической обработке [18, 19].
3. Точность изготовления инструмента. Инструменты выпускаются сегментами от 10 до 835 мм и при их состыковке не допускаются отклонения по высоте более 0,02 мм на 1000 мм [17, 19].
4. Материал инструмента. Зависит от серийности выпуска продукции и требуемой стойкости (например, стали 42CrMo4, C45, X153CrMoV12) [18, 54].

Эксплуатационные характеристики:

1. Внутренний радиус гибки детали. Формируется шириной раскрытия матрицы V_m и радиусом пуансона, для процессов свободной гибки приближенно равен $0,16 V_m$ [10];
2. Угол гибки детали. Для выдерживания требуемого угла гибки конечной детали требуется использовать матрицу с углом V -образного выреза α больше требуемого (обычно на $3...7^\circ$) из-за упругого деформирования металла [33].
3. Ширина и длина матрицы. В зависимости от геометрии конечного изделия выбирается ширина и длина матрицы. Например, при гибке Z-образных деталей при узком Z-перегибе требуется матрица с малой шириной раскрытия, а для детали, у которой есть «уши», требуется матрица ограниченной длины, чтобы избежать их врезания в кромки в процессе изготовления [19].
4. Радиус рабочих кромок матрицы R_2 . Увеличенный радиус снижает концентрацию напряжений в инструменте и предотвращает появление следов (вмятин, царапин) на детали. При отсутствии такой возможности применяют защитную полиуретановую пленку [10,54].

В большинстве случаев для свободной гибки используется серийно выпускаемый инструмент из стандартной номенклатуры, которую можно найти на рынке. для серийного изготовления инструмента используется следующий типовой технологический процесс [10, 33]:

- механическая обработка заготовок;
- термическая обработка (закалка);
- шлифование и доводка рабочих поверхностей;
- резка инструмента на секции заданной длины.

Изготовление инструмента характеризуется высокой трудоемкостью и требует применения специализированного оборудования, квалифицированного персонала и производственных площадей. По этой причине стандартный инструмент экономически оправдан только для среднесерийного, крупносерийного и массового производств, поскольку его стоимость окупается при выпуске значительного количества деталей.

Проведенный анализ рынка стандартного инструмента показал, что основные компании-производители сосредоточены в следующих странах: Италия (Rolleri SPA, Tecnostamp, Toolspres, EURAM, Eurostamp Tooling, Ferrari Costruzioni Meccaniche, EmilsTamp), США (Wilson Tool, Mate), Нидерланды (WILA), Япония (Amada), Германия (UKB), Швейцария (Bystronic), Бельгия (LVD), Китай (Ketec Precision Tooling) [17, 18, 19, 48, 53, 54, 62, 74, 80, 82, 108, 111, 117, 118]. Инструмент выпускается зарубежными компаниями, а на территории РФ имеются только склады и хранится только самый используемый инструмент. Из-за этого возникает сложность и длительность поставки необходимого инструмента при отсутствии его на складе.

Анализ каталогов стандартных инструментов от разных производителей показывает, что инструменты изготавливаются из определенных марок стали и могут отличаться твердостью рабочей части от 54 до 62 HRC, но при этом имеют схожую геометрию рабочих частей матриц [17, 18, 19, 54]. На рисунке 1.2. показаны основные геометрические характеристики матриц:

V_m – ширина раскрытия матрицы, мм выбирается в зависимости от толщины;

α – угол раскрытия матрицы, град.;

B – ширина матрицы, мм;

R_1 – радиус основания V-образного выреза, мм;

R_2 – радиус рабочей кромки, мм.

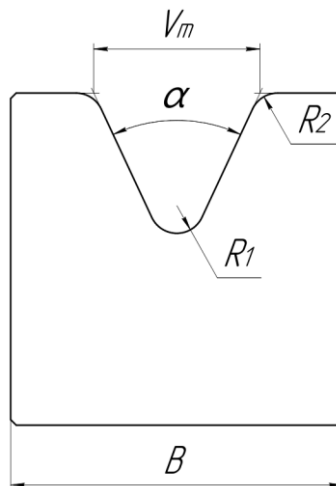


Рисунок 1.2 – Геометрические характеристики матриц для свободной гибки

К преимуществам использования стандартных инструментов для свободной гибки можно отнести низкую стоимость из-за большой серийности выпуска, большую номенклатуру инструментов, высокие эксплуатационных характеристики и показатели качества инструмента.

К недостаткам можно отнести большой срок поставки (особенно при отсутствии инструмента на складе) ограничение геометрии инструмента рамками стандартной номенклатуры и фиксированные длины инструментов.

В условиях единичного и мелкосерийного производства, характеризующихся частыми изменениями конструкции изготавливаемых изделий и, как следствие, потребностью в широкой номенклатуре инструментов, сроки поставки приобретают критическое значение. При отсутствии подходящего инструмента у поставщиков предприятия вынуждены ожидать поставки со складов производителя, заказывать изготовление по индивидуальным проектам (в том числе за рубежом) либо прибегать к самостоятельному производству инструмента.

По данным выполненных автором запросов коммерческих предложений срок поставки стандартных инструментов для гибки при наличии на локальном складе

составляет до 14 календарных дней, при заказе изготовления стальных матриц по индивидуальным проектам у российских производителей – до 45 дней, при необходимости доставки из-за рубежа – 84–140 календарных дней. Аналогичные сведения содержатся в каталогах компаний *Rolleri* [18], *Ferrari Costruzioni Meccaniche* [62] и *ToolsPress* [108].

При изготовлении инструмента под заказ или на собственном предприятии возможны следующие конструктивные исполнения:

- цельная стальная матрица, изготавливаемая методами механической обработки или 3D-печати металлами;
- стальная матрица, состоящая из сегментов;
- цельная пластиковая матрица, изготавливаемая методом 3D-печати.

Изготовление цельной стальной матрицы методами механической обработки требует наличия парка дорогостоящего металлорежущего оборудования (фрезерных и других станков). При этом инструмент, не подвергнутый закалке рабочих поверхностей, уступает по эксплуатационным характеристикам серийно выпускаемому, а его стоимость остается высокой [10, 31, 34]. Изготовление инструмента методом 3D-печати металлами [47, 49, 70, 78] требует привлечения узкопрофильных специалистов и дорогостоящего оборудования, после печати необходима постобработка (механическая и термическая). Преимущества данной технологии – меньший расход материала и отсутствие геометрических ограничений, характерных для фрезерной обработки. Применение 3D-печати металлами целесообразно при высоких нагрузках на инструмент, крупных партиях деталей и сложной геометрической форме инструмента.

Как отмечают *Backes F.* и др. [51], изготовление сегментированного инструмента характеризуется замкнутым производственным циклом и позволяет оперативно решать задачи гибки нестандартных изделий. К преимуществам подобных штампов относятся высокая скорость изготовления, низкая стоимость и возможность получения уникальных геометрических форм.

Недостатками являются низкая точность сборки пластин, пониженные эксплуатационные свойства, появление на деталях поверхностных дефектов (сколов,

царапин) при недостаточной обработке рабочих поверхностей, а также невозможность изготовления качественного длинного инструмента [46, 87, 93, 115].

Изготовление цельного пластикового инструмента (рисунок 1.3) требует лишь наличия 3D-принтера и, при необходимости, слесарного участка (для доводки поверхностей или нарезания резьбы). Данный способ является наиболее доступным из перечисленных. Эксперименты с пластиковыми штампами проводились для различных типов операций: гибка [24, 38, 53, 84, 86, 87, 103, 113, 121, 122], вытяжка [21, 34, 63, 64, 65, 85, 86, 99], комбинированная вытяжка [50, 61, 107], обжим [73], рельефная формовка [22, 60]. Помимо инструментов изготавливаемых для операций формоизменения, были эксперименты и изготовлением пластиковых вырубных штампов [9, 105, 106] и гибкой труб [29]. Использование пластикового инструмента для таких целей может говорить о том, что весь потенциал еще не раскрыт и требует более глубокого изучения, особенно для таких операций как глубокая вытяжка и пробивка, которые создают более нагруженное состояние в процессе деформации металла.



Рисунок 1.3 – Пластиковая матрица

К преимуществам пластиковых штампов можно отнести низкую стоимость, высокую скорость изготовления, отсутствие, следов после контакта с инструментами, возможность изготовления уникальных геометрических форм.

К недостаткам можно отнести низкую прочность и твердость, наличие анизотропных свойств конечных деталей, низкую износостойкость.

Вышеописанные варианты технологических процессов изготовления инструментов для свободной гибки приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Технологические процессы изготовления инструментов для свободной гибки

Типовой технологический процесс	Технологические процессы для единичного изготовления			
	Цельные стальные инструменты		Стальной инструмент из сегментов	Цельный пластиковый инструмент
Механическая обработка заготовок	Механическая обработка	3D-печать металлом	Раскрой листового металла	3D-печать пластиком
Термическая обработка (закалка)		Термическая обработка (отжиг)	Соединение заготовок (разъемное, неразъемное)	
Шлифование и доводка рабочих поверхностей		Удаление поддержек	Слесарная обработка рабочих поверхностей	
Резка инструмента на секции заданной длины		Шлифование и доводка рабочих поверхностей		

Из всех рассмотренных технологических процессов изготовления инструмента для свободной гибки для случаев мелкосерийного и единичного производства наиболее универсальным, доступным и не имеющим ограничений по геометрии можно назвать 3D-печать пластиковых матриц. Также обзор литературы показал, что изготовление инструмента с помощью 3D-печати возможно для различных методов штамповки несмотря на то, что такая технология имеет определенные недостатки по сравнению с традиционным способом изготовления.

Поскольку существует множество разновидностей 3D-печати, требуется обоснованный выбор наиболее подходящего способа.

1.2 Анализ экспериментальных работ по гибке на пластиковых матрицах

В работах Лавриненко В.Ю., Сережкина М.А. [24, 34] представлены результаты экспериментальных исследований процесса гибки листовых заготовок с использованием FDM-штампов из PLA. Установлена возможность применения FDM-штампов для обеспечения точности деталей в условиях мелкосерийного производства. В статье Типалина С.А. и др. [38] исследована возможность гибки листового металла с применением металлического пуансона и полимерной матрицы, напечатанной на 3D-принтере; показана возможность обработки стали толщиной до 3 мм. В работе Теньшова Д.В. и др. [37] разработана и исследована V-образная матрица с пуансоном из инженерного пластика PA12, полученная по FDM-технологии, что позволило снизить массу и стоимость оснастки.

Лопатов М. Г. и Тимофеева О. С. [27] рассматривают более широкий контекст – применение аддитивных технологий в технологической подготовке листового штамповочного производства. Авторы анализируют преимущества и недостатки внедрения 3D-печати для изготовления штамповой оснастки, акцентируя внимание на повышении гибкости и скорости переналадки оборудования. В контексте гибки на пластиковых матрицах работа [27] представляет интерес тем, что формулирует общие требования к оснастке, изготавливаемой аддитивными методами, и обосновывает целесообразность ее использования в единичном и мелкосерийном производстве.

Значительный вклад в исследования применимости полимерного инструмента для формообразования листовых заготовок внесли работы Куликова А.Д. с соавторами [21, 22, 76]. В исследовании [22] рассмотрена штамповка тонкостенных заготовок с применением инструмента из полилактида PLA, на примере операции вытяжки показана способность пластиковых пуансона и матрицы проводить формообразование деталей без разрушения инструмента, а упругие деформации полимерной оснастки носят обратимый характер и не приводят к критической потере точности.

Дальнейшим развитием этого направления стала работа [21], в которой экспериментально изучено формообразование листовых заготовок из меди М1 с использованием полимерного инструмента из PLA, которое позволило оценить поведение инструмента в условиях значительных пластических деформаций заготовки.

Прямое экспериментальное подтверждение возможности формообразования листовых деталей полимерным инструментом дано в работе [76]. Куликов А. Д. с соавторами исследовали принципиальную возможность изготовления рабочего инструмента для штамповки листовых деталей из пластика методом экструзионной 3D-печати. В работе авторы сформулировали перспективы применения полимерного штамповочного инструмента на основе анализа собственных экспериментальных данных и литературных источников. В работе подчеркнуто, что ключевыми преимуществами PLA-оснастки являются низкая стоимость и скорость изготовления, что особенно важно в условиях единичного и мелкосерийного производства.

При этом авторы указывают на необходимость оптимизации параметров печати (плотность заполнения, количество периметров, ориентация слоев) для достижения максимальной прочности и жесткости инструмента применительно к конкретной формообразующей операции.

В диссертации Дворянкина А.О. [12] разработана методика совершенствования технологии изготовления машиностроительной оснастки с применением 3D-печати, показано сокращение сроков и стоимости подготовки производства. Данная работа близка по тематике к настоящему исследованию, однако в ней не рассматриваются конкретные операции гибки и не выводятся количественные зависимости для силы гибки.

В диссертации Чан Динь Хынга [41] исследована микроштамповка листовых деталей с использованием инструмента, полученного методами 3D-печати; результаты по стойкости микроштампов (до 500 циклов) подтверждают принципиальную применимость аддитивных технологий для операций листовой штамповки.

В исследовании [90] проведена оценка возможности использования крупногабаритной штамповой оснастки, полученной с помощью аддитивных технологий. Авторы анализируют снижение стоимости и сокращение времени изготовления

прототипов тяжелой оснастки по сравнению с традиционными методами. Хотя работа носит преимущественно обзорно-аналитический характер, в ней подчеркивается, что полимерные инструменты, напечатанные по технологии FDM, способны выдерживать нагрузки, характерные для формообразующих операций, в том числе гибки, при условии правильного выбора геометрии и параметров печати.

Исследование [1] посвящено возможностям применения формообразующего инструмента, изготовленного аддитивными методами, для гидроударной штамповки. Несмотря на специфику процесса (импульсное нагружение жидкостью), в работе рассматриваются общие вопросы прочности и долговечности полимерных матриц, полученных 3D-печатью, а также влияние параметров печати на их эксплуатационные характеристики.

В работе Nakamura N. и др. [85] был изготовлен инструмент для гибки с калибровкой, что схематически близко к свободной гибке, однако отличается большим числом ограничений (по углу гибки) и требует более высокой силы сжатия. Перед изготовлением инструмента авторы провели испытания на сжатие материала PLA, использованного для печати; методика испытаний в работе не приведена. Нагрузка на инструмент (рисунок 1.4) действовала перпендикулярно направлению укладки слоев.

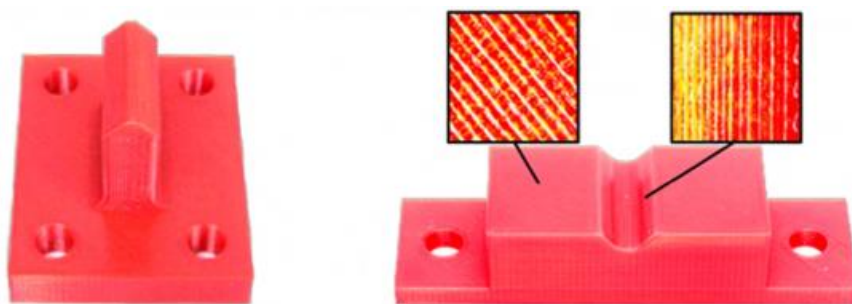


Рисунок 1.4 – Изготовленный инструмент для гибки

Выполнялась гибка алюминиевых листов марок А1100-Н14, А5052-Н32 и высокопрочного стального листа (440 МПа) толщиной 1 мм и шириной 30 и 60 мм.

В ходе исследования установлено, что пластиковый инструмент, в сравнении со стальным, обеспечивает иные углы гибки вследствие пружинения (рисунок 1.5), следов от инструмента на деталях не остается.

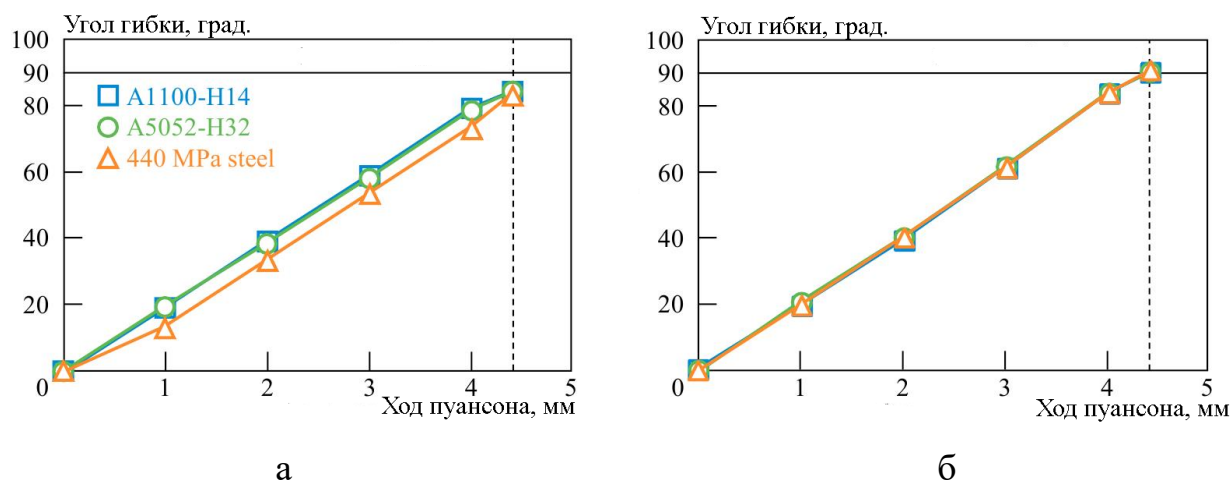


Рисунок 1.5 – Изменения угла гибки в зависимости от хода пуансона для пластиковых (а) и стальных (б) инструментов [85]

Кривые силы гибки в зависимости от хода пуансона для пластиковых и стальных матриц показаны на рисунке 1.6.

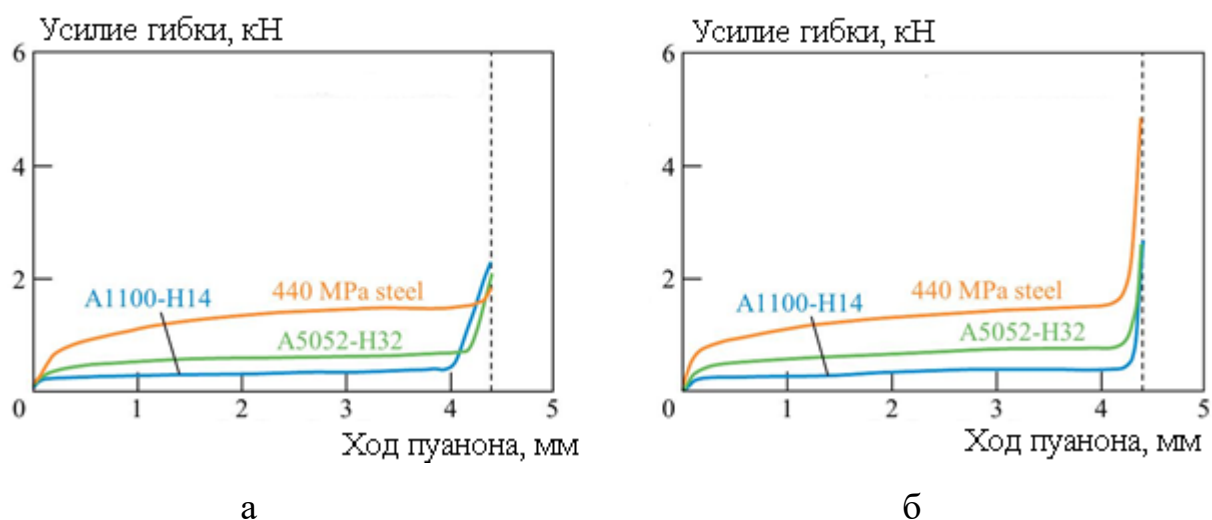


Рисунок 1.6 – Изменения силы гибки в зависимости от хода пуансона для пластиковых (а) и стальных (б) инструментов [85]

Авторы отмечают, что сила гибки для стальных инструментов резко возрастает около нижней мертвой точки, а для пластиковых инструментов ее увеличение сравнительно невелико из-за наличия упругой деформации (рисунок 1.6). Следует отметить, что представленные в работе механические свойства материала значительно ниже паспортных данных производителя пластика, что указывает на недостаточную полноту испытаний. Авторами выполнено более 100 циклов гибки,

на основании чего сделан вывод о работоспособности данной технологии для мелкосерийного производства. В продолжение этих исследований в работе [86] Nakamura N. и др. изучили деформации инструмента, изготовленного из PLA, с использованием метода корреляции цифровых изображений (DIC).

Применялись два комплекта пуансонов и матриц с различной геометрией поперечного сечения. Выполнялась гибка алюминия A1100-H и стали с пределом прочности 440, 590 и 980 МПа. В статье приведена формула для расчета прочности инструмента, основанная на пределе прочности материала при сжатии и прикладываемой нагрузке. Исходя из требуемой максимальной силы гибки Pe , выраженной через параметры обрабатываемой заготовки – листа (b – ширина заготовки, t – толщины листа, σ_B – предел прочности листа, σ_p – среднее давление пуансона), устанавливалась требуемое значение ширины раскрытия матрицы:

$$W = \sqrt{\frac{1,33\sigma_B t^2}{\sigma_p}}. \quad (1.1)$$

Также авторы продемонстрировали зоны концентрации напряжений: для пуансона – вершина рабочей части, для матрицы – точки контакта с металлом (две точки) и центральная область V-образного выреза (рисунок 1.11). Превышение допустимой нагрузки по прочности материала приводит к разрушению инструмента.

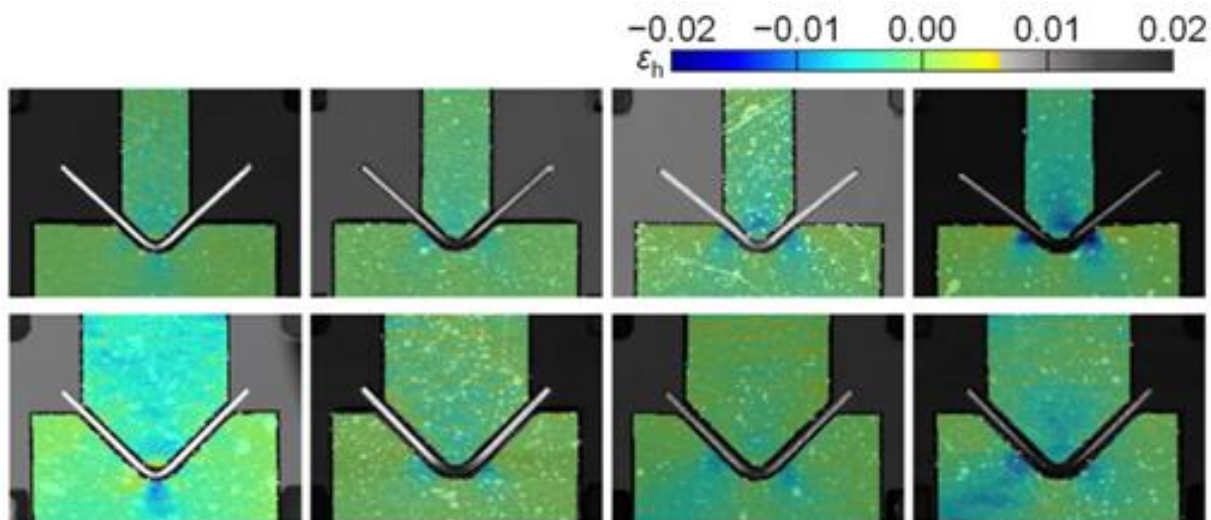


Рисунок 1.11 – Распределение деформаций пуансона и матрицы из PLA в направлении высоты при гибке для различных материалов [86]

Авторы Zaragoza V.G. и др. [122] провели сравнительное исследование различных типов вставок: стандартный стальной инструмент, полиуретан (механическая обработка), нейлон (литье под давлением), поликарбонат (3D-печать), резина (готовое изделие, технология не уточняется). Все матрицы устанавливались в металлический каркас (рисунок 1.12) и имели ручей шириной 6 мм. Выполнялась гибка материалов Al1050, Fe37 и A1008 CR толщиной 0,7; 0,8; 1; 1,5 и 2 мм. Установлено, что при использовании 3D-печатного инструмента происходит изменение угла гибки конечной детали во времени. К преимуществам отнесены отсутствие следов гибки на изделиях, пригодность для мелкосерийного производства и значительно более низкая стоимость по сравнению с металлическим инструментом. Недостатком является отсутствие в работе информации о методике испытаний механических свойств для 3D-печатных образцов, а также данных об ориентации печати и величинах приложенной нагрузки.

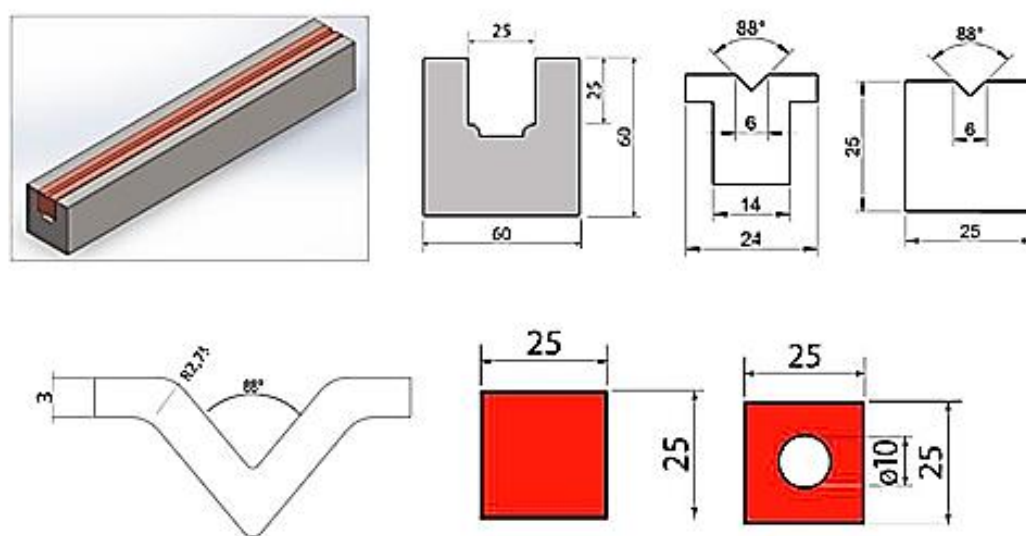


Рисунок 1.12 – Концепция быстродействующего штампа для свободной гибки [122]

Авторы показали, что при использовании 3D-печатного инструмента со временем происходит изменение угла гибки конечной детали. Было отмечено, что при использовании пластикового инструмента не остаются следы гибки на изделиях, можно использовать в мелкосерийном производстве и стоимость пластикового инструмента значительно ниже металлического.

Из недостатков работы можно выделить, что даны механические свойства

материалов, но для 3D-печатных отсутствует информация по технологии испытаний. Нет примера того, в каком положении производилась печать инструмента и не показана нагрузка, которая была приложена к инструменту.

Zaragoza V.G. и др. [121] продолжили исследование, ограничившись матрицами, изготовленными методом 3D-печати из материалов PLA и PC. Матрицы, как и в предыдущей работе, использовались в качестве вставок. Выполнялась гибка стали C45 и AISI 430 толщиной 1,5 мм; проведено 70 циклов для каждого материала. Нагрузка составила 12 кН/м для стали C45 и 20 кН/м для AISI 430. Авторы утверждают, что в напечатанном инструменте присутствует остаточная пористость, влияющая на угол гибки; однако под постоянной нагрузкой пористость уменьшается, и гибка становится более стабильной. Проведенное численное моделирование показало, что наибольшие нагрузки испытывают контактные поверхности матрицы (рисунок 1.13).

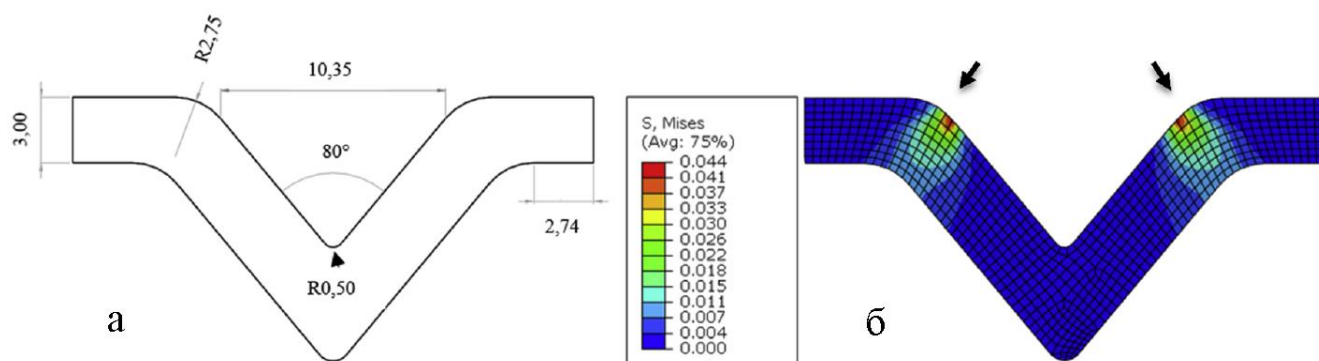


Рисунок 1.13 – Геометрия штампа для поликарбонатной вставки (а) и концентрация напряжений на поверхности (МПа) в конце хода пуансона (б) [121]

В этой же работе было рассмотрено использование инструментов для гибки из PLA, исследовано влияние паттерна заполнения: наиболее приемлемым признан паттерн с углами $-45/+45$, тогда как паттерн $0/90$ дает нестабильную плотность заполнения. К недостаткам работы следует отнести то, что испытания на сжатие проводились по методике, предназначенной для изотропных материалов, а полученные значения механических свойств оказались выше паспортных.

Компания Stratasys [104] выпускала рекомендации по созданию инструмента для гибки и используемому материалу. В работе показаны примеры использования

инструмента, но отсутствуют практические рекомендации по проектированию. Также в работе предлагается использовать материалы, которые сложны в работе, но при этом склонны выдерживать большие нагрузки.

Авторы Mandic V. и др. [81] изготовили инструмент для гибки с калибровкой из ABS. Подтверждена принципиальная возможность изготовления и использования такого инструмента; основное внимание уделено углам пружинения листа при работе с пластиковым инструментом.

Авторы Nakamura N., Mori K., Abe Y. [87] на основе результатов предшествующих исследований пришли к выводу, что гибка листа на пластиковом инструменте не обеспечивает такого же качества по углу гибки, как гибка на стальном. В работе проверена возможность усиления пластиковых матрицы и пуансона стальными вставками в наиболее нагруженных зонах (точках контакта). Такие комбинированные инструменты показали более высокую эффективность, однако для их производства требуются дополнительные технологические процессы.

Авторы Giorleo L., Deniz K.I. [67] исследовали возможность изготовления пластикового инструмента с учетом топологической оптимизации конструкции. Такой подход позволяет существенно экономить материал и сокращать время изготовления, но требует сложной проработки со стороны инженера. Топологическая оптимизация эффективна для изделий, которые в дальнейшем будут производиться серийно; для изготовления разового инструмента данный подход нерентабелен.

В большинстве работ, посвященных использованию пластикового инструмента, исследовались пружинение металла при гибке и гибка тонколистовых металлов. В качестве материалов инструментов преимущественно применялись ABS и PLA. Многие исследования относятся не к свободной гибке, а к гибке с калибровкой, при которой напряжения в матрице выше, а угол гибки фиксирован. В работах отсутствуют методики подбора технологических параметров 3D-печати при изготовлении такого инструмента, а также рекомендации по его проектированию.

Многие авторы [24, 32, 37, 38, 76, 81, 86, 87, 90, 121, 122] выделяют следующие преимущества пластикового инструмента для гибки по сравнению со стальным:

- низкая стоимость;
- высокая скорость производства;
- использование в мелкосерийном и единичном производстве.

К недостаткам отнесены:

- наличие анизотропии;
- низкие показатели механических характеристик;
- низкая износостойкость.

1.3 Выбор процесса, технологии и материала для 3D-печати

ГОСТ 57589-2017 выделяет 7 основных категорий технологических процессов аддитивных технологий:

- 1) фотополимеризация в ванне (SLA, DLP, LCD, mSLA);
- 2) струйное нанесение материала (MJP);
- 3) струйное нанесение связующего (BJ и MBJ);
- 4) синтез на подложке (PBF/SLS, L-PBF/SLM, E-PBF/EBM);
- 5) экструзия материала (FDM, FGF, CFRTP/CFC/CF3D, RDM, 3DCP);
- 6) прямой подвод энергии и материала (L-DED (P)/LMD, и DED (W)/WAAM/LWAM/EBF3).

7) листовая ламинация (SL). К процессу относятся следующие технологии: LOM, SDL, UAM, PSL, SLCOM.

Исходя из многообразия аддитивных процессов [70], сформулированы критерии выбора процесса и технологии 3D-печати:

- простота реализации процесса;
- низкая стоимость и доступность оборудования и расходных материалов;
- минимальный объем постобработки.

На основании анализа особенностей различных технологий 3D-печати, приведенных в литературе [23, 66], исключены следующие процессы аддитивного производства:

1. Фотополимеризация в ванне. После получения деталей требуется постобработка (снятие поддержек, обработка спиртом, досвечивание ультрафиолетом), необходимо отдельное помещение для постобработки.

2. Струйное нанесение материала. Технология ориентирована на получение высокоточных деталей, ограничена по номенклатуре материалов и характеризуется высокой стоимостью оборудования.

3. Струйное нанесение связующего. Технология используется для получения высокоточных деталей, имеет высокую стоимость оборудования, при печати металлами требуется производить спекание и учитывать усадку конечного изделия.

4. Синтез на подложке. Можно изготавливать как пластиковые, так и металлические детали высокой точности и сложной геометрии. Оборудование для данной технологии имеет высокую стоимость и из-за работы с порошковыми материалами требует особых условий труда;

5. Прямой подвод энергии и материала. Использование данной технологии 3D-печати металлами требуется только в случае изготовления инструмента со сложной геометрией и высокими нагрузками. Также при использовании этой технологии необходимо иметь дорогое оборудование для последующей постобработки деталей;

6. Листовая ламинация. Редко используемая технология, из материалов используется бумага, пластик или металлическая фольга. При использовании металла также требуется дорогое оборудование для последующей постобработки.

Из оставшихся и доступных технологических процессов 3D-печати для производства инструмента остается только экструзия материала. Из имеющихся технологий экструзии материалов FDM наиболее распространенная доступная и простая в реализации.

Поскольку выбрана технология FDM, выбор материала становится критическим фактором обеспечения качества конечного изделия.

Для FDM-печати разработано значительное количество материалов, причем их номенклатура постоянно расширяется. Отрасль находится в стадии активного

развития, поэтому справочники и полноценные рекомендации по подбору материала, аналогичные существующим в области металлообработки, в настоящее время отсутствуют. С целью выбора материала проведен анализ российских производителей филаментов (зарубежные не рассматривались из-за отсутствия локализованного производства, что может вызвать задержки поставок и нивелировать преимущество использования FDM-инструмента). По данным российского рынка (более 30 производителей филаментов) для технологии FDM существует большое количество термопластиков, которые отличаются между собой по физико-механическим и технологическим свойствам.

При выборе филаментов для исследования учитывались следующие критерии:

- низкая усадка (обеспечивает точность размеров инструмента);
- возможность использования на 3D-принтере с открытой камерой (закрытые принтеры стоят дороже);
- доступность и распространенность (филамент должен выпускаться разными производителями);
- низкая стоимость;
- высокая твердость;
- хорошая адгезия с платформой построения.

В ходе анализа из полученного списка исключены следующие филаменты:

- PVA, HIPS – используются в качестве материалов поддержек;
- SAN, SBS – применяются в декоративных целях и не имеют широкого распространения;
- ASA [59, 77] – его ключевой особенностью является стойкость к ультрафиолетовому излучению;
- SEBS, TPU (A70-D70), PP [102, 103] – эластичные и химически стойкие материалы;
- PMMA, WAX – предназначены для 3D-печати с последующим литьем по выжигаемым и выплавляемым моделям;
- PSU, PEEK, PEI, PSS, PC [102, 103], PVDF, POK – высокотемператур-

ные пластики, характеризующиеся высокой стоимостью и требующие промышленного оборудования;

- PA6, PA11, PA12, PBT, HDPE, POM, PPO/PPE – обладают высокой усадкой и сложны в обработке;
- PCTG, PETG – имеют невысокую твердость и повышенную эластичность по сравнению с PLA и ABS.

Оставшиеся филаменты – ABS [96, 102, 103] и PLA [97, 102, 103] – удовлетворяют перечисленным требованиям. В таблице 1.2 приведены механические характеристики филаментов ABS [96] и PLA [97].

Таблица 1.2 – Механические характеристики филаментов ABS и PLA

Характеристики	ABS	PLA
Прочность при растяжении вдоль слоев, МПа	29,6	34,8
Модуль упругости при растяжении вдоль слоев, ГПа	1,27	1,32
Прочность при растяжении поперек слоев, МПа	19,7	31,2
Модуль упругости при растяжении поперек слоев, ГПа	2,34	3,07
Предел текучести при сжатии, МПа	49,3	77,4
Модуль упругости при сжатии, ГПа	1,71	2,96
Прочность при изгибе, МПа	65,4	94,2
Модуль упругости при изгибе, ГПа	2,14	3,04
Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	180,14	5,62
Твердость (Shore D)	78	83
Плотность, г/см ³	1,05	1,25

На основании анализа рынка выпускаемых материалов и обзора литературных данных по изготовлению пластиковой оснастки наиболее подходящими признаны филаменты ABS и PLA. В ходе дальнейшего исследования этих двух материалов будет выбран один, наиболее пригодный для испытаний в производственных условиях.

1.4 Анализ экспериментальных данных о механических свойствах FDM-образцов

Ключевое значение для несущей способности матрицы, работающей в условиях контактных сжимающих напряжений при гибке, имеет объемная доля материала в рабочей зоне, определяемая плотностью заполнения при FDM-печати. Фактически именно этот параметр определяет фактическую площадь поперечного сечения, которая воспринимает прилагаемую нагрузку, и, как следствие, уровень максимальных напряжений в инструменте.

В работе [5] Вдовенко А.Д. и др. экспериментально показали, что при увеличении плотности заполнения с 20 до 100 % предел прочности при растяжении возрастает в 2,1 раза для PLA (рисунок 1.14) и в 1,8 раза для PETG. Такая зависимость имеет почти линейный характер в диапазоне 20–80 %, после чего прирост замедляется потому, что основную роль начинают играть свойства материала стенок, а не геометрическое ослабление поперечного сечения.

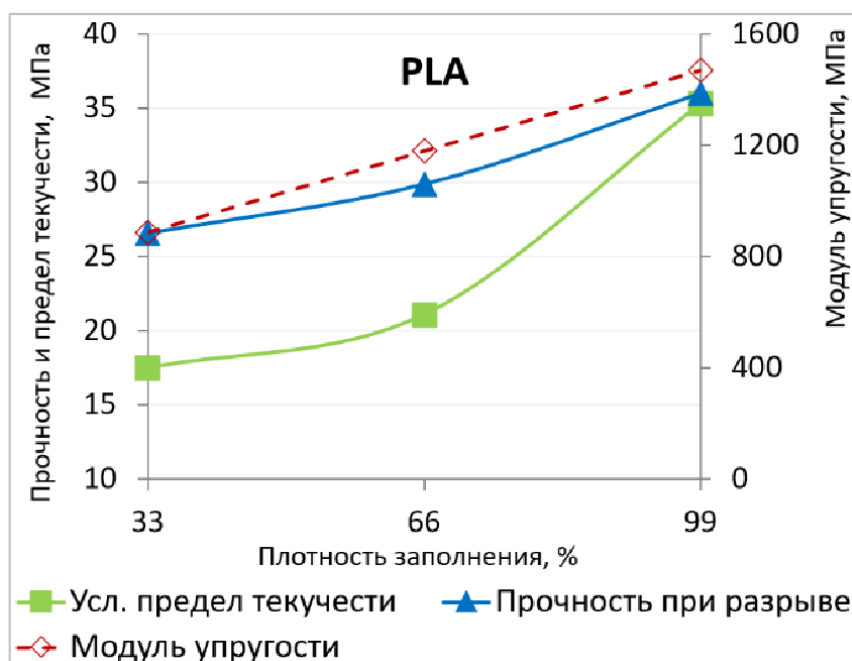


Рисунок 1.14 – Зависимость механических характеристик образцов от процента заполнения [5]

Влияние технологической плотности на жесткость при трехточечном изгибе проанализировано Шалыгиным С.В. и Русских Г.С. в работе [42]. Такие данные являются существенными для анализа процесса свободной гибки при котором матрица воспринимает сжимающие нагрузки. Авторами показано, что переход от заполнения 50 % к 100 % повышает модуль упругости на 65 % для PLA и на 48 % для ABS. Более существенное увеличение модуля упругости для PLA при повышении плотности заполнения объясняется его более высокой исходной жесткостью. В работе [3] при испытаниях PLA-пластин на трехточечный изгиб получено среднее значение 45,1 МПа.

Леонович И.А. и др. [26] систематизировали данные по ABS-пластику и сделали вывод о наличии и характере зависимости между пределом прочности и модулем упругости при растяжении и плотностью заполнения ABS-пластика. Также авторы отмечают, что фактическая плотность заполнения может иметь погрешность, величина которой зависит от конкретной модели принтера, а также от размеров и конфигурации модели.

Потапов А.А. в диссертации [31] обосновал режимы печати для достижения заданных механических характеристик, рекомендовав высоту слоя 0,2–0,3 мм и заполнение не менее 40 % для нагруженных деталей.

Анализ рассмотренных работ [5, 26, 42] позволяет сделать вывод о том, что изменение плотности внутреннего заполнения является действенным инструментом управления прочностью пластиковой матрицы без изменения геометрии детали.

При этом, поскольку увеличение плотности внутреннего заполнения матрицы приводит к пропорциональному увеличению времени печати и расхода материала, то для матриц свободной гибки целесообразно определять оптимальный уровень внутреннего заполнения, обеспечивающий требуемую прочность при минимизации затрат.

Оптимизация режимов печати непосредственно для PLA проведена Михальченко А.А. и др. [28]. Установлено, что при температуре сопла 220 °С, скорости 50 мм/с и ориентации XYZ предел прочности достигает 52,3 МПа.

Турченко М.В. и др. [39] исследовали зависимость прочности ABS-образцов от количества периметров и плотности заполнения. При четырех периметрах и заполнении 80 % получена прочность 27,8 МПа – всего на 10 % ниже, чем при монолитном заполнении, что важно для снижения расхода материала без критической потери несущей способности.

Испытания на сжатие, наиболее близкие к условиям нагружения матрицы при гибке, выполнены Карасевым Н.И. и Бражниковой А.М. [15] по ГОСТ 4651-2014. По результатам проведенных исследований PLA показал более высокие показатели модуля упругости (около 747 МПа) относительно ABS (около 570 МПа), что показывает возможность его использования для жестких конструктивных элементов. При этом ABS показал большую пластичность, что говорит о возможности его использования в деталях, работающих при ударных нагрузках.

Дополнительные данные о влиянии высоты слоя, скорости, заполнения и числа периметров на прочность изделий из PLA+ и PLA CF приведены в [7]. Рекомендации Потапова А.А. [31] о высоте слоя 0,2–0,3 мм и заполнении не менее 40 % для нагруженных деталей согласуются с выводами автора.

Ярко выраженная анизотропия механических свойств FDM-материалов требует отдельного анализа. Распопина В.Б. и др. [32] изучили. Обнаружено более чем двукратное различие: при ориентации ZXY (нагрузка перпендикулярно слоям) предел прочности составил 28,4 МПа, при ориентации YZX – лишь 12,6 МПа. Также авторами продемонстрировано влияние направления укладки нити при заполнении внутреннего объема образца на прочность при растяжении.

Шеметов Л.И. и др. [44] предложили специальную форму образца с низким заполнением для корректного определения механических характеристик FDM-структур. Карасев Н.И. и Воробьев И.Б. [16] провели комплексный анализ поведения ABS и PLA при одноосном растяжении с фрактографией, позволяющий сделать выводы о влиянии анизотропии образцов, вызванной технологическими параметрами FDM-процесса, на механические свойства. В ходе испытаний PLA показал низкую пластичность ($\epsilon_b = 1,76\%$) при растяжении, которая характерная для

полукристаллических полимеров, но при этом он обладает достаточной жесткостью (модуль упругости 3806 МПа) и прочностью (44,22 МПа). ABS показал более низкие значения прочности и модуля упругости, но большую пластичность.

Влияние направления печати подтверждается в диссертация Гущина И.А. [11], в работе рассматривается метод формирования неплоских слоев на пятиосевых принтерах, который может быть использован для локального управления ориентацией волокон в зонах максимальных сжимающих напряжений.

В работе [68] исследовались образцы, изготовленные в 5 разных положениях на платформе построения 3D-принтера. Лучшие результаты на сжатие показали образцы с ориентацией XYZ по сравнению с образцами с ориентацией ZXY. При этом у авторов почти отсутствует разница в механических свойствах у образцов, испытанных на растяжение в таких же положениях.

В работе авторов Ding Qingjun и др. [58] выполнено систематическое исследование анизотропии механических и трибологических свойств композитов на основе PLA, изготовленных методом FDM, в зависимости от ориентации построения и ключевых параметров печати. Установлено, что при использовании композиционных пластиков для 3D-печати явления анизотропии дополнительно усиливается из-за преимущественной ориентации армирующих волокон вдоль направления печати, что позволяет управлять процессом, создавая изделия с направленными свойствами.

При эксплуатации матрицы в условиях гибки возможен нагрев инструмента. Василевич В.Г. и др. [4] представили зависимости предела прочности и модуля упругости для ABS, PLA и PETG в интервале температур 20...60 °C. Исследования показали, что происходит уменьшение прочности и модуля упругости при растяжении и изгибе при повышении температуры. PLA продемонстрировал существенное снижение механических характеристик при температуре выше 40 °C, в частности для PLA зафиксировано падение прочности с 52 МПа до 28 МПа при нагреве до 60 °C (рисунок 1.15). В тоже время ABS пластике показывал постепенное снижение механических характеристик, без скачков.

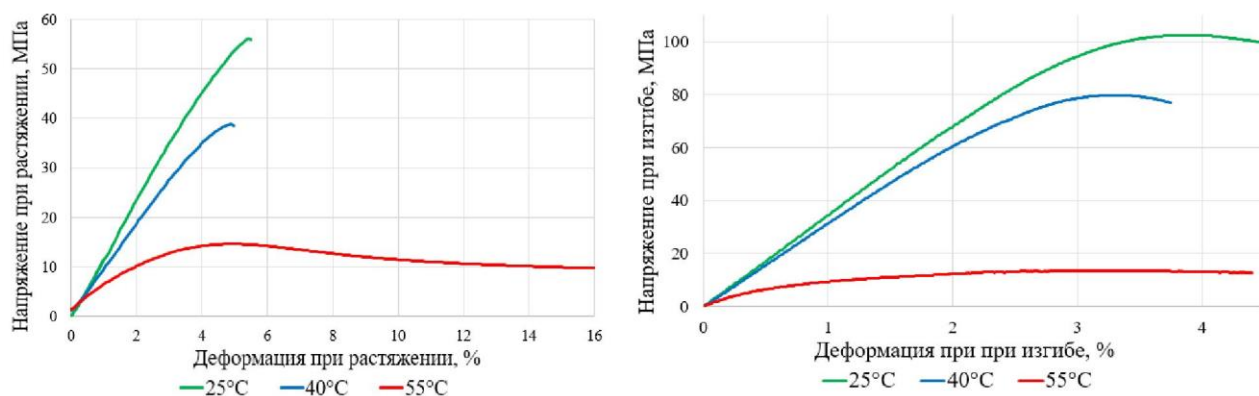


Рисунок 1.15 – Кривая напряжение–деформация для образцов из PLA при повышенных температурах [4]

Полученные данные говорят о том, что выбор PLA в качестве материала изготовления инструмента возможен только для процессов, которые не сопровождаются нагревом. в том числе в результате контактного трения.

Общую картину влияния параметров процесса 3D-печати систематизировали Левина Т.А. и др. [25] в комплексном обзоре с диаграммой причинно-следственных связей. Отмечено, что параметры технологии FDM существенно влияют на механические свойства напечатанных объектов, а плотность заполнения является наиболее важным параметром для значения прочности на растяжение. Петрова Г.Н. и др. [30] обобщили физико-механические и теплофизические свойства базовых FDM-материалов, в том числе ABS и PLA. Кондрашов С.В. обобщил общие технологические рекомендации в обзоре [20].

Сравнительные испытания ABS+, PETG и PLA при разных заполнениях и температурах печати, выполненные Хасановым Б.Д. и др. [40], а также анализ стабильности временного сопротивления ABS [46], который показал разброс в пределах 12 %, позволяют оценить повторяемость характеристик в условиях мелкосерийного производства.

Диссертация Шалыгина С.В. [43] занимает центральное место среди работ, непосредственно ориентированных на проектирование внутренней структуры FDM-изделий с учетом напряженно-деформированного состояния. С целью минимизации потери прочности и концентрации напряжений, в работе [43] разработана

методика оптимизации внутреннего заполнения изделия, которая обеспечивает рациональное перераспределение материала внутри детали. При этом в работе было отмечено, что для деталей, изготовленных по технологии FDM такие методы оптимизации, носят расчетно-экспериментальный характер, или имеют ряд допущений, ограничивающих их применимость для широкого спектра изделий.

Накопленный экспериментальный материал однозначно свидетельствует, что PLA обладает более высокой жесткостью и прочностью при сжатии по сравнению с ABS, что делает его предпочтительным для матриц, работающих в условиях сжимающих нагрузок. Недостатком PLA является хрупкость и относительно низкая температура стеклования ($55\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$), однако в условиях свободной гибки без интенсивного трения нагрев матрицы не превышает $40\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$, что, согласно данным [4], сохраняет достаточный запас прочности.

1.5 Проблема разработки технологических процессов и определения технологических параметров 3D-печати, обеспечивающих требуемые показатели качества инструментов для свободной гибки

Используя один и тот же 3D-принтер, филамент и 3D-модель, можно получить совершенно разные по механическим свойствам детали или полноценные изделия. Это связано с технологическими параметрами 3D-печати, которые задаются в специализированном программном обеспечении (слайсере).

На основе анализа источников [2, 5, 6, 25, 32, 36, 45, 55, 56, 57, 58 66, 68] было выделено 10 основных технологических параметров 3D-печати, оказывающих влияние на механические свойства готовых деталей:

- температура экструзии;
- температура платформы построения;
- скорость 3D-печати;
- высота слоя;
- ширина экструзии;

- плотность внутреннего заполнения;
- ориентация модели на платформе построения (ГОСТ Р 59585-2021);
- угол заполнения (растра);
- тип внутреннего заполнения;
- степень обдува.

В настоящее время нет достоверных исследований для понимания того, как влияют в сумме вышеописанные характеристики и того, как можно их совместно использовать для достижения оптимальных механических свойств готовых изделий. Очень быстрое развитие аддитивных технологий предоставляет каждый раз новые возможности в области оборудования и его узлов, программного обеспечения и материалов. Механические характеристики готовых изделий могут изменяться из-за влияния вышеперечисленных факторов.

На основании изученных работ, связанных с упомянутыми технологическими параметрами 3D-печати были сделаны следующие выводы.

Температура экструзии. Исследования [14, 36, 58, 72, 89, 113, 114], указывают на увеличение механических характеристик деталей при повышении температуры экструзии, но следует учитывать, что достигнув температуры термической деструкции, будут разрушаться химические связи и механические характеристики будут снижаться. Так же отмечается появление дефектов на деталях с изменением их геометрических параметров из-за повышенной температуры экструзии, т.к. появляются наплывы и подтеки пластика в местах перегрева.

Температура платформы построения. Исследования [36, 56, 89] показывают, что при изменении температуры платформы построения, механические характеристики могут также изменяться в большую или меньшую сторону. Для разных материалов, используемых в 3D-печати, устанавливается разная температура платформы построения в зависимости от типа 3D-принтера и вида платформы.

Скорость 3D-печати. Исследования, проведенные в работах [28, 36, 58, 101, 113] показывают, что изменение скорости 3D-печати может приводить как к повышению механических характеристик, так и к снижению. Исследования данного па-

раматра необходимо проводить с другими технологическими параметрами, для выявления получаемых изменений. Такими параметрами могут быть степень обдува и температура экструзии.

Высота слоя. Исследования [31, 55, 56, 58, 94, 95, 110, 113, 119, 120] показали, что механические характеристики снижаются с увеличением высоты слоя 3D-печати. В исследованиях не указываются используемые диаметры сопел для экструзии материала. При увеличении высоты слоя 3D-печати с использованием одного диаметра сопла появляется нестабильность экструзии материала, если не увеличивается ширина экструзии (рисунок 1.16). Kholil A. [75] отмечает, что прочность образцов была повышена при увеличении высоты слоя, но автор не указывает использовались ли разные диаметры сопел для экструзии разной высоты слоя.

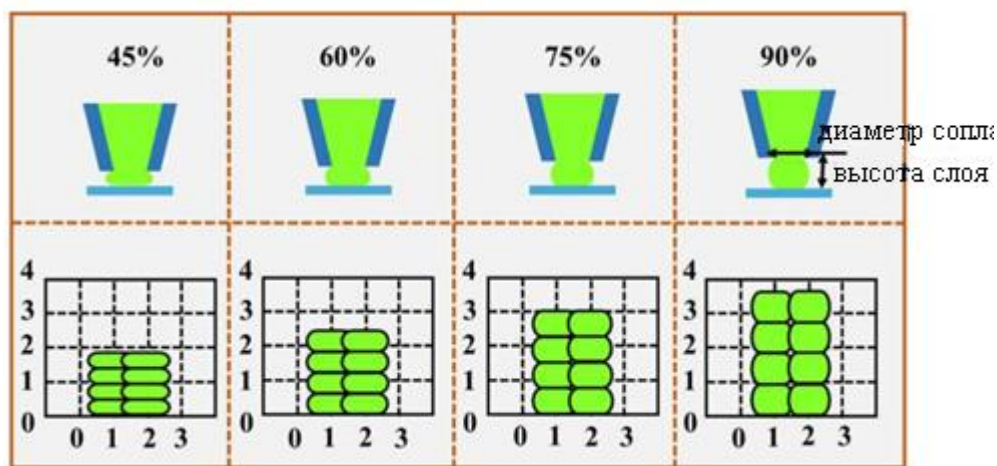


Рисунок 1.16 –Процесс экструзии в зависимости от высоты слоя
и схематическое изображение высоты слоя [115]

Ширина экструзии. Авторы работ [36, 94, 116] утверждают, что увеличение ширины слоя приводит к повышению механических характеристик, но тут так же следует учитывать как и при изменении высоты слоя, что данный технологический параметр напрямую зависит от диаметра сопла. При использовании небольшого диаметра, например, 0,2 мм, установка ширины экструзии на 0,6 мм приведет к нестабильным результатам, также, как и использование сопла диаметром 1 мм и ширины экструзии 0,5 мм.

Плотность внутреннего заполнения. Авторы работ [5, 8, 9, 14, 36, 68, 101,

114] исследуя материал пришли к выводу, что при повышении плотности внутреннего заполнения можно сильно повышать механические характеристики готовых изделий. То есть данный технологический параметр может оказывать сильное влияние на конечные детали, и он легко регулируется в программном обеспечении при создании управляющей программы. На рисунке 1.17 представлена разная плотность внутреннего заполнения.



Рисунок 1.17 – Плотность внутреннего заполнения [93]

Ориентация модели на платформе построения. В работах [8, 9, 16, 32, 45, 55, 58, 68, 89, 95, 98, 110, 114, 120] говорится, что при изменении данного технологического параметра, механические характеристики готовых изделий могут отличаться до 3 раз. Данный технологический параметр как раз и ограничивает использование деталей, изготовленных с помощью 3D-печати так как анизотропные свойства готовых деталей, очень сильно сказываются на эксплуатационных характеристиках. Данный технологический параметр можно хорошо контролировать при подготовке модели и так как он имеет критическое влияние на механические характеристики, он требует дополнительного рассмотрения в работе.

Угол заполнения раstra. Исследования [36, 56, 89, 94, 98, 119] показывают, что данный технологический параметр будет влиять на механические характеристики готового изделия и может их повысить только в том случае, если расположения угла заполнения раstra правильно подобрано относительно прикладываемой нагрузки.

Тип внутреннего заполнения. Исследования [2, 36, 56, 68] говорят, что тип внутреннего заполнения необходимо выбирать в зависимости от схемы нагружения конечной детали. Данный технологический параметр подбирают для деталей, ко-

торые будут находиться в условиях постоянной деформации или при незначительных нагрузках.

Степень обдува. Часть материалов критична к обдуву в процессе 3D-печати. При наличии обдува механические характеристики изделий могут понижаться.

Исходя из анализа литературных источников для дальнейших исследований были выбраны следующие технологические параметры 3D-печати:

1. Температура экструзии;
2. Скорость 3D-печати;
3. Плотность внутреннего заполнения;
4. Ориентация модели на платформе построения;
5. Степень обдува.

1.6 Выводы по главе 1

Проведенный анализ технологий изготовления инструмента для свободной гибки, факторов, влияющих на механические свойства изделий, и существующих материалов, показывает перспективу использования технологии 3D-печати по технологии экструзии материала FDM для изготовления инструмента для технологии свободной гибки металла. По результатам анализа можно сделать следующие выводы:

1. Инструмент для свободной гибки для единичного и мелкосерийного производства возможно изготавливать, используя различные технологии. Если изготавливать стальной инструмент, то необходим большой и дорогой парк оборудования и соответственно высококвалифицированный персонал. Стальной инструмент обладает большими преимуществами перед пластиковым, но имеет зачастую стандартную геометрию, что ограничивает варианты изготовления продукции разных форм. Использование стального инструмента наиболее оптимально при изготовлении продукции со стандартной геометрией или больших партий. Пластиковый инструмент менее стоек к прилагаемой нагрузке, менее износостойкий по отношению

к стальному, но его преимущество заключается в том, что не требуется иметь большой и дорогой парк оборудования.

2. Показана принципиальная возможность изготовления инструмента для свободной гибки из пластика по технологии FDM. Однако нет комплексных работ изучающих взаимосвязи параметров 3D-печати с работоспособностью инструмента. Имеющиеся данные имеют разрозненный, частных характер и не позволяют обобщить результаты и выявить закономерности процесса.

3. Присутствие на рынке большого количества материалов обусловлено очень быстрым развитием аддитивных технологий. Отсутствие стандартизации и справочников создает трудности в выборе подходящего материала и конкретного производителя. Проведенный анализ литературных источников и анализ рынка производителей материалов показал, что ABS и PLA пластики, наиболее подходящие для изготовления инструмента для свободной гибки металлов.

4. Использование разных технологических параметров 3D-печати оказывает влияние на механические характеристики конечных деталей. Для выявления части зависимостей технологических параметров требуются объемные исследования материала, постоянная проверка материала в лабораторных условиях для незначительного увеличения механических характеристик. Для других же технологических параметров все более очевидно и изменение технологического параметра в слайсере на другое значение, приведет к существенному изменению прочностных характеристик готовой детали. На основании проведенного анализа для исследований были выбраны следующие технологические параметры 3D-печати: температура экструзии, скорость 3D-печати, плотность внутреннего заполнения, ориентация модели на платформе построения, степень обдува.

В изученных исследованиях используются разные 3D-принтеры, слайсеры, материалы и подходы в испытаниях материалов, что не дает возможности качественно сравнивать разные исследования в условиях отсутствия стандартизации в области аддитивных технологий. Так же приведенные примеры с использованием инструмента, изготовленного для свободной гибки, не дают четких рекомендаций по технологии его производства, выбору материала и технологических параметров

3D-печати.

Исходя из вышесказанного была поставлена следующая цель исследования: повышение эффективности изготовления инструмента для свободной гибки посредством сокращения времени изготовления и расхода материала на основе разработки и внедрения технологического процесса 3D-печати по технологии FDM.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ 3D-ПЕЧАТИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ИЗ ABS- И PLA- ПЛАСТИКОВ

На основании поставленных цели и задач была составлена методика и последовательность проведения экспериментов.

На первом этапе проверялось влияние технологических параметров 3D-печати на механические характеристики образцов из пластика при растяжении. В качестве основных технологических параметров использовались температура экструзии, скорость 3D-печати и степень обдува. После испытаний проведена математическая обработка результатов исследования.

На втором этапе исследовалось влияние ориентации образцов из пластика на платформе построения на механические характеристики при сжатии.

2.1 Методика и последовательность проведения экспериментальных исследований

Для достижения поставленной цели и задач исследования были выработаны рабочие гипотезы, методика и последовательность проведения экспериментов. Последовательность проведения экспериментов была следующая:

1. Исследование зависимости технологических параметров 3D-печати (температуры экструзии, скорости 3D-печати и степени обдува) на механические характеристики образцов из пластика при растяжении. Целью исследования являлось выявление зависимостей с помощью математической обработки результатов испытаний с возможностью повышения механических характеристик матриц при изменении технологических параметров 3D-печати.

2. Исследование влияния ориентации образцов на платформе построения на механические характеристики при сжатии. Целью данного исследования было

выявление наиболее подходящей ориентации образцов на платформе построения для последующего изготовления матрицы.

3. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния матрицы в процессе свободной гибки. Целью данного исследования было подтверждение теоретической схемы нагружения матриц и выявление зон с наибольшими напряжениями растяжения, и сжатия. В качестве меры оценки напряженного состояния (всестороннее сжатие или всестороннее растяжение) материала инструмента выбрано значение среднего (гидростатического) напряжения, выводимое в программе QForm по результатам моделирования процесса формоизменения.

4. Исследование влияния геометрической формы матрицы на ее напряженно-деформированное состояние с применением численного моделирования и выявлением функциональной зависимости. Целью данного исследования являлось изучение влияния угла раскрытия V-образного выреза матрицы, радиуса в основании V-образного выреза и радиусов в рабочей области матрицы на ее напряженно-деформированное состояние.

5. Исследование влияния ориентации матрицы на платформе построения при 3D-печати на прочность. В экспериментальном исследовании изучалось способность матрицы выдерживать разнонаправленные нагрузки в зависимости от расположения слоев.

6. Исследование влияния плотности внутреннего заполнения матрицы на прочностные характеристики. В данном исследовании изучалось влияние внутреннего заполнения матрицы на ее стойкость к прилагаемым нагрузкам. Также тут оценивалось время изготовления и расход материала необходимый для 3D-печати матриц.

7. Разработка инженерной методики проектирования и изготовления матрицы с заданными прочностными параметрами. На данном этапе были использованы результаты ранее проведенных экспериментов с целью получения матрицы с заданными параметрами.

8. Апробация результатов в условиях производства. Основываясь на разработанном алгоритме, была заработана и изготовлена матрица под гибку трех разных изделий.

9. Расчет экономической эффективности применения 3D-печати для изготовления матриц. На основании изготовленной матрицы была рассчитана ее себестоимость. Также в качестве примера представлены стоимости изготовления с помощью фрезерования и покупки стандартной матрицы.

Оборудование и программное обеспечение, используемое в исследованиях:

1. КОМПАС-3D. Использовалась для моделирования с последующей конвертацией моделей в формат STEP.

2. Prusa Slicer и OrcaSlicer. Программы использовались для создания управляющих программ в виде G-code для 3D-принтера. В них производилась подготовка 3D-модели к печати и настройка технологических параметров. Данные программы имеют открытый исходный код, что позволяет детально настраивать каждый параметр 3D-печати, программы с закрытым исходным кодом такими функциями не обладают.

3. QForm. Программа использовалась для моделирования напряженно-деформированного состояния матрицы в процессе свободной гибки.

4. Сушильный шкаф DO-30 (рисунок 2.1). Использовался для сушки материала перед 3D-печатью. Для ABS пластика использовалась температура 70°C с длительностью сушки 4 часа. Для PLA пластика использовалась температура 50°C с длительностью сушки 4 часа.



Рисунок 2.1 - Сушильный шкаф DO-30

5. 3D-принтеры FDM Hercules 18 и X1 Carbon (рисунок 2.2). Использовались для 3D-печати образцов для испытаний и матриц. Данное оборудование имеет

полузакрытую и закрытую камеру 3D-печати и удовлетворяет требованиям по печати PLA и ABS пластиками.



Рисунок 2.2 – Слева: Hercules 18; справа: X1 Carbon

6. Универсальная испытательная машина УТС-101-50-1У (рисунок 2.3).
Использовалась для испытания образцов на растяжение.



Рисунок 2.3 – УТС-101-50-1У

7. Универсальная испытательная машина УТС-110М-50-0У (рисунок 2.4).
Использовалась для испытания образцов на сжатие.



Рисунок 2.4 – УТС-110М-50-0У

8. Штангенциркуль цифровой ШЦЦ-1-150 (INSIZE). Использовался для замера образцов перед испытаниями на растяжение и сжатие.

9. Листогибочный пресс с ЧПУ Durma AD-R 30135. Использовался для экспериментальных испытаний матриц и апробации в условиях производства. Основные характеристики:

- рабочая сила пресса 135 т;
- максимальная длинагиба 3 м;
- система крепления инструмента на станке Amada-Promecam;
- ЧПУ Delem DA-66T.



Рисунок 2.5 – Durma AD-R 30135

2.2 Исследования влияния температуры, скорости 3D-печати и степени обдува на механические характеристики образцов

На первом этапе экспериментальных исследований выявлялась зависимость механических характеристик материала образцов от технологических параметров 3D-печати. В качестве основных технологических параметров были выбраны: температура экструзии материала (T), скорость 3D-печати (V), степень обдува образца (Q). В качестве выходных параметров эксперимента были приняты прочность при растяжении (σ), относительное удлинение (ϵ) и модуль упругости (E) материала образцов.

В результате проведения экспериментальных исследований требовалось раскрыть следующие функциональные зависимости:

$$\sigma = f(T, V, Q), \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = f(T, V, Q), \quad (2.2)$$

$$E = f(T, V, Q), \quad (2.3)$$

где T – температура экструзии, $^{\circ}\text{C}$;

V – скорость 3D-печати, мм/с ;

Q – степень обдува, %.

Поскольку на данном этапе проводятся предварительные исследования, то был выбран полный факторный эксперимент ПФЭ 2^3 . Выбор ПФЭ 2^3 обусловлен небольшим числом исследуемых факторов, обеспечивает достаточный объем данных при минимальном числе опытов, позволяет оценить влияние каждого фактора и их взаимодействие [71,79].

Представим уравнения (2.1)–(2.3) в виде полиномов:

$$\sigma = K_1 \cdot T^{Z_{11}} \cdot V^{Z_{12}} \cdot Q^{Z_{13}}, \quad (2.4)$$

$$\varepsilon = K_2 \cdot T^{Z_{21}} \cdot V^{Z_{22}} \cdot Q^{Z_{23}}, \quad (2.5)$$

$$E = K_3 \cdot T^{Z_{31}} \cdot V^{Z_{32}} \cdot Q^{Z_{33}}, \quad (2.6)$$

где K_i – коэффициенты математической модели;

Z_i – показатели степени математической модели.

Приведем уравнения (2.4)–(2.6) к линейному виду путем логарифмирования:

$$\ln \sigma = \ln K_{10} + Z_{11} \ln T + Z_{12} \ln V + Z_{13} \ln Q, \quad (2.7)$$

$$\ln \varepsilon = \ln K_{20} + Z_{21} \ln T + Z_{22} \ln V + Z_{23} \ln Q, \quad (2.8)$$

$$\ln E = \ln K_{30} + Z_{31} \ln T + Z_{32} \ln V + Z_{33} \ln Q. \quad (2.9)$$

Для приведения данных уравнений (2.7)–(2.9) к регрессионной модели проведем замену:

$$\hat{y}_1 = \ln \sigma; \hat{y}_2 = \ln \varepsilon; \hat{y}_3 = \ln E. \quad (2.10)$$

$$b_{10} = \ln K_{10}; b_{20} = \ln K_{20}; b_{30} = \ln K_{30}. \quad (2.11)$$

$$b_{11} = Z_{11}; b_{12} = Z_{12}; b_{13} = Z_{13}. \quad (2.12)$$

$$b_{21} = Z_{21}; b_{22} = Z_{22}; b_{23} = Z_{23}. \quad (2.13)$$

$$b_{31} = Z_{31}; b_{32} = Z_{32}; b_{33} = Z_{33}. \quad (2.14)$$

$$x_1 = \ln T; x_2 = \ln V; x_3 = \ln Q. \quad (2.15)$$

Окончательно, получаем линейные следующие уравнения регрессии:

$$\hat{y}_1 = b_{10} + b_{11}x_1 + b_{12}x_2 + b_{13}x_3, \quad (2.16)$$

$$\hat{y}_2 = b_{20} + b_{21}x_1 + b_{22}x_2 + b_{23}x_3, \quad (2.17)$$

$$\hat{y}_3 = b_{30} + b_{31}x_1 + b_{32}x_2 + b_{33}x_3. \quad (2.18)$$

Для постановки эксперимента в качестве исследуемых технологических параметров 3D-печати на основании анализа литературных источников, проведенного в первой главе, были выбраны: температура экструзии (T), скорость 3D-печати (V) и степень обдува (Q). На основании рекомендаций производителей филамента были установлены уровни варьирования данных факторов, приведенные в таблице 2.1. При установлении уровней варьирования для степени обдува было учтено, что в настройках слайсеров и 3D-принтеров значение для обдува устанавливается в относительных значениях – от 0 до 100 %, что не отражает абсолютных физических параметров воздушного потока и могут соответствовать различным реальным скоростям потока воздуха на оборудовании разных моделей.

Для обеспечения сопоставимости экспериментальных данных было принято решение перевести относительные значения в абсолютные физические величины – скорость воздушного потока в метрах в секунду (м/с). На основе предварительной калибровки для конкретной модели 3D-принтера, используемого в эксперименте, была установлена следующая зависимость между степенью обдува в процентах и скоростью воздушного потока: 100% степени обдува соответствует скорости потока 5 м/с, 50% – 3 м/с, 25% – 2 м/с, 0% – 1 м/с.

Таблица 2.1 – Исследуемые технологические параметры 3D-печати

№	Наименование фактора	Обозначение фактора	Обозначение параметра	Интервал варьирования
1	Температура экструзии материала, С°	x_1	T	230-250
2	Скорость 3D-печати, мм/с	x_2	V	40-50
3	Степень обдува модели, м/с	x_3	Q	1-2

Для составления матрицы эксперимента было проведено кодирование факторов (таблица 2.2). Матрица планирования представлена в таблице 2.3.

Таблица 2.2 – Кодирование факторов

Факторы	$x_{i\text{код}}$	$x_{1\text{нат}}$ T, C°	x_1 $\ln T$	$x_{2\text{нат}}$ $V, \text{мм/с}$	x_2 $\ln V$	$x_{3\text{нат}}$ $Q, \text{м/с}$	x_3 $\ln Q$
Верхний уровень	+1	250	5,52	50	3,91	2	0,69
Нижний уровень	-1	230	5,44	40	3,69	1	0
Базовый уровень	0	240	5,48	45	3,81	1,5	0,41
Интервал варьирования	Δ	10		5		0,5	

Таблица 2.3 – Матрица плана эксперимента ПФЭ 2^3

№ экспери- мента, j	План эксперимента							
	x_0	$x_{1\text{код}}$	$x_{1\text{нат}}$, T, C°	$x_{2\text{код}}$	$x_{2\text{нат}}$, $V, \text{мм/с}$	$x_{3\text{код}}$	$x_{3\text{нат}}$, $Q, \text{м/с}$	y_1, y_2, y_3
1	+1	+1	250	+1	50	+1	2	y_{11}, y_{21}, y_{31}
2	+1	-1	230	+1	50	+1	2	y_{12}, y_{22}, y_{32}
3	+1	+1	250	-1	40	+1	2	y_{13}, y_{23}, y_{33}
4	+1	-1	230	-1	40	+1	2	y_{14}, y_{24}, y_{34}
5	+1	+1	250	+1	50	-1	1	y_{15}, y_{25}, y_{35}
6	+1	-1	230	+1	50	-1	1	y_{16}, y_{26}, y_{36}
7	+1	+1	250	-1	40	-1	1	y_{17}, y_{27}, y_{37}
8	+1	-1	230	-1	40	-1	1	y_{18}, y_{28}, y_{38}

Для минимизации риска пропуска экстремума в области нулевого уровня фактора T (температура экструзии) были дополнительно запланированы и проведены четыре эксперимента, матрица которых представлена в таблице 2.4.

Для проведения исследований на 3D-принтере печатались образцы на выбранных режимах. В качестве образца использовался образец тип 1А по ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012), представленный на рисунке 2.6.

Таблица 2.4 – Матрица дополнительных экспериментов

№ эксперимента, j	План эксперимента							
	x_0	$x_{1\text{код}}$	$x_{1\text{нат}}, T, ^\circ\text{C}$	$x_{2\text{код}}$	$x_{2\text{нат}}, V, \text{мм/с}$	$x_{3\text{код}}$	$x_{3\text{нат}}, Q, \text{м/с}$	y_1, y_2, y_3
9	+1	0	240	+1	50	+1	2	y_{19}, y_{29}, y_{39}
10	+1	0	240	-1	40	+1	2	$y_{110}, y_{210}, y_{310}$
11	+1	0	240	+1	50	-1	1	$y_{111}, y_{211}, y_{311}$
12	+1	0	240	-1	40	-1	1	$y_{112}, y_{212}, y_{312}$

Для оценки воспроизводимости были проведены шесть параллельных опытов в каждой точке эксперимента. Количество параллельных опытов выбиралось с тем расчетом, чтобы иметь возможность исключить образцы с дефектами или некорректными данными и после отбраковки оставалось не менее 5 образцов.

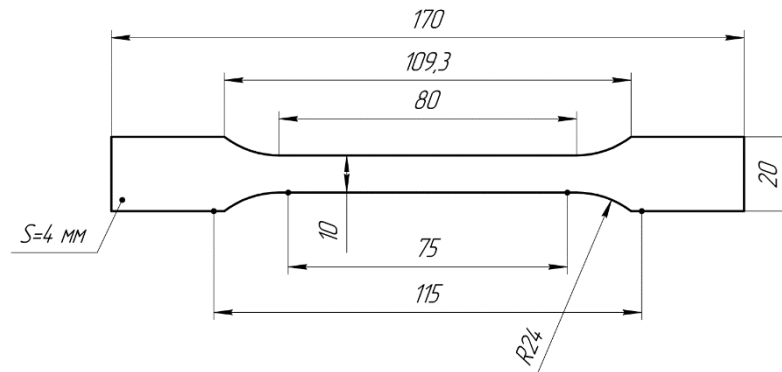


Рисунок 2.6 – Эскиз образца 1А

Так как детали изготовленные с помощью 3D-печати обладают анизотропией, что характерно для данной технологии из-за последовательной укладки слоев в процессе изготовления, расположение деталей на платформе построения является важным фактором. Полученные образцы после 3D-печати будут иметь существенные различия по механическим характеристикам в зависимости от их расположения на платформе построения 3D-принтера [16, 32, 43, 45, 110].

Для выбора ориентации на платформе при печати исследуемых образцов

были рассмотрены возможные варианты расположения образцов на платформе построения в соответствии с ГОСТ Р 59585-2021 (рисунок 2.7).

Размещение модели образца в рабочей области 3D-принтера относительно его трех декартовых плоскостей (XYZ-, XZY- или ZXY-ориентация) определяет плоскость печати для образца. Поскольку печатающая головка совершает линейное движение, ориентация образца также влияет на угол линий заполнения слоя.

По результатам анализа литературных источников, из множества вариантов расположения образцов на платформе построения 3D-принтера, наиболее точную информацию по изменению механических характеристик от технологических параметров 3D-печати, может дать ориентация на платформе построения ZXY-0°. Такая ориентация на платформе построения позволит прикладывать усилие растяжения перпендикулярно слоям, что минимизирует влияние других факторов.

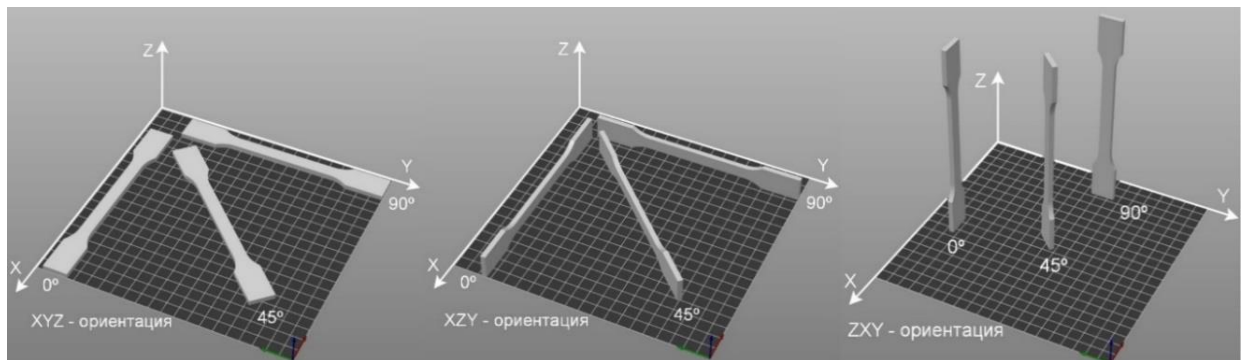


Рисунок 2.7 – Расположение образцов на платформе построения в соответствии с ГОСТ Р 59585-2021.

Ориентации: слева XYZ, в центре XZY и справа ZXY.

Углы 0-90° – варианты отклонения образца от заданной плоскости

Технологические параметры как плотность внутреннего заполнения, шаблон и траектория внутреннего и внешнего заполнения были выбраны таким образом, чтобы максимально снизить их влияние в процессе испытания на растяжение. Траектория заполнения внутренних и внешних периметров на образцах от слоя к слою происходила всегда в одном направлении. Пример заполнения одного слоя, при подготовке управляющей программы для 3D-принтера, в рабочей области образца показан на рисунке 2.8.

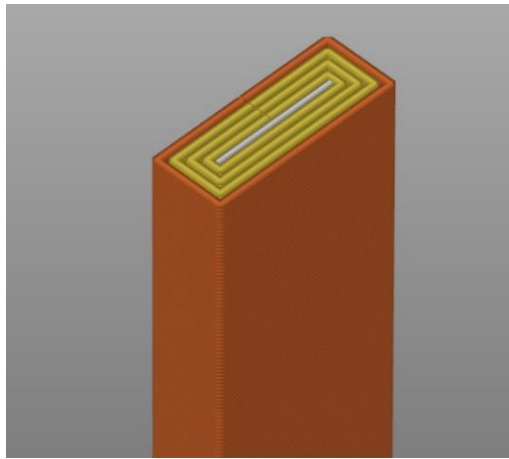


Рисунок 2.8 –Линии заполнения на слое образца в его рабочей области

Так как образование шва на вертикальной поверхности образцов неизбежно, из-за перехода от слоя к слою, поэтому шов был размещен на широкой стороне образца по центру. Расположение шва в углах для получения более качественной поверхности, могло бы привести к искаженным результатам исследования

В процессе 3D-печати может возникать перегрев изготавливаемой детали в случае малого времени 3D-печати слоя. Для уменьшения данного эффекта на платформе построения размещались сразу по 6 образцов с одинаковыми технологическими параметрами для одного испытания. Расположения образцов на платформе построения представлено на рисунок 2.9.

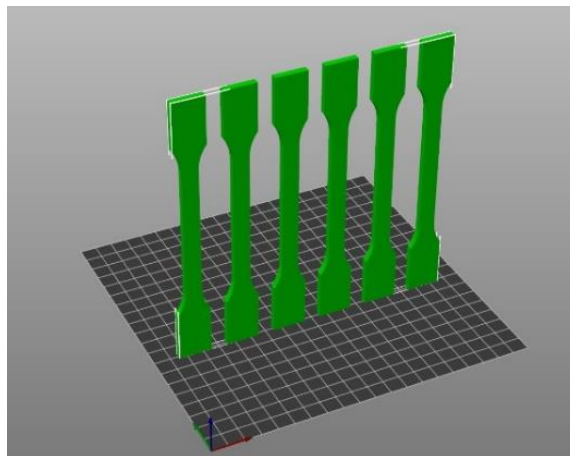


Рисунок 2.9 – Комплект образцов для одного испытания, расположенный на платформе построения

Для изготовления образцов из ABS и PLA пластика были установлены следующие параметры 3D-печати, которые оставались неизменными для всего исследования:

- высота слоя 0,2 мм;
- ширина экструзии 0,5 мм;
- 4 внешних периметра;
- плотность внутреннего заполнения 100%;
- шаблон заполнения – концентрический.

После завершения печати был проведен визуальный контроль качества образцов. Не допускались образцы со следующими дефектами:

В процессе визуального контроля, выполненного после 3D-печати, до испытаний не были допущены образцы со следующими дефектами:

- расслоение образцов по слоям;
- поры;
- деформация из-за усадки;
- смещение слоев друг относительно друга;
- недоэкструзия материала.

На изготовленных образцах с помощью штангенциркуля производилось измерение размеров рабочей области образцов и рассчитывалась ее фактическая площадь A_0 для последующего определения предела прочности, модуля упругости и относительного удлинения образцов. В качестве основного оборудования для испытания на растяжения использовалась разрывная машина УТС 101-50. Согласно ГОСТ 11262-2017 скорость раздвижения зажимов была выбрана равной 1 мм/мин. В ходе исследования были получены данные по величине растягивающей нагрузки, при которой происходило разрушение каждого из образцов и изменение расчетной длины образца. Полученные данные в виде графиков представлены на рисунках Б.1–Б.12 приложения Б.

Для определения выходных параметров использовались формулы по ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2 2012) и ГОСТ 14359-69.

Прочность образцов определялась по следующей формуле, МПа:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \quad (2.19)$$

где F – растягивающая нагрузка, Н;

A_0 – первоначальное поперечное сечение, мм².

Относительное удлинение определялось по следующей формуле, %:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L_0}, \quad (2.20)$$

где Δl – изменение расчетной длины образца, мм;

L_0 – первоначальная расчетная длина образца, мм.

Модуль упругости определялся по следующей формуле, МПа:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}, \quad (2.21)$$

где σ_2 – напряжение, МПа, измеренное при значении ε_2 , равном 0,003 мм (0,3 %);

σ_1 – напряжение, МПа, измеренное при значении ε_1 , равном 0,001 мм (0,1 %);

Полученные данные представлены в таблицах Б.1-Б.6 приложения Б.

Для дальнейшей математической обработки полученных данных были рассчитаны средние значения исследуемых параметров по формуле:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N_0}, \quad (2.22)$$

где X_i – отдельное значение определяемого показателя;

N_0 – количество отдельных значений определяемых показателей, входящих в расчет (количество параллельных опытов в каждой точке эксперимента).

Для определения ошибки воспроизводимости эксперимента определяется стандартное отклонение по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N_0 - 1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2.23)$$

Коэффициент вариации, показывающий относительный разброс данных вокруг их среднего значения, определяется по формуле:

$$V_1 = \frac{S}{\bar{X}} * 100, \quad (2.24)$$

Границы доверительного интервала среднего значения при доверительной вероятности $\alpha=0,95$:

Для нижней границы:

$$\bar{X} - \Delta X, \quad (2.25)$$

где ΔX – вероятное отклонение показателя X от полученного среднего значения $\bar{X}$;

Для верхней границы:

$$\bar{X} + \Delta X, \quad (2.26)$$

Вероятное отклонение:

$$\Delta X = \frac{t * S}{\sqrt{N_0}}, \quad (2.27)$$

где $t = 2,571$ – табличное значение критерия Стьюдента для доверительной вероятности $\alpha=0,95$ и числа степеней свободы $f = N_0 - 1 = 5$.

Полученные по (2.22)–(2.27) данные A_0 , F , σ , E , ε приведены в таблице 2.5.

Полученные значения коэффициента вариации показывают достаточную воспроизводимость эксперимента, разброс результатов обусловлен случайными ошибками и полученные данные можно использовать для дальнейшего регрессионного анализа.

Таблица 2.5 – Значения и статистические показатели выходных параметров

№ испытания	Статистические показатели		A_0 , мм2	F , Н	σ , МПа	E , МПа	ε , %
1	Среднее значение		46,06	817,12	17,74	1699,62	1,21
	Стандартное отклонение		-	14,30	0,367	10,16	0,06
	Коэффициент вариации, %		-	1,75	2,067	0,61	4,58
	Доверительный интервал для $\alpha = 0,95$	от	-	17,449	1691,48	1,17	1,17
		до	-	18,036	1707,75	1,25	1,25
2	Среднее значение		45,31	696,22	15,368	1694,39	0,94
	Стандартное отклонение		-	59,81	1,328	16,84	0,11
	Коэффициент вариации, %		-	8,59	8,641	0,99	9,17
	Доверительный интервал для $\alpha = 0,95$	от	-	14,305	1680,91	0,85	0,85
		до	-	16,430	1707,87	1,04	1,04
3	Среднее значение		45,62	900,48	19,737	1826,50	1,41
	Стандартное отклонение		-	23,84	0,523	17,11	0,16

Продолжение таблицы 2.5

№ испы- тания	Статистические показатели		A_0 , мм ²	F , Н	σ , МПа	E , МПа	ϵ , %
	Коэффициент вариации, %		-	2,65	2,652	0,94	9,66
	Доверительный ин- тервал для $\alpha = 0,95$	от	-	19,318	1812,81	1,28	1,26
		до	-	20,156	1840,19	1,54	1,48
4	Среднее значение		45,36	645,17	14,223	1716,76	0,92
	Стандартное отклонение		-	77,08	1,693	21,07	0,16
	Коэффициент вариации, %		-	8,95	8,901	1,23	9,94
	Доверительный ин- тервал для $\alpha = 0,95$	от	-	12,869	1699,90	0,79	0,79
		до	-	15,578	1733,62	1,04	1,04
5	Среднее значение		45,56	823,25	18,07	1757,93	1,29
	Стандартное отклонение		-	43,18	1,03	25,82	0,23
	Коэффициент вариации, %		-	5,25	5,69	1,48	7,84
	Доверительный ин- тервал для $\alpha = 0,95$	от	-	17,25	1737,27	1,11	1,11
		до	-	18,90	1778,59	1,48	1,48
6	Среднее значение		45,45	819,50	18,03	1752,39	1,18
	Стандартное отклонение		-	27,79	0,61	20,22	0,06
	Коэффициент вариации, %		-	3,39	3,40	1,15	4,76
	Доверительный ин- тервал для $\alpha = 0,95$	от	-	17,54	1736,22	1,13	1,13
		до	-	18,52	1768,57	1,22	1,22
7	Среднее значение		45,58	954,10	20,932	1819,06	1,49
	Стандартное отклонение		-	46,40	1,029	26,65	0,19
	Коэффициент вариации, %		-	4,86	4,914	1,47	9,30
	Доверительный ин- тервал для $\alpha = 0,95$	от	-	20,109	1797,74	1,34	1,31
		до	-	21,755	1840,38	1,64	1,54
8	Среднее значение		44,62	857,48	19,220	1705,90	1,40
	Стандартное отклонение		-	25,98	0,638	22,42	0,09
	Коэффициент вариации, %		-	3,03	3,317	1,31	6,80
	Доверительный ин- тервал для $\alpha = 0,95$	от	-	18,709	1687,96	1,32	1,33
		до	-	19,730	1723,84	1,48	1,44
9	Среднее значение		44,40	791,73	17,633	1697,09	1,13
	Стандартное отклонение		-	19,48	0,471	29,15	0,07
	Коэффициент вариации, %		-	2,46	2,643	1,68	6,34
	Доверительный ин- тервал для $\alpha = 0,95$	от	-	17,255	1673,77	1,08	1,08
		до	-	18,010	1720,42	1,19	1,19

Окончание таблицы 2.5

№ испытания	Статистические показатели		A_0 , мм ²	F , Н	σ , МПа	E , МПа	ε , %
10	Среднее значение		45,35	772,55	17,034	1739,99	1,17
	Стандартное отклонение		-	28,51	0,645	27,37	0,12
	Коэффициент вариации, %		-	3,69	3,787	1,57	9,93
	Доверительный интервал для $\alpha = 0,95$	от	-	16,518	1718,09	1,08	1,08
		до	-	17,551	1761,89	1,26	1,26
11	Среднее значение		45,56	839,15	18,04	1755,09	1,22
	Стандартное отклонение		-	33,41	0,75	23,04	0,06
	Коэффициент вариации, %		-	3,98	4,08	1,30	4,62
	Доверительный интервал для $\alpha = 0,95$	от	-	17,44	1736,65	1,17	1,17
		до	-	18,64	1773,53	1,26	1,26
12	Среднее значение		45,06	911,25	20,222	1805,34	1,43
	Стандартное отклонение		-	33,68	0,740	20,37	0,11
	Коэффициент вариации, %		-	3,70	3,660	1,12	7,87
	Доверительный интервал для $\alpha = 0,95$	от	-	19,630	1789,04	1,34	1,33
		до	-	20,814	1821,64	1,52	1,50

На рисунках 2.10–2.12 представлены графики зависимости прочности, модуля упругости и относительного удлинения от технологических параметров 3D-печати.

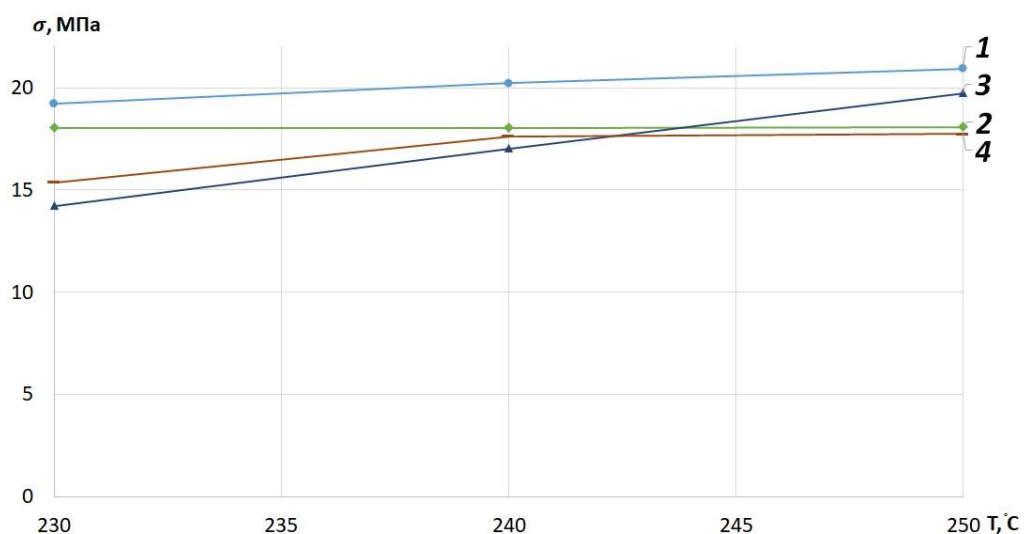


Рисунок 2.10 – Зависимость прочности образца от технологических параметров 3D-печати: 1 – $V=40$ мм/с, $Q=1$ м/с; 2 – $V=50$ мм/с, $Q=1$ м/с; 3 – $V=40$ мм/с, $Q=2$ м/с; 4 – $V=50$ мм/с, $Q=2$ м/с.

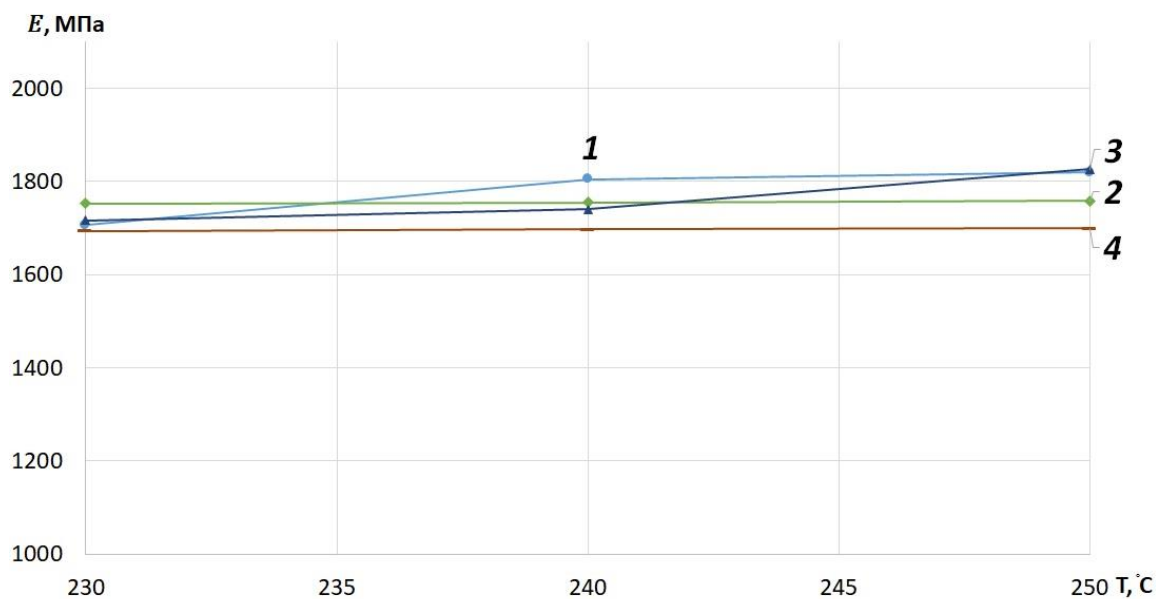


Рисунок 2.11 – Зависимость модуля упругости при растяжении от технологических параметров 3D-печати: 1 – $V=40$ мм/с, $Q=1$ м/с; 2 – $V=50$ мм/с, $Q=1$ м/с; 3 – $V=40$ мм/с, $Q=2$ м/с; 4 – $V=50$ мм/с, $Q=2$ м/с.

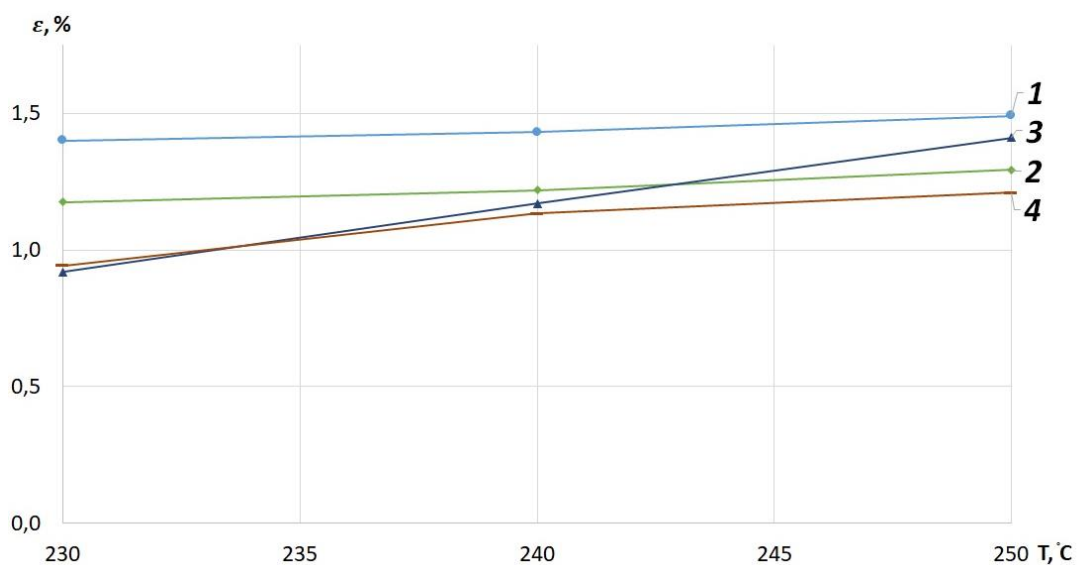


Рисунок 2.12 – Зависимость относительного удлинения при растяжении от технологических параметров 3D-печати: 1 – $V=40$ мм/с, $Q=1$ м/с; 2 – $V=50$ мм/с, $Q=1$ м/с; 3 – $V=40$ мм/с, $Q=2$ м/с; 4 – $V=50$ мм/с, $Q=2$ м/с.

Для построения математических моделей по результатам проведенных экспериментов определяем коэффициенты регрессии по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} \hat{y}_j}{N}. \quad (2.28)$$

Для математических моделей (2.16)–(2.18) получены следующие значения коэффициентов регрессии:

$$b_{10} = 2,879; b_{11} = 0,070; b_{12} = -0,030; b_{13} = -0,067. \quad (2.29)$$

$$b_{20} = 0,194; b_{21} = 0,104; b_{22} = -0,055; b_{23} = -0,095. \quad (2.30)$$

$$b_{30} = 7,462; b_{31} = 0,014; b_{32} = -0,014; b_{33} = -0,008. \quad (2.31)$$

Таким образом получаем следующие математические модели:

$$\hat{y}_1 = 2,879 + 0,070x_1 - 0,030x_2 - 0,067x_3, \quad (2.32)$$

$$\hat{y}_2 = 0,194 + 0,104x_1 - 0,055x_2 - 0,095x_3, \quad (2.33)$$

$$\hat{y}_3 = 7,462 + 0,014x_1 - 0,014x_2 - 0,008x_3. \quad (2.34)$$

Проведем проверку значимости коэффициентов b_i с помощью критерия Стьюдента при величине доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и числе степеней свободы $f = 5$. Табличное значение критерия Стьюдента составляет $t = 2,571$.

Среднеквадратичная ошибка в определении коэффициентов:

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{S^2}{N \cdot N_0}}, \quad (2.35)$$

где $N = 8$ – число точек в матрице эксперимента.

Расчетное значение критерия Стьюдента для каждого из коэффициентов:

$$t_p = \frac{|b_i|}{S_{bi}}. \quad (2.36)$$

Коэффициент b_i значим если:

$$|t_p| > t. \quad (2.37)$$

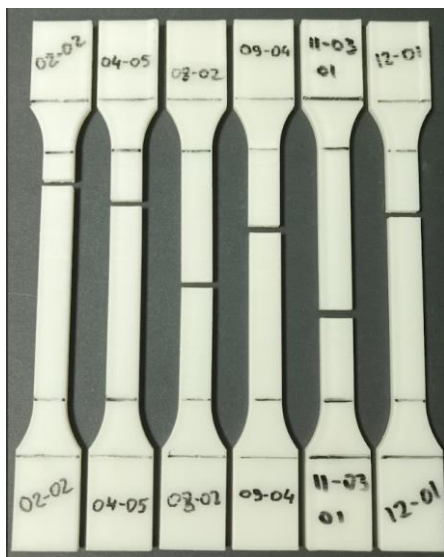
По результатам сравнения по (2.37) можно сделать вывод о том, что все коэффициенты моделей (2.32)–(2.34) являются незначимыми.

Эксперименты, проведенные с образцами из PLA пластика, показали аналогичные результаты.

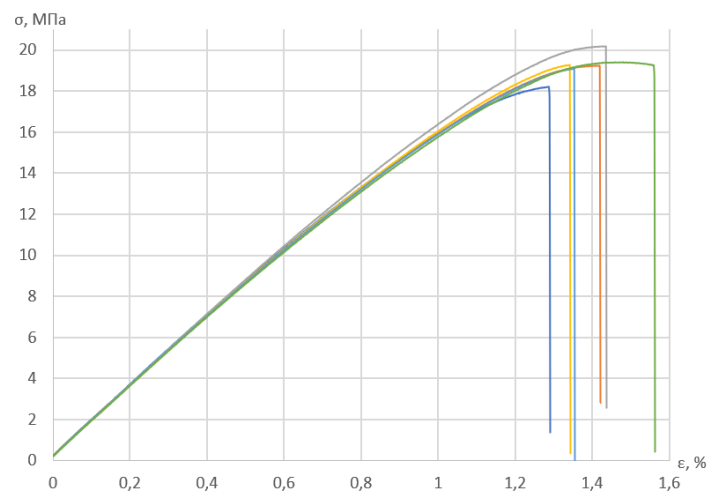
В результате математической обработки результатов эксперимента установлено, что все коэффициенты при технологических параметрах оказались незначи-

мыми и они не оказывают существенного влияния на выходные параметры: прочность, модуль упругости относительное удлинение материала образцов. Следовательно, при назначении режимов 3D-печати изделий достаточно придерживаться рекомендованных диапазонов рассмотренных технологических параметров.

В процессе испытания на растяжение у всех образцов наблюдалось хрупкое разрушение (рисунок 2.13, а). В процессе исследования наблюдался хрупкий излом образцов в их рабочей области (рисунок 2.13, а). Такой характер разрушения связан с ориентацией образцов на платформе построения в процессе 3D-печати и прикладываемой нагрузке перпендикулярно слоям. Также отражение такого характера разрушения можно увидеть на графике, представленном на рисунке 2.13, б. Из графика можно увидеть отсутствие ярковыраженной зоны пластической деформации образцов. Исходя из этого в результатах испытаний учитывались данные по максимальной прочности при растяжении.



а



б

Рисунок 2.13 – Разрушенные образцы после испытания на растяжение (а) и график испытания 6 образцов с отсутствующей зоной пластической деформации (б)

В процессе проведения экспериментов при 3D-печати образцов из ABS пластика были выявлены такие недостатки, как: усадка, деформация образцов из-за неравномерного охлаждения и сложность использования 3D-принтера с открытой

камерой. Все это оказывает негативное влияние на точность и качество изготовления инструмента, поэтому было принято решение для дальнейших исследований из двух ранее выбранных материалов использовать только PLA пластик.

2.3 Исследование влияния ориентации образцов на платформе построения на механические характеристики при сжатии

Основной целью данного исследования было изучение влияния ориентации образцов на платформе построения 3D-принтера на механические характеристики изготовленных образцов.

На основании проведенного анализа литературы было выявлено, что в настоящее время было выполнено относительно небольшое количество исследований связанных со сжатием образцов после 3D-печати по технологии FDM. Также было выявлено, что в существующих стандартах ASTM D695, ISO 604 и ГОСТ 4651, отсутствует регламент проведения испытаний для образцов, полученных с помощью 3D-печати. При этом исследователи применяют в работах вышеперечисленные стандарты и используют следующие методики:

- изготовление образцов геометрическими параметрами отличными от параметров стандартов;
- сжатие образцов с использованием одной ориентации на платформе построения. При испытаниях анизотропных материалов необходимо использовать минимум две разнонаправленные ориентации образцов для выявления всех особенностей материала;
- использование разных технологических параметров 3D-печати, программного обеспечения (слайсер), оборудования. В исследованиях не указываются данные особенности изготовления образцов, что не позволяет выявить закономерности процессов.

В таблице 2.6 представлена информация по стандартам, которые применяли исследователи при испытаниях на сжатие. Из данной таблицы видно, что отличаются не только исследуемые материалы, но и геометрические параметры образцов, что усложняет их выбор.

Таблица 2.6 – Стандарты, формы, габаритные размеры и материалы образцов

Стандарт	Вид образца	Размер образца, мм	Материал	Источ- ник
ASTM D695	Прямоугольная призма	12,7x12,7x25,4	ABS	[112]
ASTM D695	Прямоугольная призма	12,7x12,7x(20-65)	PLA	[109]
ASTM D695	Прямоугольная призма	12,7x12,7x40	PLA	[52]
ASTM D695	Прямоугольная призма	12,5x12,5x25	ABS	[9]
ASTM D695	Прямоугольная призма	12x12x48	PLA	[100]
ASTM D695	Цилиндр	Ø12,7x50,8	ABS, PLA	[75]
ASTM D695	Цилиндр	Ø12,7x25,4	PLA	[57]
ASTM D695	Цилиндр	Ø12,7x25,4	ABS	[84]
ASTM D695	Цилиндр	Ø12,7x25,4	PLA	[93]
ASTM D695	Цилиндр	Ø12,7x25,4	ABS	[69]
ASTM D695	Специальный образец и приспособление	79,4x19x н/д	PLA	[88]
ASTM D695	Прямоугольная призма	н/д	PLA	[91]
ГОСТ 4651	Прямоугольная призма	50x50x50	ABS	[2]
ISO 604	Прямоугольная призма	10x4x50	PLA	[83]
н/д	Цилиндр	Ø11,42x10	PLA	[92]

Анализ данных, приведенных в таблице 2.6 показывает, что большинство исследователей используют разные размеры и форму образцов, а также их ориентацию на платформе построения. Наибольшее распространение получил образец 12,7×12,7×50,8 мм (ASTM D695). Поскольку испытания только в одной ориентации (обычно XYZ) не раскрывают анизотропию, то необходимо проводить испытания при сжатии в трёх ортогональных направлениях (ZXY, YXZ, YZX согласно ГОСТ

Р 59585-2021).

На основании проведенного анализа был выбран образец с высотой 50,8 мм в форме прямоугольной призмы. В качестве стандартных выступали образцы с основанием 12,7x12,7 мм (рисунок 2.14, а), в качестве дополнительных использовались образцы с основанием 10x16,129 мм (рисунок 2.14, б). Дополнительная форма образцов обусловлена возможностью их проверки в трех вариантах расположения на платформе построения.

Испытания проводились в соответствии со стандартом ASTM D695-23.

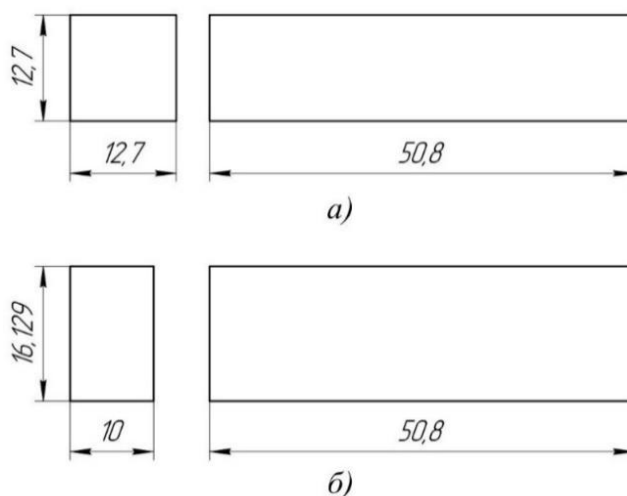


Рисунок 2.14 – Образцы для проведения испытаний на сжатие

Согласно ГОСТ Р 59585-2021 образцы были изготовлены со следующими ориентациями на платформе построения: ZYX, YZX и YXZ. Также согласно стандарту испытания в качестве выходных данных были следующие параметры: модуль упругости (E), прочность на сжатие (σ) и относительная деформация (ϵ). Основные используемые параметры 3D-печати представлены в таблице 2.7.

Перед 3D-печатью образцов была произведена калибровка основных технологических параметров 3D-печати PLA пластика, для сокращения дефектов, возникающих в процессе изготовления и получения образцов высокого качества. В процессе проведения визуального контроля образцов к исследованиям не допускались образцы со следующими дефектами: расслоение, сдвиг слоя, несплошность поверхности, коробление.

Таблица 2.7 – Технологические параметры

Параметр	Значение
Диаметр сопла, мм	0,4
Температура экструзии, °C	240
Температура платформы построения, °C	50
Высота первого слоя, мм	0,20
Высота слоя (основная), мм	0,25
Ширина экструзии	0,4
Количество периметров, шт.	2
Коэффициент потока материала, %	96
Шаблон заполнения	Сетка
Плотность внутреннего заполнения модели, %	100
Угол линий заполнения, °	±45
Степень обдува детали, %	100
Максимальная объемная скорость, мм ³ /с	21

В процессе 3D-печати образцы имели разное расположение на платформе построения 3D-принтера. Ориентации на платформе построения ZYX и YXZ использовались для образцов с номерами 1.1 и 1.2 (рисунок 2.15, а). Ориентации на платформе построения ZYX, YXZ, YZX использовались для дополнительных образцов с номерами 2.1, 2.2 и 2.3 соответственно (рисунок 2.15, б).

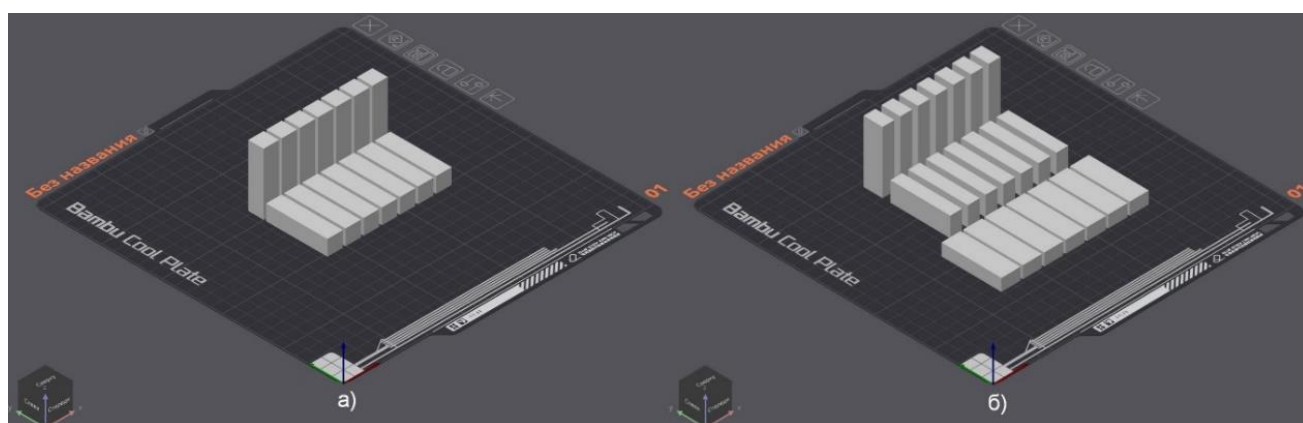


Рисунок 2.15 – Ориентация и номера образцов на платформе построения:

а – 1.1 (ZYX) и 1.2 (YXZ), б – 2.1 (ZYX), 2.2 (YXZ), 2.3 (YZX)

Для каждого отдельного исследования 3D-печать образцов осуществлялась комплектами по 7 образцов, с целью минимизации эффекта перегрева в процессе 3D-печати.

Расположение слоев на образцах после 3D-печати условно представлено на рисунке 2.16.

Исследование на сжатие проводилось на испытательной машине УТС-110М-50-0У при скорости опускания траверсы 5 мм/мин.

Разрушение образцов в процессе испытания не происходило, образцы теряли устойчивость, как упоминается в работе [109], но выпучивания под нагрузкой не происходило.

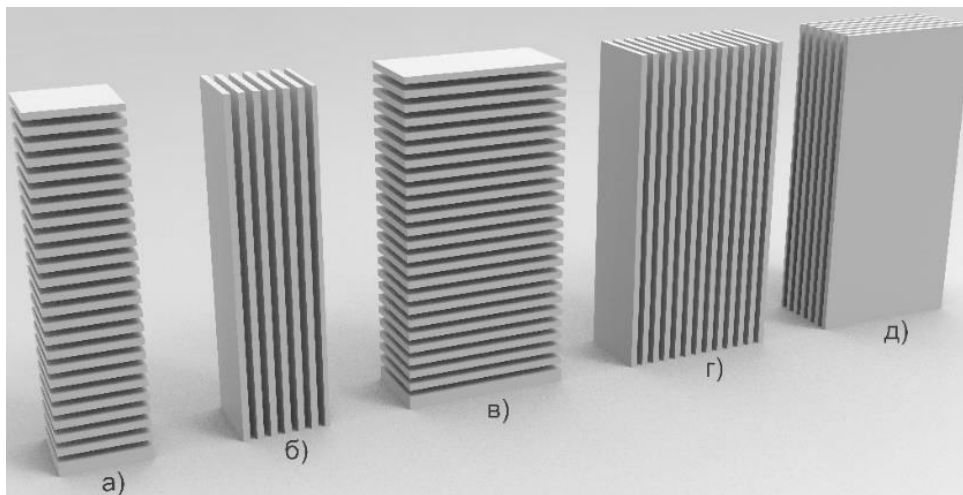


Рисунок 2.16 – Условные расположения слоев на испытуемых образцах.

Номер образца и ориентация: а – 1.1 (ZYX); б – 1.2 (YXZ); в – 2.1 (ZYX);
г – 2.2 (YXZ); д – 2.3 (YZX)

По результатам обработки экспериментальных данных были получены кривые зависимостей «Прочность, МПа – Деформация, %», представленные на рисунках 2.17–2.18. Исходные данные в виде габаритов основания образцов (h , b), длины (L_o), площади поперечного сечения (A_0) и результаты испытаний в виде максимальной сжимающей нагрузки (F), уменьшения расчетной длины образца при максимальном напряжении (L_{om}) приведены в таблице 2.8. Среднее значение, стандартное отклонение, коэффициент вариации и доверительный интервал были рассчитаны по полученным данным и представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.8 – Исходные данные и результаты испытания образцов на сжатие

№	Полож. образца	h , мм	b , мм	L_0 , мм	A_0 , мм ²	F , Н	σ , МПа	$L_{0м}$, мм	ε , %	E , МПа
1.1.1	ZXY	12,88	12,75	50,67	164,22	10903	66,394	3,819	7,5	1980
1.1.2	ZXY	12,9	12,8	50,7	165,12	10772	65,239	2,578	5,1	1960
1.1.3	ZXY	12,89	12,78	50,71	164,734	10859	65,917	2,621	5,2	1950
1.1.4	ZXY	12,91	12,79	50,72	165,119	10922	66,147	2,602	5,1	1960
1.1.5	ZXY	12,93	12,79	50,7	165,375	10818	65,416	2,814	5,6	1920
1.1.6	ZXY	12,78	12,89	50,66	164,734	10900	66,166	2,620	5,2	1973
1.1.7	ZXY	12,88	12,77	50,7	164,478	10795	65,634	2,918	5,8	1909
1.2.1	YXZ	12,65	12,83	50,85	162,3	12457	76,754	2,352	4,6	2304
1.2.2	YXZ	12,65	12,79	50,86	161,794	12519	77,375	2,486	4,9	2279
1.2.3	YXZ	12,66	12,79	50,93	161,921	12381	76,461	2,492	4,9	2292
1.2.4	YXZ	12,66	12,78	50,85	161,795	12613	77,955	2,379	4,7	2315
1.2.5	YXZ	12,65	12,84	50,9	162,426	12655	77,911	2,359	4,6	2321
1.2.6	YXZ	12,75	12,78	50,9	162,945	12458	76,455	2,429	4,8	2289
1.2.7	YXZ	12,8	12,75	50,89	163,2	12725	77,971	2,420	4,8	2307
2.1.1	ZXY	16,16	10,17	50,71	164,347	10867	66,121	2,345	4,6	1983
2.1.2	ZXY	16,16	10,17	50,73	164,347	10677	64,965	2,414	4,8	1961
2.1.3	ZXY	16,16	10,17	50,69	164,347	10952	66,638	2,441	4,8	2000
2.1.4	ZXY	16,16	10,17	50,73	164,347	10970	66,747	2,675	5,3	2003
2.1.5	ZXY	16,17	10,16	50,81	164,287	10841	65,989	2,357	4,6	2006
2.1.6	ZXY	16,17	10,16	50,71	164,287	10990	66,893	2,396	4,7	2006
2.1.7	ZXY	16,09	9,96	50,68	160,256	11316	70,614	2,339	4,6	2115
2.2.1	YXZ	16,08	10,11	50,88	162,569	12427	76,443	2,547	5	2258
2.2.2	YXZ	16,04	10,15	50,92	162,806	12289	75,483	2,401	4,7	2304
2.2.3	YXZ	16,06	10,13	50,95	162,688	12534	77,041	2,502	4,9	2315
2.2.4	YXZ	16,05	10,17	50,92	163,229	12391	75,911	2,474	4,9	2295
2.2.5	YXZ	16,06	10,14	50,92	162,848	12084	74,202	2,446	4,8	2291
2.2.6	YXZ	16,06	10,11	50,87	162,367	12230	75,326	2,564	5	2257
2.2.7	YXZ	16,07	10,16	50,86	163,271	12176	74,578	2,363	4,6	2282
2.3.1	YZX	16,13	9,92	50,84	160,01	12337	77,101	2,313	4,6	2305
2.3.2	YZX	16,13	9,9	50,87	159,687	12500	78,277	2,455	4,8	2332
2.3.3	YZX	16,13	9,92	50,82	160,01	12360	77,242	2,353	4,6	2310
2.3.4	YZX	16,15	9,93	50,87	160,37	12266	76,488	2,288	4,5	2308
2.3.5	YZX	16,15	9,93	50,88	160,37	12433	77,525	2,448	4,8	2301
2.3.6	YZX	16,14	9,94	50,86	160,432	12244	76,318	2,337	4,6	2306
2.3.7	YZX	16,13	9,94	50,86	160,332	12162	75,855	2,341	4,6	2281

Таблица 2.9 – Значения и статистические показатели выходных параметров

№	Статистические показатели		A_0 , мм ²	F , Н	σ , МПа	ε , %	E , МПа
1.1.1-7	Среднее значение		164,93	10844,33	65,753	5,333	1945,730
	Стандартное отклонение		-	59,51	0,386	0,294	25,170
	Коэффициент вариации, %		-	0,55	0,587	5,520	1,294
	Доверительный интервал для $\alpha = 0,95$	от	-	10796,72	65,444	5,098	1925,588
		до	-	10891,95	66,062	5,569	1965,877
1.2.1-7	Среднее значение		162,34	12544,00	77,269	4,757	2301,550
	Стандартное отклонение		-	123,83	0,703	0,127	14,941
	Коэффициент вариации, %		-	0,99	0,910	2,675	0,649
	Доверительный интервал для $\alpha = 0,95$	от	-	12452,27	76,748	4,663	2290,488
		до	-	12635,73	77,790	4,851	2312,626
2.1.1-7	Среднее значение		163,75	10944,71	66,852	4,771	2011,040
	Стандартное отклонение		-	195,39	1,782	0,250	49,063
	Коэффициент вариации, %		-	1,79	2,665	5,235	2,440
	Доверительный интервал для $\alpha = 0,95$	от	-	10799,97	65,532	4,586	1974,696
		до	-	11089,46	68,172	4,956	2047,389
2.2.1-7	Среднее значение		162,83	12304,43	75,569	4,843	2286,340
	Стандартное отклонение		-	156,04	0,997	0,151	22,149
	Коэффициент вариации, %		-	1,27	1,319	3,122	0,969
	Доверительный интервал для $\alpha = 0,95$	от	-	12188,84	74,831	4,731	2269,934
		до	-	12420,02	76,308	4,955	2302,751
2.3.1-7	Среднее значение		160,17	12328,86	76,972	4,643	2306,620
	Стандартное отклонение		-	115,59	0,817	0,113	14,995
	Коэффициент вариации, %		-	0,94	1,062	2,442	0,650
	Доверительный интервал для $\alpha = 0,95$	от	-	12243,23	76,367	4,559	2295,519
		до	-	12414,49	77,578	4,727	2317,737

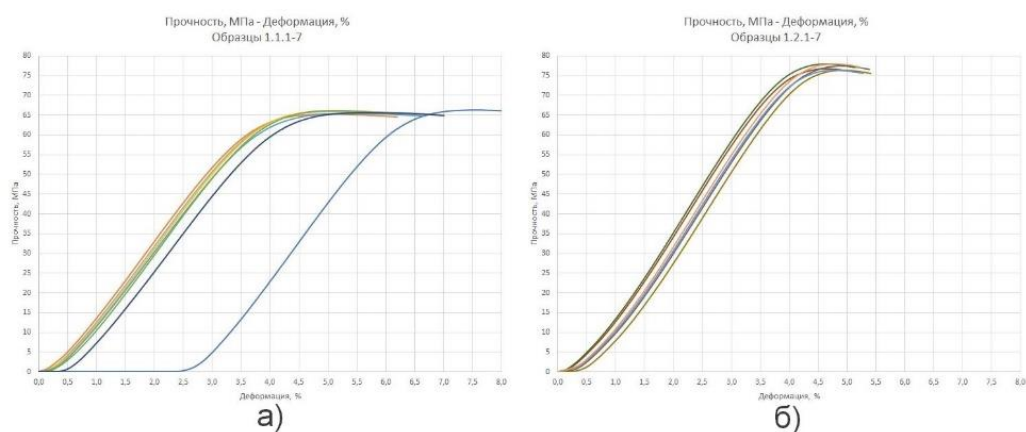


Рисунок 2.17 – График испытаний образцов 1.1 (а) и 1.2 (б)

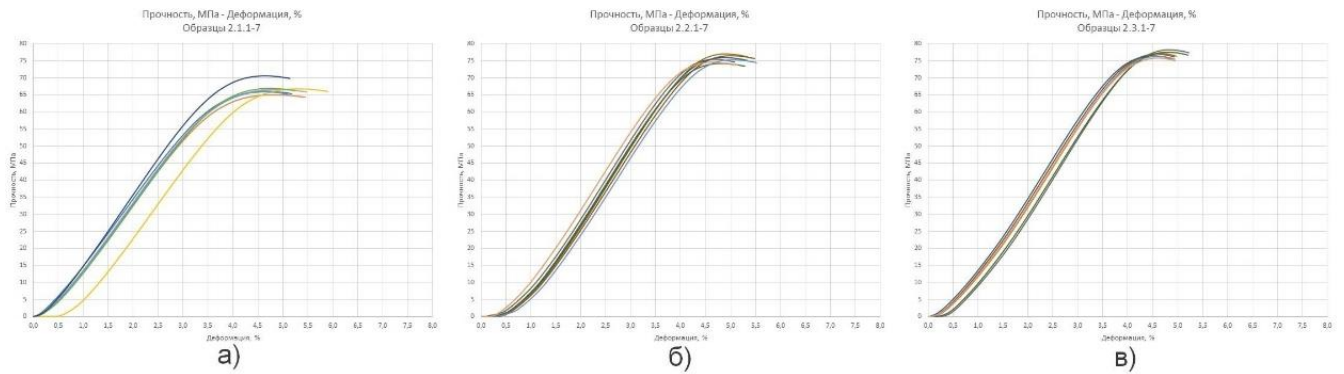


Рисунок 2.18 – График испытаний образцов 2.1 (а), 2.2 (б) и 2.3 (в)

На сравнительном графике с модулем упругости представленном на рисунке 2.19, можно увидеть, что ориентация на платформе построения как для образцов 1.1–1.2, так и для образцов 2.1–2.3, оказывает влияние на прочность при сжатии (разница в результатах составила около 15 %), что подтверждает наличие анизотропии свойств даже при равномерном сжатии. При этом производственный опыт свидетельствует, что при точечном и неравномерном нагружении, характерном для реальной работы матрицы, влияние ориентации может проявляться ещё сильнее. В связи с этим было принято решение о проведении дополнительных экспериментальных исследований непосредственно на матрицах, результаты которых представлены в главе 3.

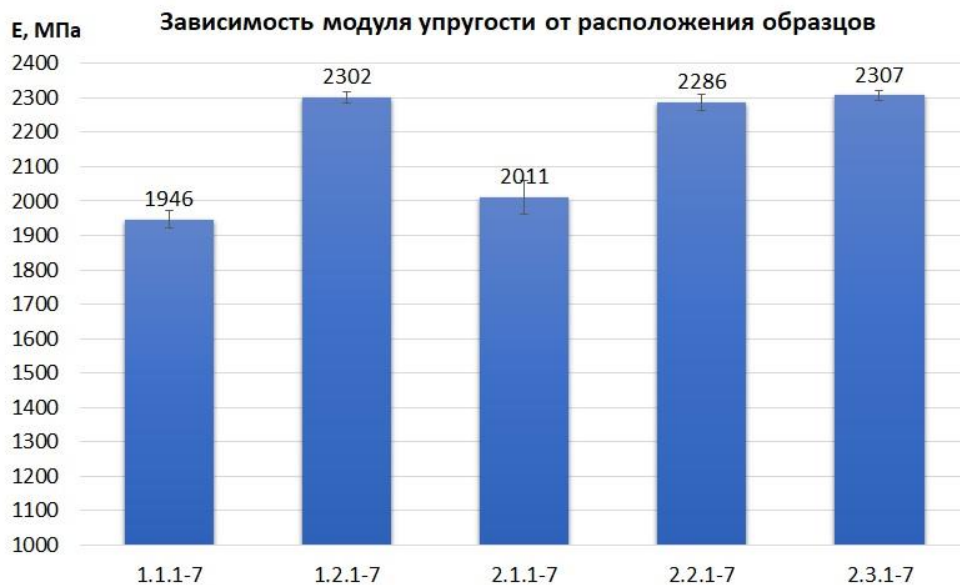


Рисунок 2.19 – Значение модуля упругости для образцов 1.1–1.2 и 2.1–2.3

2.4 Выводы по Главе 2

1. Математическая обработка результатов исследования технологических параметров (температура экструзии, скорость 3D-печати, степень обдува) показала, что данные технологические параметры 3D-печати не оказывают существенного влияния на механические характеристики образцов (прочность, относительное удлинение, модуль упругости), изготовленных с помощью 3D-печати по технологии FDM. Исходя из этого следует, что данные технологические параметры 3D-печати необходимо устанавливать на тех значениях, которые рекомендует производитель материала.

2. В процессе проведения экспериментов при 3D-печати образцов из ABS пластика были выявлены следующие недостатки: усадка, деформация образцов из-за неравномерного охлаждения и сложность использования 3D-принтера с открытой камерой. Все это оказывает негативное влияние на точность и качество изготовления инструмента, поэтому было принято решение для дальнейших исследований из двух ранее выбранных материалов использовать только PLA пластик.

3. Результаты исследования влияния ориентации образцов на платформе построения на механические характеристики при сжатии показали незначительное влияние ориентации при равномерном сжатии. Однако, производственный опыт свидетельствует о том, что при точечной и неравномерной нагрузке поведение напечатанных изделий может отличаться от полученных результатов.

4. Результаты проведенных исследований показали, что результаты испытаний, проведенные на образцах, могут давать неоднозначную информацию по механическим характеристикам материалов из-за отсутствия подходящей геометрической формы и равномерных нагрузок. Для достижения поставленной цели требуется провести экспериментальные исследования непосредственно на напечатанных матрицах.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ГИБКИ ЛИСТОВОЙ СТАЛИ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ МАТЕРИАЛА

С целью проверки влияния технологических параметров 3D-печати на повышение технологической подготовки изготовления инструмента были проведены экспериментальные исследования в следующей последовательности:

1) численное моделирование операции гибки в программе QForm, с целью выявления узлов с максимальными сжимающими (σ_c) и растягивающими средними напряжениями (σ_p) в сечении матрицы;

2) численное моделирование операции гибки в программе QForm и определение влияния радиусов R_1 , R_2 и угла V-образного выреза матрицы на средние напряжения растяжения и сжатия;

3) исследование влияния ориентации матрицы на платформе построения при 3D-печати на прочность в экспериментальном исследовании и сопоставление теоретических результатов с практическими;

4) исследование матриц, изготовленных с разной плотностью внутреннего заполнения в экспериментальном исследовании, и оценка влияния плотности заполнения на прочностные характеристики с целью подтверждения теоретических результатов.

3.1 Исследование напряженного состояния матрицы в процессе свободной гибки с применением численного моделирования

Основная цель исследования матрицы с применением численного моделирования в программе QForm заключается в проверке теоретической схемы нагружения, выявлении зон с наибольшей концентрацией напряжений и подготовке к экспериментальному исследованию.

Стандартная схема нагружения при одноугловой гибке (рисунок 3.1) описана в работе [33]. Для одноугловой гибки характерно наличие стадии свободной гибки в начале выполнения операции; в конце операции выполняется правка и калибровка изогнутого участка листовой заготовки. В данной работе рассматривается только технология свободной гибки. По данной схеме при давлении пунсона (P) на лист нагрузка передается на матрицу и распределяется на 2 контактные точки радиуса (R_2) и создает напряжения (Q). Данные точки являются самыми нагруженными участками матрицы и испытывают сжимающие нагрузки. Также нагруженным участком матрицы является основание V-образного выреза в местах окончания радиуса скругления (R_1), в данном узле создаются растягивающие напряжения (рисунок 3.2).

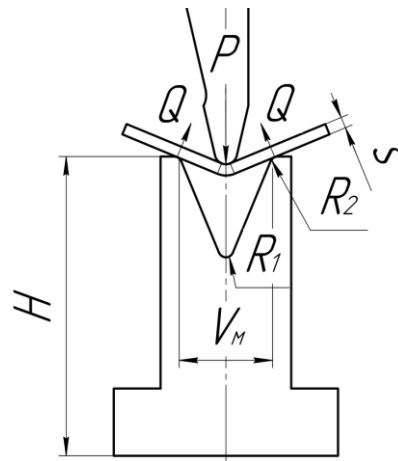


Рисунок 3.1 – Схема нагружения матрицы при одноугловой гибке

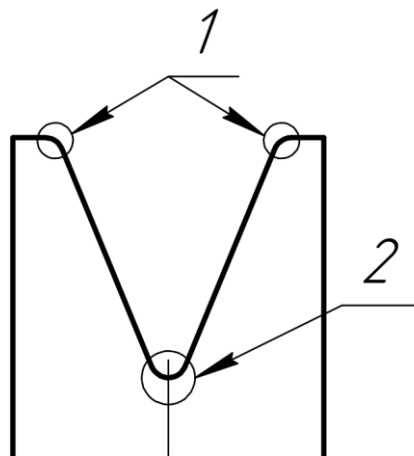


Рисунок 3.2 – Точки с напряжениями в матрице:

1 – сжимающими, 2 – растягивающими.

На первом этапе исследования была подготовлена 3D модель матрицы в программе 3-х мерного моделирования КОМПАС-3D, габаритные размеры матрицы представлены на рисунке 3.3. Ширина основания 60 мм обусловлена стандартной шириной крепления инструмента по типу Amada-Promecam, высота выбрана из типовой линейки матриц, которые можно найти в каталогах компаний производителей. Ширина раскрытия V-образного ручья выбрана исходя из того, что при использовании стандартных стальных матриц на таком раскрытии возможно согнуть стальную заготовку Ст3 толщиной 4 мм. Угол раскрытия 70° V-образного ручья выбран с запасом исходя из гибки стальных образцов на угол 90° .

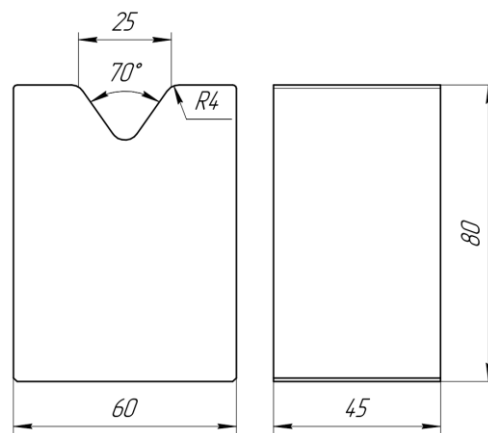


Рисунок 3.3 – Габаритные размеры матрицы

Для численного моделирования в базе данных программы QForm был создан профиль филамента PLA (исходные данные представлены в приложении В). Так как матрица после 3D-печати будет иметь анизотропные свойства, данные будут интерпретироваться согласно механическим характеристикам по паспорту материала от производителя. Согласно паспорту филамента, предел текучести при растяжении равен 31,2 МПа, а предел текучести при сжатии равен 77,4 МПа (таблица 1.2).

Числовое моделирование производилось с гибкой пластин толщинами 1, 2, 3, 4 мм из стали 08кп. Заготовки для гибки представляли собой пластины размером 40x80 мм. Скорость нагружения в процессе гибки составляла 5 мм/с. Данные о сопротивлении деформации стали 08кп соответствуют данным представленным в базе данных деформируемых материалов программы QForm. В качестве меры

оценки напряженного состояния (всестороннее сжатие или всестороннее растяжение) материала инструмента выбрано значение среднего (гидростатического) напряжения, выводимое в программе QForm по результатам моделирования процесса формоизменения.

На рисунках 3.4-3.5 приведены изображения нагружения матрицы с максимальными (средними) напряжениями растяжения и сжатия. По данным изображениям можно увидеть, что все максимальные точки концентраций напряжений сосредоточены на кромках матрицы и в районе основания V-образного выреза, как и предполагала теоретическая схема нагружения. Также при увеличении толщины заготовки нагрузка на данные узлы возрастала.

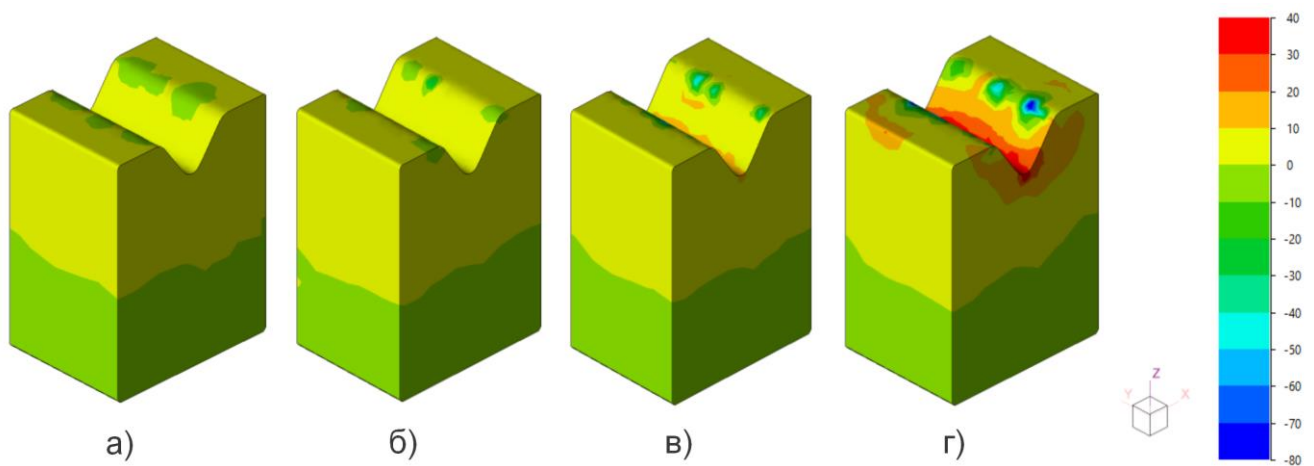


Рисунок 3.4 – Нагружение матриц при гибке заготовок разных толщин:

а) 1 мм; б) 2 мм; в) 3 мм; г) 4 мм. Вид: изометрия

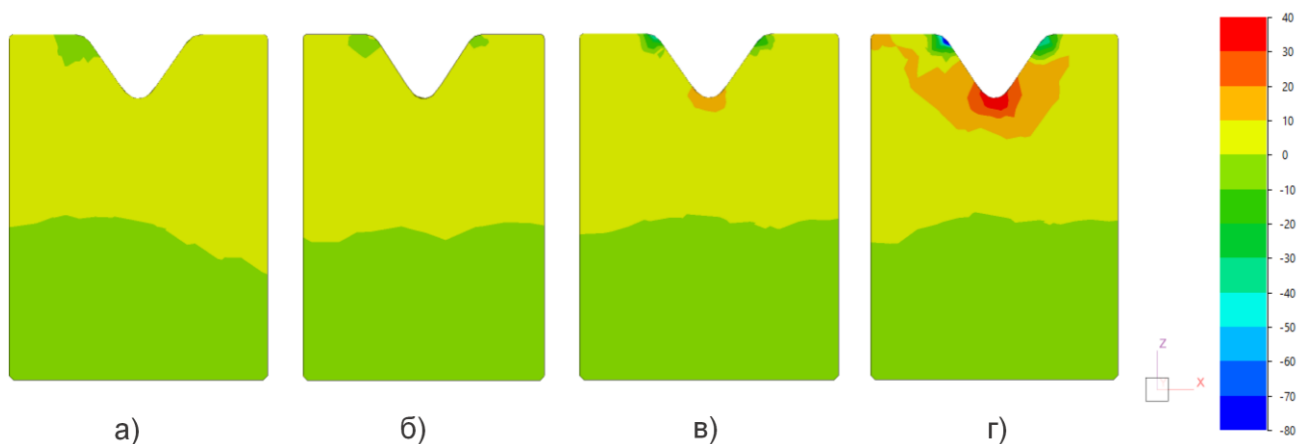


Рисунок 3.5 – Нагружение матриц при гибке заготовок разных толщин:

а) 1 мм; б) 2 мм; в) 3 мм; г) 4 мм. Вид: сечение X-X

Полученные данные по напряжениям растяжения и сжатия в сечении X-X представлены в таблице 3.1 и диаграмме на рисунке 3.6.

Таблица 3.1 – Напряжения растяжения и сжатия в матрице в сечении X-X

Вид нагрузки	Толщина заготовки, мм			
	1	2	3	4
Максимальное (среднее) напряжение растяжения, МПа	3,26	5,86	20,79	48,94
Максимальное (среднее) напряжение сжатия, МПа	11,75	29,36	68,48	143,96

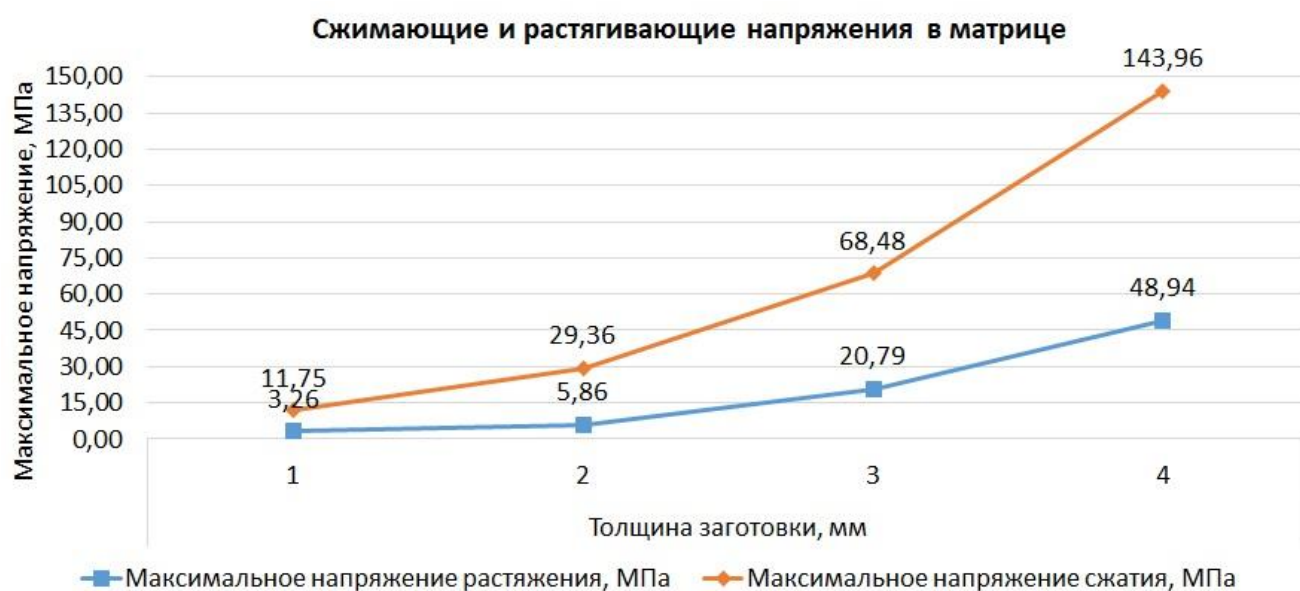


Рисунок 3.6 – Максимальные сжимающие и растягивающие напряжения в матрице

Из полученных результатов по материалу PLA видно, что превышение допустимого значения напряжения растяжения в 31,2 МПа происходит только при гибке стальной заготовки толщиной 4 мм достигнув значения 48,94 МПа. Превышение допустимого напряжения сжатия 77,4 МПа, происходит при гибке стальной заготовки толщиной 4 мм достигнув значения 143,96 МПа.

Данное исследование в программе QForm позволило проверить и подтвер-

дить теоретическую схему нагружения матрицы в процессе гибки. Также исследование показало критические точки, в которых может произойти разрушение матрицы в процессе гибки. Была выявлена разнаправленность напряжений сжатия и растяжения, что потребует проведения экспериментального исследования для выбора наиболее подходящей ориентации матрицы на платформе построения в процессе 3D-печати.

Для проверки возможности снижения напряжений в данных точках за счет изменения радиусов R_1 и R_2 и угла α , потребуется провести исследование с использованием численного моделирования в QForm.

3.2 Исследование влияния геометрической формы матрицы с применением численного моделирования на напряжения растяжения и сжатия

С целью получения данных по тому, как влияют геометрические формы матрицы на ее стойкость были проведены ряд исследований в программе QForm.

Исследования проводились на матрице с габаритными размерами, указанными на рисунке 3.7. Для каждого исследования изменялся угол α , радиусы R_1 и R_2 . В качестве материала для гибки использовалась сталь 08кп с шириной заготовки, 40 мм и толщинами 1-6 мм с шагом 1 мм. Для раскрытия матрицы 25 мм принято считать нормальную нагрузку при гибке заготовок толщины 3 мм, толщина 4 мм считается максимально допустимой, а гибка толщин 5-6 мм считаются недопустимыми, т.к. на большинстве матриц может привести к ее разрушению. Такие толщины заготовок были выбраны исходя из того, чтобы с запасом перекрыть необходимые нагрузки и увидеть то какая будет максимальная и минимальная нагрузка на матрицах.

На первом этапе исследования проверялось изменение угла α V-образного выреза и гибкой заготовок на угол 90° (рисунок 3.8). Из рисунка 3.8 и таблицы 3.2 видно, что только при угле 80° присутствуют повышенные напряжения. От угла 70° к 30° напряжения почти не изменяются. Угол 90° на матрице не рассматривался

и эффект пружинения не исследовался. Рассматривались максимальные растягивающие напряжения в основании V-образного выреза на радиусе R_1 .

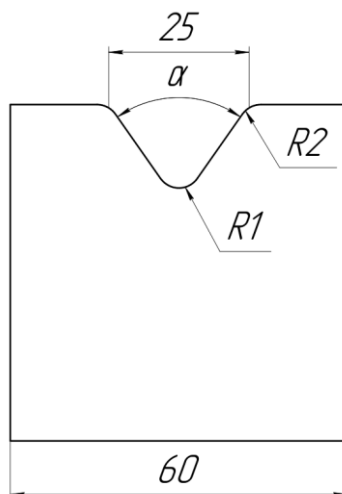


Рисунок 3.7 – Габаритные размеры матрицы

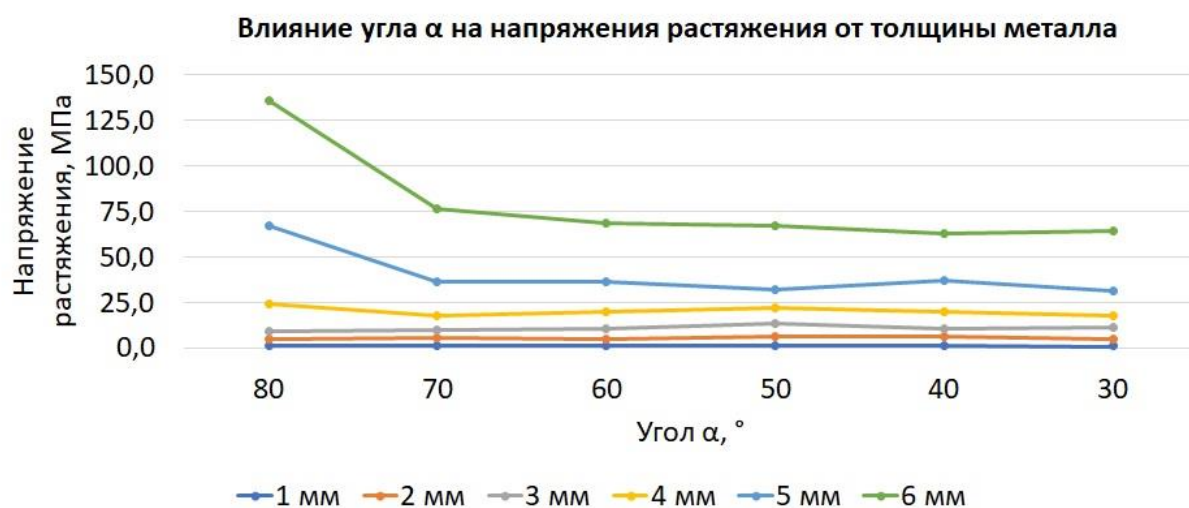


Рисунок 3.8 – Влияние угла α на напряжения растяжения в матрице

Таблица 3.2 – Результаты численного моделирования угла α

Угол α , °	1 мм	2 мм	3 мм	4 мм	5 мм	6 мм
80	1,6	5,2	9,4	24,6	66,9	135,8
70	1,3	5,5	9,9	17,8	36,3	76,3
60	1,5	5,0	11,0	20,0	36,3	68,9
50	1,7	6,1	13,4	22,2	32,1	67,2
40	1,7	6,1	10,8	20,1	36,8	63,1
30	1,2	5,2	11,4	17,6	31,6	64,2

Во втором этапе исследования была проведена проверка влияния радиуса скругления R_1 в основании V-образного выреза матрицы. По результатам из рисунка 3.9 и таблицы 3.3 видно, что растягивающие напряжения понижаются по мере увеличения радиуса R_1 . Проанализировав геометрию стандартных матриц от компаний, приведенных в разделе 1.1, можно увидеть, что для гибки толщин заготовок 5 мм включительно, стандартно используются радиусы R_1 равные 1-3 мм. Согласно полученным результатам, при изготовлении пластиковой матрицы желательно увеличивать радиус скругления для снижения концентраций растягивающих напряжений в матрицах.

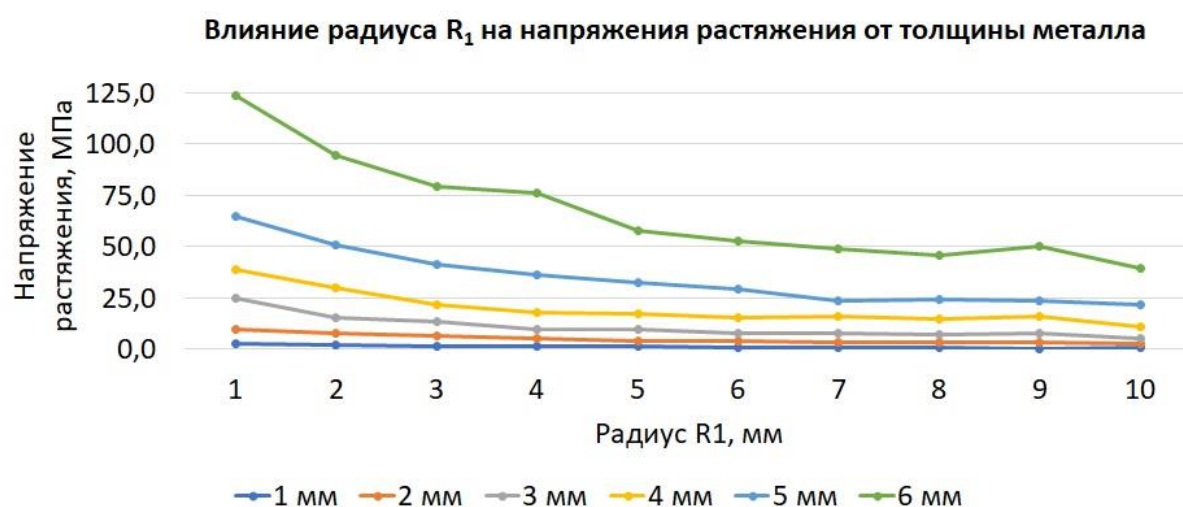


Рисунок 3.9 – Влияние радиуса R_1 на напряжения растяжения в матрице при гибке заготовок различной толщины

Таблица 3.3 – Результаты численного моделирования радиуса R_1

Радиус R_1 , мм	1 мм	2 мм	3 мм	4 мм	5 мм	6 мм
1	3,0	9,7	25,2	39,1	64,7	123,9
2	2,4	7,9	15,6	30,0	50,7	94,3
3	1,8	6,4	13,7	21,9	41,2	79,6
4	1,3	5,5	9,9	17,8	36,3	76,3
5	1,4	4,1	9,7	17,3	32,3	58,0
6	1,2	3,9	8,0	15,8	29,3	52,7
7	1,0	3,5	7,7	16,2	24,0	49,1
8	1,2	3,4	7,4	15,0	24,2	46,0
9	0,4	3,5	8,2	16,3	23,7	50,1
10	0,8	2,8	5,5	11	21,9	39,8

На третьем этапе исследования проводилась проверка влияния изменения радиусов кромок R_2 матрицы, которые контактируют с заготовкой в процессе гибки, на напряжения сжатия материала матрицы. По полученным данным из таблицы 3.4 и рисунка 3.10 видно, что сжимающие напряжения в матрице при увеличении радиуса кромок R_2 снижаются.

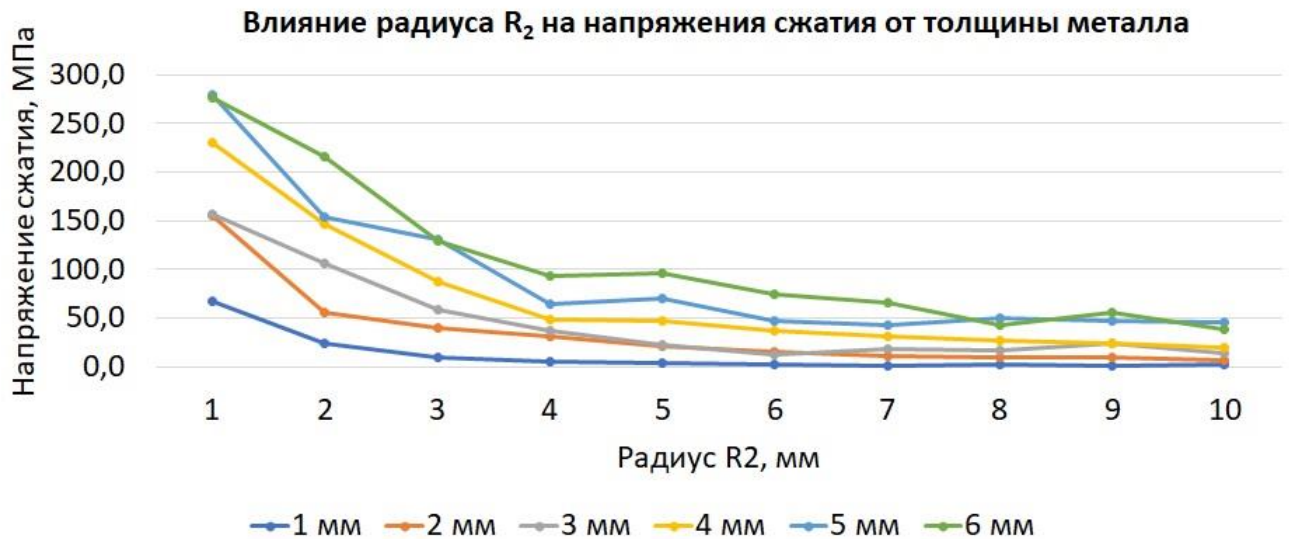


Рисунок 3.10 – Влияние радиуса R_2 на напряжения сжатия при гибке заготовок различной толщины

Таблица 3.4 - Результаты численного моделирования радиуса R_2

Радиус R_2 , мм	1 мм	2 мм	3 мм	4 мм	5 мм	6 мм
1	67,8	154,6	156,8	230,8	278,6	276,9
2	24,4	56,3	105,6	146,0	153,4	216,2
3	9,6	39,7	58,4	87,3	130,3	129,1
4	5,6	30,9	37,0	48,9	63,8	92,5
5	4,0	21,2	21,9	46,6	69,9	95,8
6	2,0	15,5	13,0	37,3	46,9	73,9
7	1,5	10,8	17,4	31,6	42,0	66,3
8	1,6	10,1	16,3	26,8	49,6	43,1
9	1,3	8,8	23,3	24,5	47,5	54,9
10	2,2	6,5	13,6	20,2	44,8	38,8

Проанализировав геометрию стандартных матриц от компаний, приведенных в разделе 1.1, можно увидеть, что для гибки толщин заготовок 1-2,5 мм включи-

тельно, стандартно используются радиусы R_2 равные 0,5-3 мм, для толщин заготовок 3-4 мм – радиусы 3-4 мм, а для толщин 4-5 мм – радиусы 4-5 мм. Зачастую радиусы используются с минимальными значениями от указанных, а согласно полученным результатам, при изготовлении пластиковой матрицы желательно увеличивать радиус скругления для снижения концентраций сжимающих напряжений в матрице.

Исходя из проведенных исследований можно заключить следующее:

1. Углы от 30° до 80° V-образного выреза не оказывает существенного влияния на напряженное состояние матрицы при гибке заготовок толщиной 1-4 мм на угол 90° .
2. Углы от 30° до 70° V-образного выреза не оказывает существенного влияния на напряженное состояние матрицы при гибке заготовок толщиной 5-6 мм на угол 90° . При угле V-образного 80° напряжение возрастает почти в 2 раза.
3. При увеличении радиусов R_1, R_2 растягивающая и сжимающая нагрузка в матрице понижаются. Желательно использовать радиусы R_1, R_2 равные 5 мм и выше. Такое скругление обусловлено тем, что при увеличении R_1 потребуются вносить корректировки по углу α на V-образном вырезе матрицы, а при увеличении радиуса R_2 будет сильно увеличиваться минимальная полка готового изделия. Для дальнейших исследований радиусы R_1, R_2 были приняты 5 мм, чтобы не появлялись технические ограничения на использование матриц.

3.3 Экспериментальное исследование влияния ориентации матрицы на платформе построения при 3D-печати на её прочность

В данном исследовании проверялось влияние ориентации матриц на платформе построения в процессе изготовления на их работоспособность в процессе свободной гибки и сравнение теоретических расчетов с практическими данными.

Для достижения высокого качества 3D-печати матриц, был произведен ряд калибровок технологических параметров для PLA пластика, и установлены их значения, которые не подвергались изменению.

Для изготовления матриц из PLA, были приняты следующие технологические параметры 3D-печати:

- температура экструзии 240 °C;
- температура платформы построения 55 °C;
- высота слоя 0,25 мм;
- плотность внутреннего заполнения 20 %;
- толщина внешних стенок 5,2 мм.

К качеству образцов при визуальном контроле предъявлялись следующие требования:

- целостность конструкции и отсутствие расслоений и смещений слоев;
- отсутствие пористости и несплошности из-за недоэкструзии;
- отсутствие термической деформации и изменения геометрии.

Из-за наличия анизотропии в деталях, изготовленных с помощью 3D-печати, по ГОСТ Р 59585-2021 были выбраны три ориентации на платформе построения 3D-принтера для изготовления матриц: YZX, ZXY и XZY.

Слои на матрице с ориентацией YZX, располагались параллельно прилагаемой нагрузке с осью нагружения перпендикулярно слоям. На матрице ZXY слои располагались перпендикулярно прилагаемой нагрузке. На матрице XZY слои были расположены параллельно прилагаемой нагрузке с осью нагружения параллельно слоям.

В качестве основных заготовок для гибки использовалась сталь 08пс толщиной 1, 2, 3 мм и сталь Ст3пс толщиной 4 мм. При появлении деформаций или трещин на матрице в процессе испытания, матрица считалась непригодной для дальнейшего использования.

На рисунке 3.11 представлены расположения матриц на платформе построения в слайсере.

Заготовки для гибки имели габаритные размеры 40x80 мм и были изготовлены с помощью лазерной резки. К геометрии заготовок после гибки предъявлялось требование по углу гибки – $90 \pm 1^\circ$. В случае отклонения от заданного угла, в управле-

ющую программу листогибочного станка вносилась корректировка для достижения необходимого результата. Данная настройка производилась на 2-3 стальных заготовках и в последующем выполнялась гибка 10 заготовок. Такой процесс калибровки и гибки использовался для каждой из трех матриц.

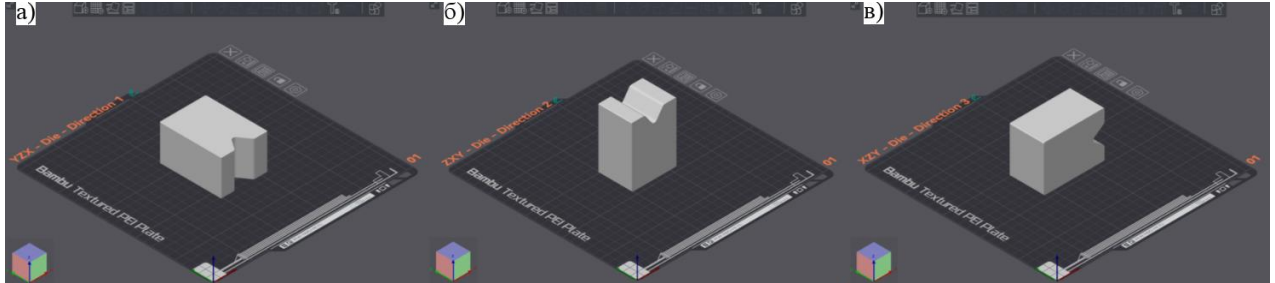


Рисунок 3.11 – Варианты расположения матриц на платформе построения.

Ориентация: а – YZX, б – ZXY, в – XZY

Гибка заготовок осуществлялась на листогибочном прессе Durma AD-S 30135 с ЧПУ Delem DA-66T. Перед началом исследования матрица была внесена в базу данных станка и созданы управляющие программы для гибки образцов с разной толщиной.

На рисунке 3.12 визуальное представлено как располагались слои на изготовленных матрицах.



Рисунок 3.12 – Направления слоев в матрицах:

слева – YZX, по центру – ZXY, справа – XZY

Первой тестировалась матрица YZX. При гибке заготовок толщиной 1 и 2 мм повреждения не были выявлены. В процессе гибки заготовки толщиной 3 мм была

зафиксирована деформация матрицы в районе радиуса R_2 в местах установки стальной заготовки (рисунок 3.13). Деформации в виде продавливания и трещин произошли по границам слоев в районе рабочих кромок матрицы.

Второй тестировалась матрица с ориентацией ZXY. В процессе гибки заготовок толщиной 1-3 мм повреждения матрицы не происходило. Разрушение матрицы произошло при гибке заготовки толщиной 4 мм (рисунок 3.14). Деформация с последующим разрушением матрицы произошло в районе радиуса R_2 .

Третья матрица с ориентацией XZY разрушилась в процессе гибки заготовки толщиной 2 мм. Расслоение с последующим разрушением произошло вдоль слоев в районе радиуса R_1 (рисунок 3.15).

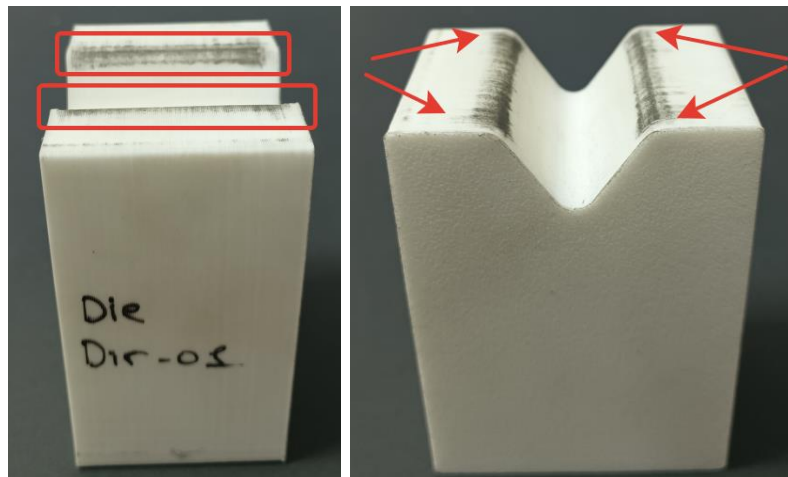


Рисунок 3.13 – Деформация матрицы с ориентацией YZX

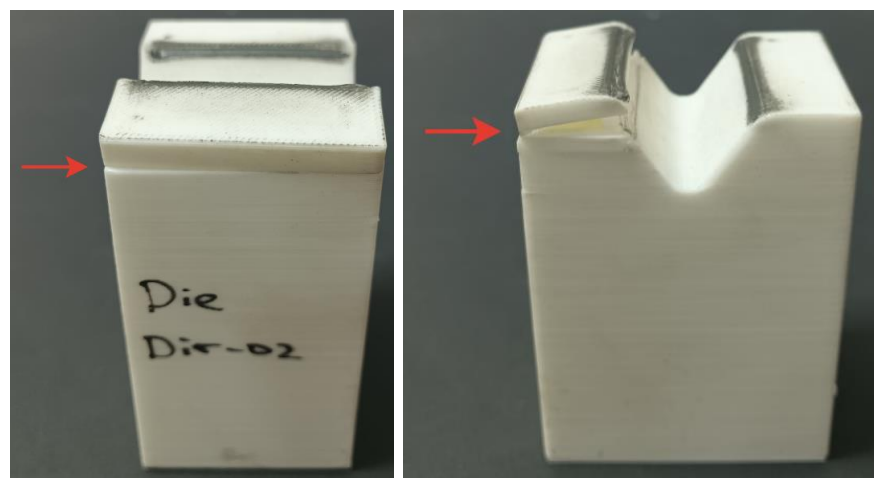


Рисунок 3.14 – Разрушение матрицы ZXY при гибке образца из стали толщиной 4 мм

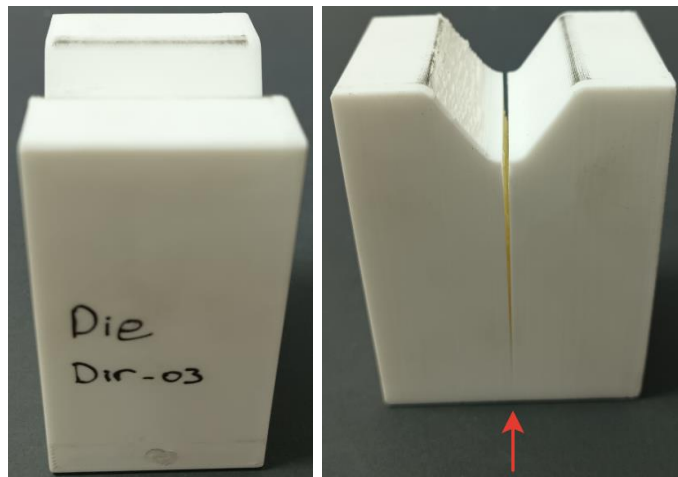


Рисунок 3.15 – Разрушение матрицы XZY при гибке образца толщиной 2 мм

В таблице 3.5 и на рисунках 3.16–3.18 представлены результаты испытаний матриц с различной ориентацией на платформе построения.

Таблица 3.5 – Максимальная сила гибки на матрицах с различной ориентацией на платформе построения

Ориентация матриц	Максимальная сила гибки, т/м		
	Толщина образца из стали, мм		
	1	2	3
ZXY	2,56	10,22	23,00
YZX			-
XZY		-	-

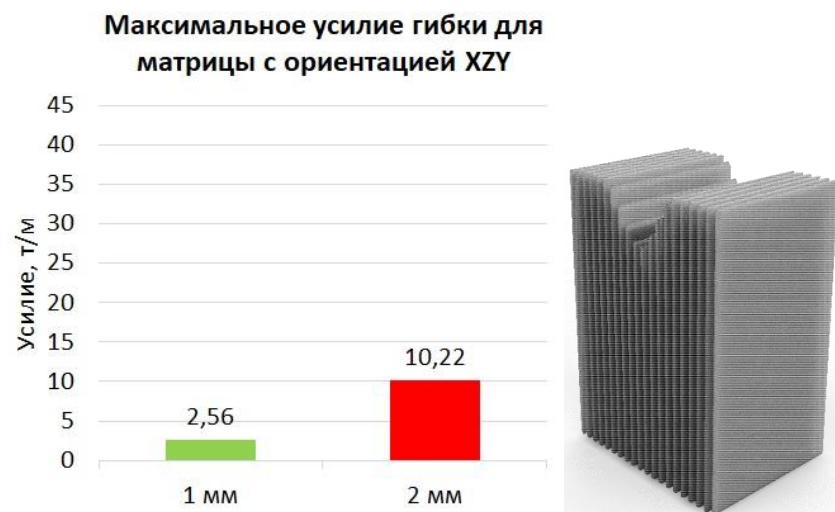


Рисунок 3.16 – Максимальная сила гибки для матрицы XZY

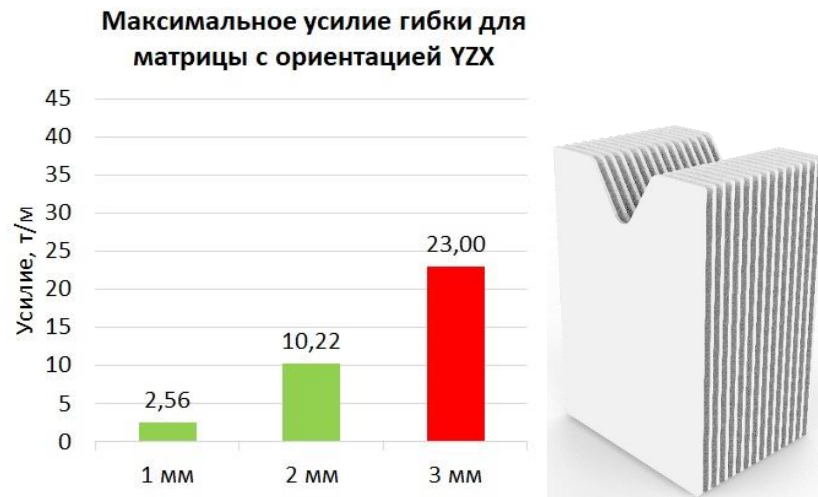


Рисунок 3.17 – Максимальная сила гибки для матрицы YZX

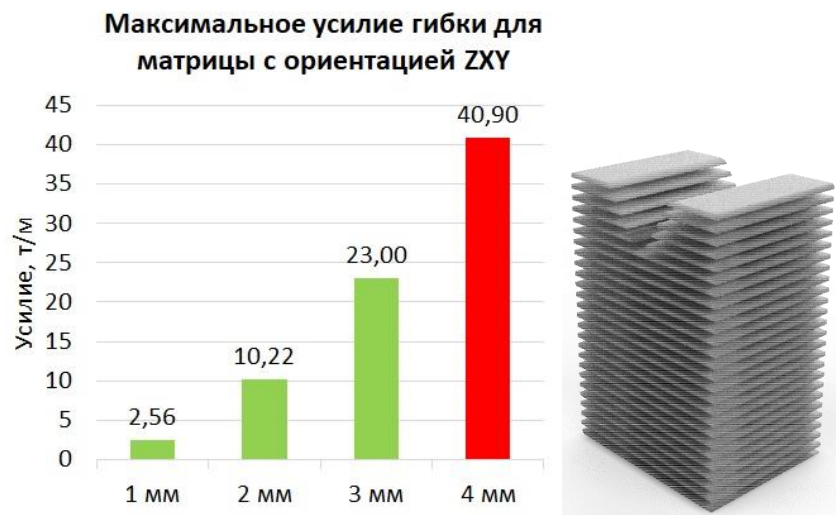


Рисунок 3.18 – Максимальная сила гибки для матрицы ZXY

Экспериментальное исследование подтвердило, разрушение матриц происходило как в теоретической схеме нагружения в точках с максимальными напряжениями растяжения и сжатия в сечении X-X (таблица 3.1). Также можно увидеть, что программа QForm не позволяет выполнить корректный расчет для матриц, в которых направление слоев оказывает существенное влияние на стойкость, к ним относятся матрицы с расположением YZX и XZY на платформе построения. Это обусловлено тем, что материал в программе QForm принимается сплошным. Наличие у матрицы слоистой структуры, ориентация которой не совпадает с направлением приложения силы деформирования, приводит к тому, что точно задать модель инструмента в программе QForm достаточно сложно и выходит за рамки данной

диссертационной работы. Наиболее схожие данные по теоретическому и практическому исследованию получились для матрицы ZXY, где слои перпендикулярны нагружению.

По экспериментальному исследованию матриц можно заключить, что 3D-печать матриц и их использование в операциях гибки возможна и ориентация на платформе построения оказывает существенное влияние на прочностные характеристики матрицы. Также следует выбирать ориентацию 3D-печати таким образом, чтобы нагрузка на матрицу приходилась перпендикулярно слоям (ориентация ZXY), при невозможности такого расположения слоев, следующей по эффективности ориентацией при 3D-печати является расположение слоев параллельно нагружению (ориентация XZY), но повернутое на 90 градусов относительно линии нагружения (рисунок 3.19).

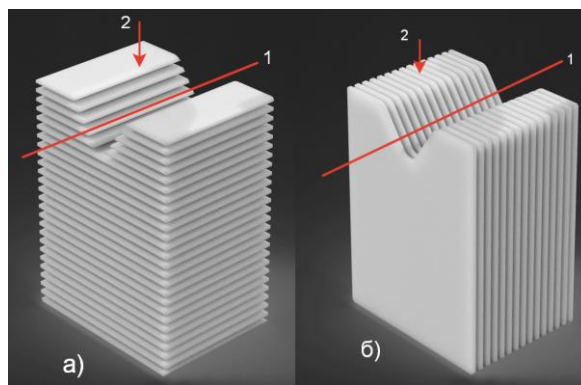


Рисунок 3.19 – Матрица: а – ZXY, б – YZX;

1– линия нагружения; 2– направление нагрузки

3.4 Экспериментальное исследование влияния плотности внутреннего заполнения на прочностные характеристики инструмента для свободной гибки

Объединив все полученные результаты из предыдущих разделов для последнего экспериментального исследования, была спроектирована матрица, представленная на рисунке 3.20. В исследовании проверялась возможность изготовления матриц с неполным внутренним заполнением с целью выявления возможности более

быстрого изготовления матриц и использования меньшего количества материала.

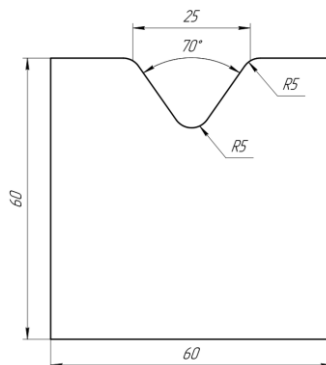


Рисунок 3.20 – Эскиз матрицы

Были изготовлены матрицы с плотностью внутреннего заполнения 10, 20, 40, 60, 80 и 100 % (рисунок 3.21).

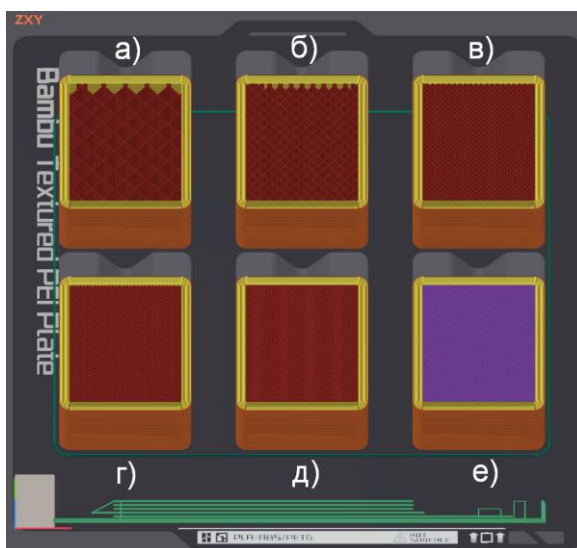


Рисунок 3.21 – Внутреннее заполнение матриц:

а – 10 %, б – 20 %, в – 40 %, г – 60 %, д – 80 %, е – 100 %

Возможность использования матриц с неполным внутренним заполнением, может позволить сократить время изготовления матриц и расход материала (таблица 3.6). Тип внутреннего заполнения «Сетка». Ориентация матрицы на платформе построения ZXY (нагрузка перпендикулярна слоям).

Длина металлических образцов для гибки была 40 мм, образцы были изготовлены с помощью лазерной резки. Чтобы гибка происходила на матрице в местах, где есть неполное заполнение, матрицы были изготовлены длиной 70 мм, со сплошной толщиной стенок 5 мм по всему контуру.

Таблица 3.6 – Время изготовления и расхода материала при изготовлении матрицы с разным внутренним заполнением

Параметр	Внутреннее заполнение матрицы, %					
	10	20	40	60	80	100
Время изготовления, ч	2,55	2,83	3,32	3,75	4,30	4,68
Расход материала, г	139	156	187	217	250	282

Для проверки возможности гибки разных материалов, плавного увеличения силы гибки и напряжений в матрицах были использованы следующие материалы: АМгЗМ, 08пс, СтЗсп, AISI 304 (08Х18Н10). Расчет силы гибки производился по формуле 3.1.

$$\frac{K_1 \cdot s^2 \cdot R_m \cdot L}{1000 \cdot V_m}, \text{ Т} \quad (3.1)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий трение заготовки о кромки матрицы, равный 1,42;

s – толщина металлической заготовки, мм;

R_m – расчетное значение временного сопротивления металлов, кг/мм² (таблица 3.7);

L – длинагиба, мм;

V_m – ширина раскрытия матрицы, мм.

Как можно увидеть из формулы 3.1 силу гибки можно повышать и понижать с помощью ширины раскрытия матрицы, чем шире раскрытие, тем меньшее сила деформирования потребуется и наоборот. Можно сказать, что при подборе необходимой матрицы, ширина раскрытия одна из самых важных характеристик, так как она отвечает за сохранность инструмента, его правильную эксплуатацию и формирование внутреннего радиусагиба на детали. При использовании стандартных матриц из каталогов компаний производителей, рядом с матрицей всегда указывается максимальная возможная нагрузка на инструмент в т/м или кН/м, рассчитанная по формуле 3.1.

Таблица 3.7 – Справочные данные по расчетному значению временного сопротивления (R_m), для различных металлов

№	Марка материала	Расчетное значение временного сопротивления (R_m), кг/мм ²
1	08пс [35]	41
2	Ст3сп [13]	45
3	AISI 304 (08X18H10) [13]	53
4	АМгЗМ [13]	24
5	Л63 [13]	46
6	М1 [13]	26

Результаты расчета силы гибки для гибки образцов из разных материалов и толщин представлены в таблице 3.8 и на рисунке 3.22. Толщина металла взята как теоретическая, т.к. фактически листовой металл может быть тоньше. Перед гибкой образцов замерялась фактическая толщина металла.

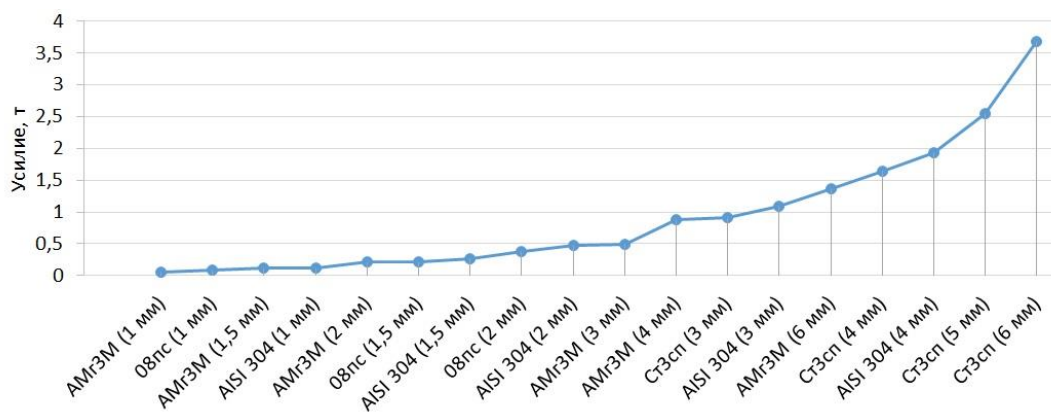


Рисунок 3.22 – Сила гибки в зависимости от используемых материалов и толщины заготовки

Гибка образцов происходила поочередно на каждой матрице и осуществлялась по очереди с увеличением силы деформирования согласно графику на рисунке 3.22. Перед началом гибки производилась калибровка углагиба до 90°, для этого использовались 2-3 образца. После калибровки осуществлялась гибка образцов в количестве 5 шт. на каждую матрицу.

Таблица 3.8 – Расчетные теоретические значения силы гибки

Материал	Толщина (теоретическая), мм	Сила гибки ($L=40$ мм), т	Сила, т/м
АМг3М	1	0,05	1,10
08пс	1	0,09	2,33
АМг3М	1,5	0,12	2,71
AISI 304 (08X18H10)	1	0,12	3,01
АМг3М	2	0,22	4,82
08пс	1,5	0,21	5,24
AISI 304 (08X18H10)	1,5	0,27	6,77
08пс	2	0,37	10,27
AISI 304 (08X18H10)	2	0,48	11,45
АМг3М	3	0,49	11,31
АМг3М	4	0,87	20,95
Ст3сп	3	0,92	23,00
AISI 304 (08X18H10)	3	1,08	27,09
АМг3М	5	1,36	33,40
Ст3сп	4	1,64	38,88
AISI 304 (08X18H10)	4	1,93	48,17
Ст3сп	5	2,56	61,37
Ст3сп	6	3,68	88,67

В ходе испытания матрицы с заполнением 80 и 100 % не разрушились, но получили значительную деформацию (продавливание) по границам гибки образцов (рисунок 3.23). Разрушение матриц с заполнением 10-60 % происходило в области V-образного выреза в начале радиуса R_1 (рисунок 3.23).

Начиная с силы гибки 38,88 т/м (возникало при гибке заготовки из материала Ст3сп толщиной 4 мм) на матрицах начали появляться следы продавливания по границе гибки образцов, но разрушение при этом не происходило. Также начиная с этого материала требовалось вводить большие поправки на уголгиба (до 10°), так как изгиб калибровочных образцов был меньше угла в 90° , при использовании стальных матриц такого сильного эффекта не было замечено. Данный эффект не

связан с пружинением металлов, а связан с тем, что пластик более пластичен и в процессе гибки возникает упругая деформации. Упругую деформация можно было увидеть при использовании матриц с разной степенью заполнения, чем меньше была степень заполнения, тем больше требовалась корректировать уголгиба.

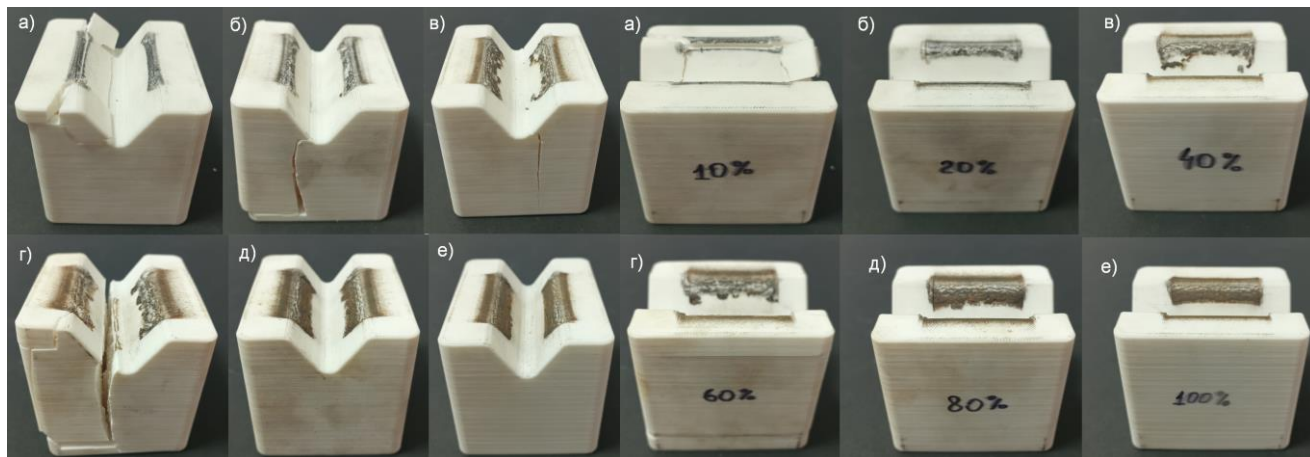


Рисунок 3.23 – Матрицы после испытаний:

а – 10%, б – 20%, в – 40%, г – 60%, д – 80%, е – 100%

Результаты с последовательностью испытаний представлены в таблице 3.9. На рисунке 3.24 представлена матрица со 100 % внутренним заполнением после испытания и количество согнутых на ней образцов из металла.

Дополнительным положительным эффектом от использования пластиковых матриц является отсутствие следов гибки (вмятин от матрицы), как это проявляется при гибке на стальных матрицах.



Рисунок 3.24 – Матрица со 100 % внутренним заполнением и согнутые на ней образцы металла

Примеры гибки заготовок из различных материалов на пластиковых матрицах представлены на рисунках 3.25–3.27. При отсутствии следов гибки не требуется использовать защитную полиуретановую пленку или дополнительную механическую обработку после операции гибки.



Рисунок 3.25 – Место контакта заготовки из Амг3М с матрицей



Рисунок 3.26 – Место контакта заготовки из AISI 304 с матрицей

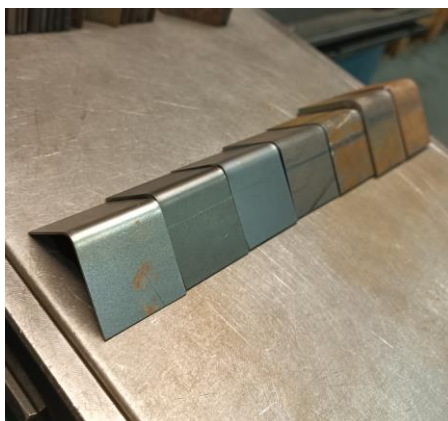


Рисунок 3.27 – Место контакта заготовок из Ст3 и 08пс с матрицей

Таблица 3.9 – Предельные значения силы гибки для матриц с плотностью заполнения от 10 до 100 %

Материал	Толщина (факт.), мм	Сила гибки (L=40 мм) (факт), т	Сила (факт), т/м	Внутреннее заполнение матрицы, %					
				10	20	40	60	80	100
АМгЗМ	0,9	0,04	1,10	+	+	+	+	+	+
08пс	1	0,09	2,33	+	+	+	+	+	+
АМгЗМ	1,41	0,11	2,71	+	+	+	+	+	+
AISI 304 (08Х18Н10)	1	0,12	3,01	+	+	+	+	+	+
АМгЗМ	1,88	0,19	4,82	+	+	+	+	+	+
08пс	1,5	0,21	5,24	+	+	+	+	+	+
AISI 304 (08Х18Н10)	1,5	0,27	6,77	+	+	+	+	+	+
08пс	2,1	0,41	10,27	+	+	+	+	+	+
AISI 304 (08Х18Н10)	1,95	0,46	11,45	+	+	+	+	+	+
АМгЗМ	2,88	0,45	11,31	+	+	+	+	+	+
АМгЗМ	3,92	0,84	20,95	+	+	+	+	+	+
СтЗсп	3	0,92	23,00	+/-	+/-	+	+	+	+
AISI 304 (08Х18Н10)	3	1,08	27,09	+/-	+/-	+/-	+	+	+
АМгЗМ	4,95	1,34	33,40	-	+/-	+/-	+/-	+	+
СтЗсп	3,9	1,56	38,88	-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-
AISI 304 (08Х18Н10)	4	1,93	48,17	-	-	+/-	+/-	+/-	+/-
СтЗсп	4,9	2,45	61,37	-	-	-	+/-	+/-	+/-
СтЗсп	5,89	3,55	88,67	-	-	-	-	+/-	+/-
«+» - Матрица выдерживает нагрузку									
«+/-» - Матрица деформируется, но выдерживает нагрузку;									
«-» - Матрица разрушилась.									

При таких полученных результатах двух проведенных испытаний на напечатанных матрицах в условиях производства, можно сделать следующие выводы:

1. Ориентир по допустимой нагрузке на матрицу необходимо установить по расчетному значению силы гибки.
2. Снижение напряжений сжатия и растяжения в матрице возможно при увеличении радиусов скругления.
3. Для радиуса R_1 необходимо закладывать минимальное значение в 5 мм. При большем потребуются вносить корректировки по углу α на V-образном вырезе матрицы.
4. Для радиуса R_2 необходимо устанавливать минимальное значение в 5 мм. При большем значение будет сильно увеличиваться минимальная полка готового изделия. Также использование увеличенного радиуса необходимо для повышения износостойкости рабочих кромок, при использовании стандартных небольших радиусов будет происходить сильный износ.
5. При расчете значения силы гибки необходимо закладывать коэффициент запаса прочности 1,5.
6. В настоящий момент времени невозможно провести численное моделирование в программе QForm напечатанных по технологии FDM матриц так, чтобы можно было учесть их неполное внутреннее заполнение и различное направление слоев печати.
7. Использование неполного внутреннего заполнения дает прирост к скорости изготовления и сокращению расхода материала при изготовлении инструмента для свободной гибки с применением 3D-печати.

3.5 Выводы по Главе 3

1. Проведенное численное моделирование матриц в программе QForm подтвердило теоретическую схему нагружения матриц при свободной гибки. Также были выявлены области с наибольшими средними напряжениями сжатия и растяжения, что говорит о разнонаправленности напряжений в матрице.

2. Углы V-образного выреза от 30° до 80° не оказывают существенного влияния на напряженное состояние матрицы в процессе гибки заготовок толщиной 1-4 мм на угол 90° . V-образный вырез с углами от 30° до 70° не оказывает существенного влияния на напряженное состояние матрицы в процессе гибки заготовок толщиной 5-6 мм на угол 90° . При угле V-образного 80° напряжение возрастает почти в 2 раза.

3. Для радиуса R_1 необходимо закладывать минимальное значение в 5 мм. При большем потребуются вносить корректировки по углу α на V-образном вырезе матрицы.

4. Для радиуса R_2 необходимо устанавливать минимальное значение в 5 мм. При большем значение будет сильно увеличиваться минимальная полка готового изделия. Также использование увеличенного радиуса необходимо для повышения износостойкости рабочих кромок, при использовании стандартных небольших радиусов будет происходить сильный износ.

5. Ориентация матрицы на платформе построения в процессе 3D-печати оказывает существенное влияние на ее прочность. Матрицу при 3D-печати следует располагать в положении ZXY (слои перпендикулярны направлению силы гибки) или если это невозможно располагать в положении YZX (слои параллельны нагружению, но повернуты на 90 градусов относительно линии нагружения). Положение XZY использовать нельзя.

6. Внутренне заполнение матрицы оказывает влияние на ее прочность. Используя разную плотность внутреннего заполнения, можно более эффективно использовать матрицу, экономить материал при ее изготовлении и сокращать время производства.

7. Ориентир по допустимой нагрузке на матрицу необходимо устанавливать по расчетному значению силы гибки.

ГЛАВА 4. АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ

На основании ранее проведенных исследований были получены коэффициент K_3 и уточнена стандартная формула расчета силы гибки учитывающая плотность внутреннего заполнения матрицы и коэффициент запаса прочности. Также была проведена апробация матрицы в условиях производства и произведен экономический расчет себестоимость изготовления матриц.

4.1 Инженерная методика: проектирование матрицы по заданной силе гибки

На основании проведения испытания из раздела 3.4 точкой отсчета взята матрица со 100 % заполнением и максимальной силойгиба равной 33,4 т/м (АМгЗМ, 4,95 мм), при котором не происходит деформация и разрушение. Другие максимальные усилия гибки при разной плотности внутреннего заполнения матриц:

1. 80 % – 33,40 т/м, материал АМгЗМ, толщина 4,95 мм;
2. 60 % – 27,09 т/м, материал AISI 304 (08Х18Н10), толщина 3,00 мм;
3. 40 % – 23,00 т/м, материал СтЗсп, толщина 3,00 мм;
4. 20 % – 20,95 т/м, материал АМгЗМ, толщина 3,92 мм;
5. 10 % – 20,95 т/м, материал АМгЗМ, толщина 3,92 мм.

Для безопасной эксплуатации матриц в условиях производства также принят коэффициент запаса прочности $K_2=1,5$. Исходя из данного коэффициента максимальная нагрузка на матрицу (P_{max}) со 100% внутренним заполнением должна составлять не более 22,3 т/м:

$$P_{max} = 33.4 \div K_2 = 22.3, \text{ т/м.} \quad (4.1)$$

На основании экспериментальных данных были выведены коэффициенты уточнения допустимой силы гибки K_3 при плотности внутреннего заполнения <100%, которые учитывают различные значения плотности внутреннего заполнения (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Коэффициент уточнения допустимой силы гибки при плотности внутреннего заполнения <100 % (по экспериментальным данным)

	Заполнение, %					
	100	80	60	40	20	10
K_3	1	1	0,81	0,69	0,62	0,62

Для корректного сопоставления расчета силы гибки в формуле 3.1 длина заготовки (L) заменена на 1000 мм, для получения силы гибки сразу в т/м:

$$P = \frac{K_1 \cdot s^2 \cdot R_m \cdot 1000}{1000 \cdot V_m}, \text{ т/м.} \quad (4.2)$$

Для проверки возможности использования пластиковой матрицы необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$P \leq P_{max} \cdot K_3, \text{ т/м,} \quad (4.3)$$

где P – требуемая сила гибки для конкретной рассматриваемой заготовки, т/м.

Если в результате расчета неравенство не выполняется, то пластиковую матрицу для свободной гибки рассматриваемой заготовки использовать недопустимо.

С учетом полученной максимальной силы гибки P_{max} для матрицы со 100 % заполнением, были выполнены расчеты для гибки распространенных металлов в производстве в зависимости от расчетного значения временного сопротивлением (R_m), толщины заготовки (s) и ширины раскрытия матрицы (V_m). Расчеты выполнены для стали и латуни ($R_m=45 \text{ кг/мм}^2$), алюминия и мягкой меди ($R_m=25 \text{ кг/мм}^2$), нержавеющей стали ($R_m=55 \text{ кг/мм}^2$). Результаты расчетов приведены в таблицах 4.2–4.4. Зеленый цвет показывает допустимость использования гибки, желтый цвет показывает недопустимость из-за геометрических параметров ширины раскрытия матрицы, и красный показывает недопустимость гибки из-за превышения требуемой силы гибки максимально допустимых значений.

Таблица 4.2 – Сила свободной гибки стали и латуни с $R_m=45$ кг/мм²

	Сталь, латунь, $R_m=45$ кг/мм ²								
	Ширина раскрытия V-образного паза матрицы, мм								
s , мм	6	8	10	12	16	20	25	32	40
1	10,7	8,0	6,4	5,3	4,0	3,2	2,6	2,0	1,6
1,2	15,3	11,5	9,2	7,7	5,8	4,6	3,7	2,9	2,3
1,5	24,0	18,0	14,4	12,0	9,0	7,2	5,8	4,5	3,6
2	42,6	32,0	25,6	21,3	16,0	12,8	10,2	8,0	6,4
2,5	66,6	49,9	39,9	33,3	25,0	20,0	16,0	12,5	10,0
3	95,9	71,9	57,5	47,9	35,9	28,8	23,0	18,0	14,4
4	170,4	127,8	102,2	85,2	63,9	51,1	40,9	32,0	25,6

Таблица 4.3 – Сила свободной гибки нержавеющей стали с $R_m=55$ кг/мм²

	Нержавеющая сталь, $R_m=55$ кг/мм ²								
	Ширина раскрытия V-образного паза матрицы, мм								
s , мм	6	8	10	12	16	20	25	32	40
1	13,0	9,8	7,8	6,5	4,9	3,9	3,1	2,4	2,0
1,2	18,7	14,1	11,2	9,4	7,0	5,6	4,5	3,5	2,8
1,5	29,3	22,0	17,6	14,6	11,0	8,8	7,0	5,5	4,4
2	52,1	39,1	31,2	26,0	19,5	15,6	12,5	9,8	7,8
2,5	81,4	61,0	48,8	40,7	30,5	24,4	19,5	15,3	12,2
3	117,2	87,9	70,3	58,6	43,9	35,1	28,1	22,0	17,6
4	208,3	156,2	125,0	104,1	78,1	62,5	50,0	39,1	31,2

Таблица 4.4 – Сила свободной гибки алюминия и мягкой меди с $R_m=25$ кг/мм²

	Алюминий, мягкая медь, $R_m=25$ кг/мм ²								
	Ширина раскрытия V-образного паза матрицы, мм								
s , мм	6	8	10	12	16	20	25	32	40
1	5,9	4,4	3,6	3,0	2,2	1,8	1,4	1,1	0,9
1,2	8,5	6,4	5,1	4,3	3,2	2,6	2,0	1,6	1,3
1,5	13,3	10,0	8,0	6,7	5,0	4,0	3,2	2,5	2,0
2	23,7	17,8	14,2	11,8	8,9	7,1	5,7	4,4	3,6
2,5	37,0	27,7	22,2	18,5	13,9	11,1	8,9	6,9	5,5
3	53,3	39,9	32,0	26,6	20,0	16,0	12,8	10,0	8,0
4	94,7	71,0	56,8	47,3	35,5	28,4	22,7	17,8	14,2
5	147,9	110,9	88,8	74,0	55,5	44,4	35,5	27,7	22,2

На основании ранее проведенных исследований были выведены следующие ограничения и рекомендации при изготовлении матриц из PLA пластика для свободной гибки и деталей, получаемых с использованием таких матриц (рисунок 4.1):

- максимальная толщина листа 5 мм;
- угол $\alpha \geq 30^\circ$;
- $R_{\text{вн}} \leq 12,5$ мм;
- $V_{\text{м}} = 6-40$ мм;
- $B = 60$ мм;
- $\alpha_{\text{д}} = \alpha + 10$ мм;
- $R_1 \geq 5$ мм;
- $R_2 \geq 5$ мм;
- толщина внешнего контура матрицы 5 мм при внутреннем заполнении менее 100%;
- ориентация матрицы на платформе построения – ZXY.

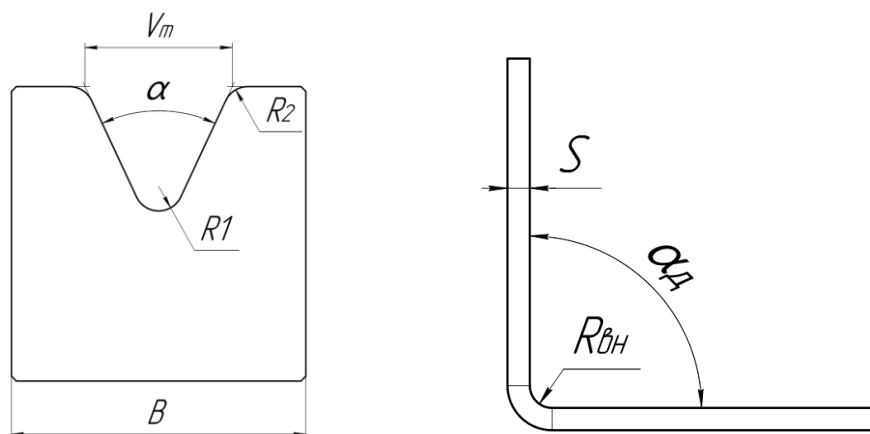


Рисунок 4.1 – Геометрические параметры:
слева – эскиз матрицы, справа – эскиз детали

На основании ограничений и рекомендаций был разработан алгоритм инженерной методики проектирования и изготовления матрицы с заданными прочностными параметрами, который позволяет проверить возможность изготовления матрицы из PLA-пластика, а также определить ее геометрические параметры и плотность внутреннего заполнения при 3D-печати по технологии FDM (рисунок 4.2).

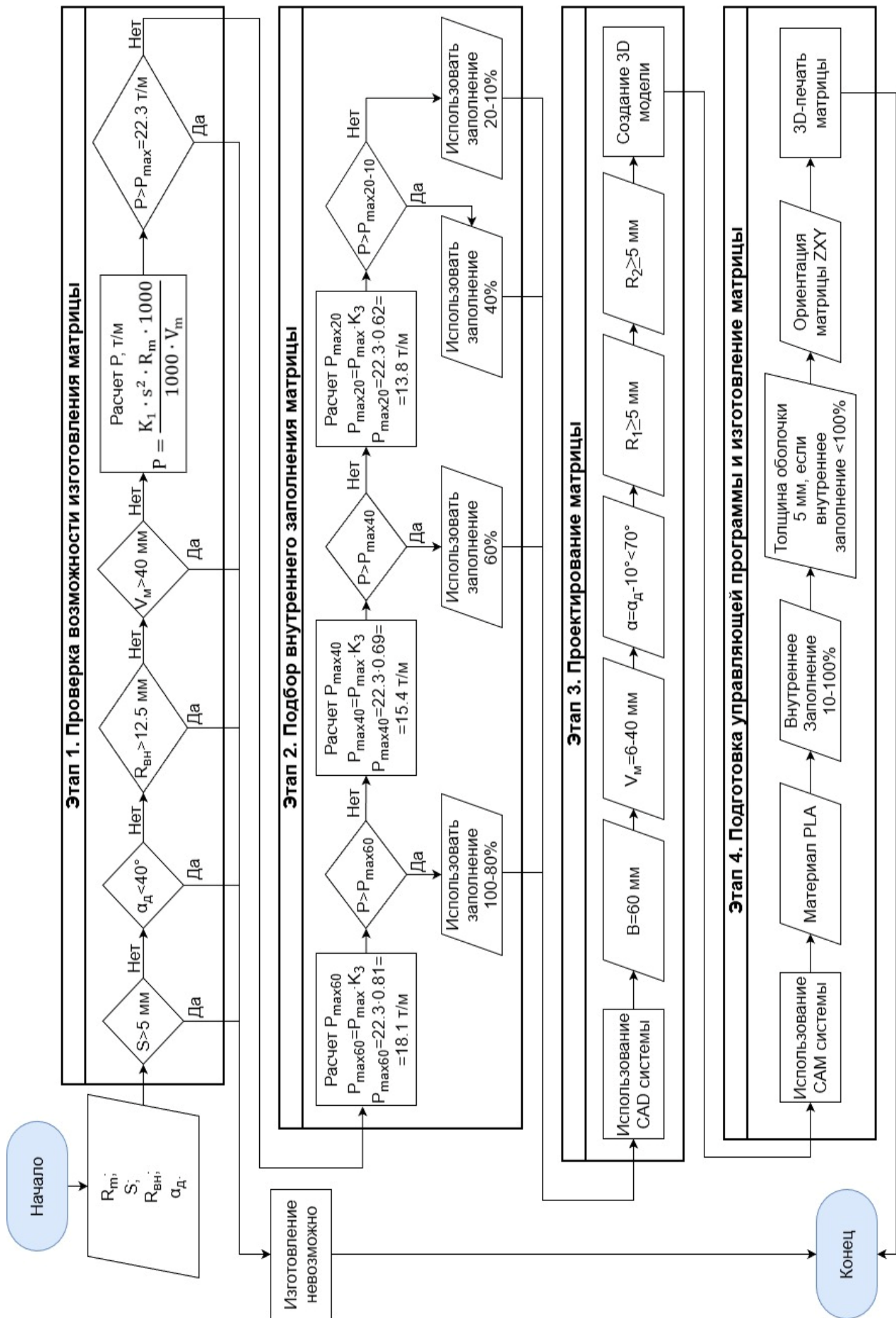


Рисунок 4.2 – Алгоритм инженерной методики

На начальной стадии алгоритма необходимо получить данные по материалу (R_m , кг/мм²), толщине заготовки (s , мм), внутреннему радиусу ($R_{вн}$, мм) и углу гибки детали (α_d , °). На первом этапе проверяется возможность изготовления матрицы исходя из параметров детали и силы гибки. На втором этапе производится подбор внутреннего заполнения матрицы. На третьем этапе происходит моделирование матрицы с учетом рекомендаций. На четвертом этапе выполняется подготовка 3D-модели в слайсере исходя из рекомендаций и изготовление матрицы.

4.2 Апробация результатов в условиях производства

Апробация разработанной инженерной методики проведена в производственных условиях на трех изделиях из заготовок разной толщины и марок материала на базе ООО «СиМП».

Изделия для апробации были следующие:

1. Изделие №1 (рисунок 4.3). Количество 4230 шт. Материал AISI 304 шлифованная ($R_m=53$ кг/мм²), толщина 1 мм (s), внутренний радиусгиба 8 мм ($R_{вн}$), уголгиба 60° (α_d), длинагиба 12 мм;
2. Изделие №2 (рисунок 4.4). Количество 2400 шт. Материал 08пс ($R_m=41$ кг/мм²), толщина 1,5 мм (s), внутренний радиусгиба 1,5 и 8 мм ($R_{вн}$), уголгиба 60 и 135° (α_d), длинагиба 25 мм;
3. Изделие №3 (рисунок 4.5). Количество 30 шт. Материал ХН60ВТ (ЭИ868, Inconel 600) ($R_m=75$ кг/мм²), толщина 0,8 мм (s), внутренний радиусгиба 8 мм ($R_{вн}$), уголгиба 90° (α_d), длинагиба 10 мм;

Изделия по геометрическим характеристикам соответствуют алгоритму, поэтому далее потребовалось выполнить расчет силы гибки по формуле 4.2. После этого на этапе 2 производился подбор внутреннего заполнения матриц исходя из неравенства по формуле 4.3.

По результатам расчетов для всех трех изделий подойдет изготовление матрицы с плотностью внутреннего заполнения 10 %. Данные расчетов сведены в таблицу 4.5.

По третьему этапу алгоритма была спроектирована (рисунок 4.6) и изготовлена методом FDM (рисунок 4.7) матрица со следующими геометрическими параметрами: $B = 60$ мм, $V_m = 30$ мм, $\alpha = 50^\circ$, R_1 и $R_2 = 5$ мм. Длина матрицы 220 мм.

После 3D-печати был выполнен контроль размеров матрицы, согласно допусков (рисунок 4.6).

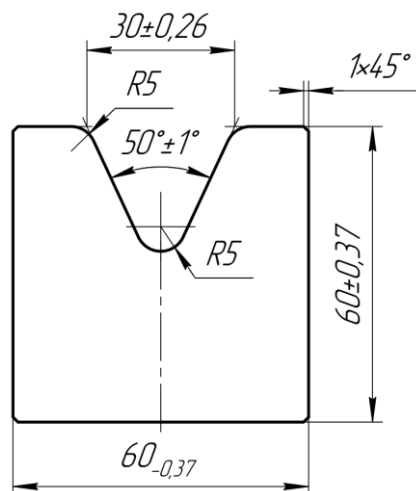


Рисунок 4.6 – Эскиз спроектированной матрицы

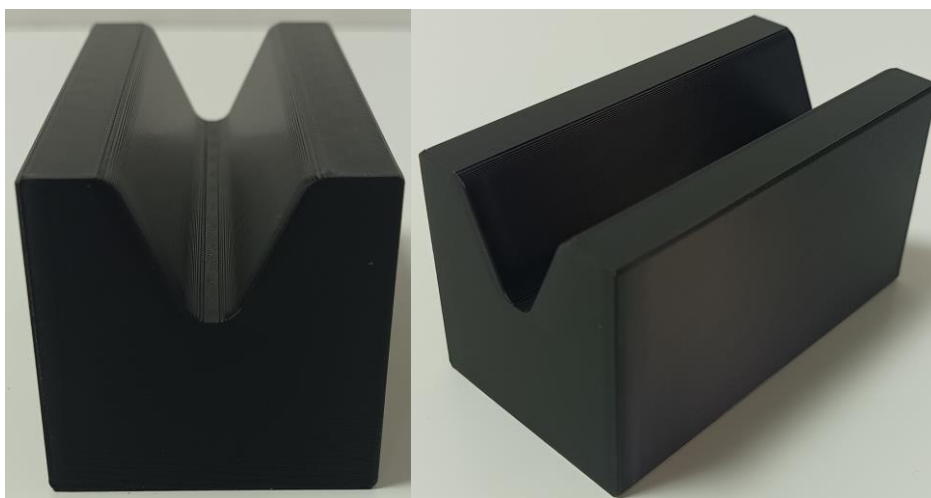


Рисунок 4.7 – Изготовленная матрица

На изготовленной матрице в общей сумме было изготовлено 6660 изделий и выполнено 9090 циклов гибки.

4.3 Расчет экономической эффективности применения 3D-печати для изготовления матриц

С целью выявления экономической эффективности произведен расчет себестоимости изготовления матрицы в условиях производства с помощью 3D-печати. Расчет выполнен на основании изготовленной матрицы с 10 % внутренним заполнением. Исходные данные для расчета приведены в таблицах 4.6–4.10.

Таблица 4.6 – Время изготовления и вес матрицы

Наименование изделия	Время подготовки управляющей программы, ч	Время на работу с сушилкой, ч	Время сушки материала, ч	Время на запуск 3D-принтера и снятия модели, ч	Время изготовления, ч	Вес, г
Матрица - V25, 50 гр., L-220 мм.	0,5	0,25	4	0,5	7	436

Таблица 4.7 – Стоимость используемого материала

Материал	Стоимость 1 кг, руб.	Стоимость 1 г, руб.
PLA пластик черный - REC	2957,33	2,96

Таблица 4.8 – Используемое оборудование

Наименование оборудования	Стоимость единицы оборудования, руб.	Мощность, кВт	Срок службы, год
Персональный компьютер	140 000	0,100	3
3D-принтер Bambu Lab X1 Carbon	119 999	0,120	3
Сушилка для пластика SUNLU S2	6 990	0,045	3

Таблица 4.9 – Заработная плата

Сотрудник	Зарплата в мес., руб.	Часовая ставка, руб.
Инженер-технолог	150000	912,78
Оператор 3D-принтера	100000	608,52

Таблица 4.10 – Другие параметры, входящие в расчет себестоимости

Параметр	Значение
Рабочее время за 2026 год, ч	1972
Годовой эффективный фонд времени работы оборудования, д	246,5
Цена одного кВт·ч, руб.	10,7
Дополнительная ЗП, %	15
Ставка страхового взноса, %	30
Содержание, эксплуатация оборудования, %	30
Общехозяйственные расходы, %	20
Общезаводские расходы, %	30
Внепроизводственные расходы, %	6

Расчет себестоимости производился по следующим формулам.

Расчет стоимости материала:

$$S_m = M_{\text{детали}} \cdot C_{\text{гр}}, \quad (4.4)$$

где $M_{\text{детали}}$ – масса изготавливаемого изделия, г. (таблица 4.6),

$C_{\text{гр}}$ – цена за грамм пластика, руб. (таблица 4.7).

Расчет стоимости электроэнергии:

$$S_{\text{э}} = P_{\text{т}} \cdot T \cdot C_{\text{э}}, \quad (4.5)$$

где $P_{\text{т}}$ – расход энергии, кВт·час (таблица 4.8);

$C_{\text{э}}$ – Цена одного кВт·ч, руб. (таблица 4.10);

T – время работы оборудования, час. (таблица 4.6).

Основная заработная плата:

$$S_{\text{осн}} = \sum t_i \cdot r_i, \quad (4.6)$$

где i – число операций технологического процесса по изготовлению данной продукции;

t_i – трудоемкость i -й операции, ч. (таблица 4.6);

r_i – часовая тарифная ставка рабочего, руб./ч (таблица 4.9).

Расчет дополнительной заработной платы:

$$S_{\text{доп}} = 0.15 \cdot S_{\text{осн}}. \quad (4.7)$$

Страховые взносы от величины фонда оплаты труда:

$$S_{\text{страх}} = \frac{H_{\text{страх}} \cdot (S_{\text{осн}} + S_{\text{доп}})}{100}, \quad (4.8)$$

где $H_{\text{страх}}$ – суммарный норматив страховых взносов (таблица 4.10).

Расчет содержания, эксплуатации оборудования:

$$S_{\text{сэо}} = \frac{H_{\text{сэо}} \cdot S_{\text{осн}}}{100}, \quad (4.9)$$

где $H_{\text{сэо}}$ – процент расходов по содержанию, эксплуатации оборудования (таблица 4.10).

Расчет общецеховых расходов:

$$S_{\text{оцр}} = \frac{H_{\text{оцр}} \cdot S_{\text{осн}}}{100}, \quad (4.10)$$

где $H_{\text{оцр}}$ – процент общецеховых расходов (таблица 4.10).

Расчет общезаводских расходов:

$$S_{\text{озр}} = \frac{H_{\text{озр}} \cdot S_{\text{осн}}}{100}, \quad (4.11)$$

где $H_{\text{озр}}$ – процент общезаводских расходов (таблица 4.10).

Расчет амортизации оборудования определяется по формуле:

$$A_{\text{нир}} = \frac{\Phi_{\text{перв}} \cdot T_{\text{и}} \cdot H_{\text{а}}}{\Phi_{\text{эф}}}, \quad (4.12)$$

где $\Phi_{\text{перв}}$ – первоначальная стоимость оборудования, руб. (таблица 4.8);

$T_{\text{и}}$ – время использования оборудования при проведении работ, дн. (таблица 4.6);

$H_{\text{а}}$ – норма амортизации;

$\Phi_{\text{эф}}$ – годовой эффективный фонд времени работы оборудования, для односменной работы (таблица 4.10).

$$H_{\text{а}} = \frac{1}{T_{\text{пи}}}, \quad (4.13)$$

где $T_{\text{пи}}$ – срок службы оборудования, лет (таблица 4.8).

Производственные затраты на единицу продукции:

$$S_{\text{пр}} = S_{\text{м}} + S_{\text{э}} + S_{\text{осн}} + S_{\text{доп}} + S_{\text{страх}} + S_{\text{сэо}} + S_{\text{оцр}} + S_{\text{озр}} + A_{\text{нир}}. \quad (4.14)$$

Внепроизводственные расходы:

$$S_{\text{впр}} = \frac{H_{\text{впр}} \cdot S_{\text{пр}}}{100}, \quad (4.15)$$

где $H_{\text{впр}}$ – процент внепроизводственных расходов (таблица 4.10).

Общая себестоимость изготовления матрицы:

$$C = S_{\text{пр}} + S_{\text{впр}}. \quad (4.16)$$

Данные по расчету себестоимости изготовления матрицы приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Расчет себестоимости

Параметр	Обозначение	Затраты, руб.
Затраты на материалы	S_m	1289,40
Затраты на электроэнергию для ПК	$S_{\text{эпк}}$	0,54
Затраты на электроэнергию для сушилки	$S_{\text{эсуш}}$	1,93
Затраты на электроэнергию для 3D-принтера	$S_{\text{эпр}}$	8,99
Общие затраты на электроэнергию	$S_{\text{э}}$	11,45
Основная ЗП инженера-технолога	$S_{\text{осн.инж}}$	456,39
Дополнительная ЗП инженера-технолога	$S_{\text{доп.инж}}$	68,46
Страховой взнос за инженера-технолога	$S_{\text{стр.инж}}$	157,45
Основная ЗП оператора 3D-принтера	$S_{\text{осн.оп}}$	456,39
Дополнительная ЗП оператора 3D-принтера	$S_{\text{доп.оп}}$	68,46
Страховой взнос за оператора 3D-принтера	$S_{\text{стр.оп}}$	157,45
Сумма основной ЗП	$S_{\text{осн}}$	912,78
Сумма дополнительной ЗП	$S_{\text{доп}}$	136,92
Сумма страхового взноса	$S_{\text{стр}}$	314,91
Содержание, эксплуатация оборудования	$S_{\text{сэо}}$	273,83
Общехозяйственные расходы	$S_{\text{оцр}}$	182,56
Общезаводские расходы	$S_{\text{озр}}$	273,83
Норма амортизации ПК	$H_{\text{а.пк}}$	0,33
Норма амортизации 3D-принтера	$H_{\text{а.пр}}$	0,33
Норма амортизации сушилки	$H_{\text{а.суш}}$	0,33
Амортизация ПК	$A_{\text{нир.пк}}$	11,83
Амортизация 3D-принтера	$A_{\text{нир.пр}}$	141,99
Амортизация сушилки	$A_{\text{нир.суш}}$	4,73
Сумма амортизации оборудования	$A_{\text{нир}}$	158,55
Производственные затраты	$S_{\text{пр}}$	3554,22
Внепроизводственные расходы	$S_{\text{впр}}$	213,25
Себестоимость	C	3767,47

В расчете себестоимости не учитывались затраты на проектирование, т.к. для разных технологий изготовления оно не будет отличаться.

Для сравнения стоимости и времени изготовления был выполнен запрос у подрядчика на изготовление матрицы с помощью фрезерования. Так же были сделан запрос в компанию, которая занимается поставками стандартных матриц, они предоставили стоимость и срок поставки похожей матрицы в том случае если она есть на локальном складе и в случае необходимости ее доставки из-за рубежа. В качестве сравнения была рассчитана себестоимость изготовления матрицы со 100% заполнением.

Срок изготовления матриц с 10 и 100% заполнения составляет 1 календарный день, а себестоимость 3767,47 руб. и 5189,57 руб. соответственно.

Стоимость изготовления матрицы с помощью фрезерования составило 61000 руб., а срок 30-40 календарных дней. Такая стоимость обусловлена единичным производством и высокими затратами поставщика на одно изделие.

Стоимость покупки стандартной матрицы составила 29561,91 руб. Срок поставки при наличии на локальном складе составляет 8-14 календарных дней, а при отсутствии и необходимости доставки из-за рубежа 84-140 календарных дней.

Полученные результаты по стоимости и сроку поставки приведены на графиках (рисунок 4.8–4.9).

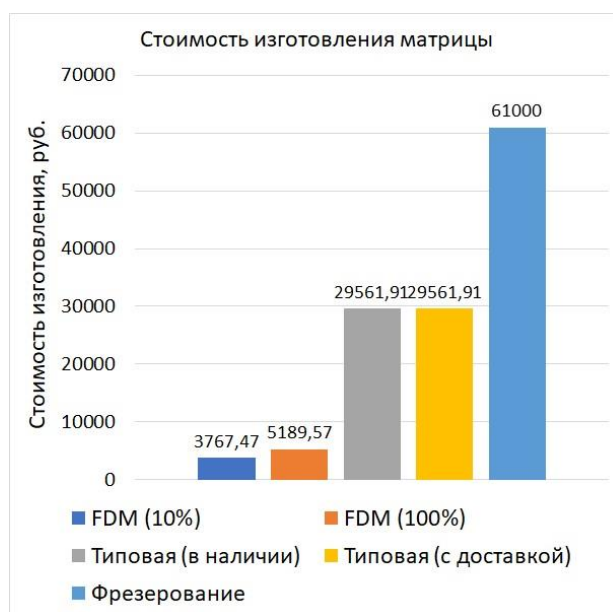


Рисунок 4.8 – Стоимость изготовления матрицы

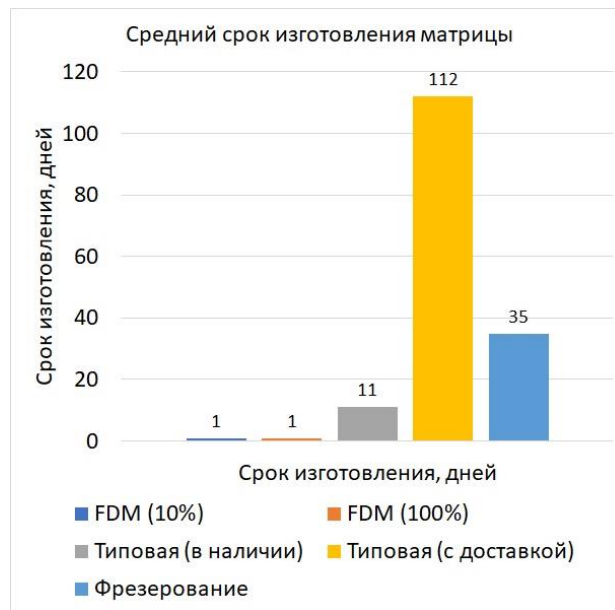


Рисунок 4.9 – Средний срок изготовления матрицы

Как можно увидеть из изготовления пластиковых матриц с помощью 3D-принтера не требует дорогого оборудования и может быть легко организовано почти на любом производстве.

4.4 Выводы по Главе 4

1. На основании экспериментальных исследований была уточнена стандартная формула для расчета силы гибки. За основу была принята матрица со 100% заполнением, выдерживающая максимальную силу гибки 33,4 т/м. От этой величины был выведен поправочный коэффициент K_3 для матриц с меньшей плотностью внутреннего заполнения и учтен коэффициент запаса прочности $K_2 = 1,5$. Итоговая максимальная сила гибки P_{max} составила 22,7 т/м.

2. Были составлены таблицы, показывающие возможность гибки наиболее распространенных металлов (сталь и латунь ($R_m=45$ кг/мм²), алюминий и мягкая медь ($R_m=25$ кг/мм²), нержавеющая сталь ($R_m=55$ кг/мм²) в зависимости от толщины детали и ширины раскрытия матрицы при использовании матрицы со 100 % заполнением.

3. Была разработана блок-схема, алгоритм которой позволяет проверить

возможность изготовления матрицы из PLA-пластика, а также определить ее геометрические параметры и плотность внутреннего заполнения при 3D-печати по технологии FDM.

4. В производственных условиях была выполнена апробация на трех изделиях из разных материалов с различной толщиной. Для каждого изделия по алгоритму блок-схемы была проверена возможность изготовления матрицы, определены геометрические параметры, подобрана плотность внутреннего заполнения, которая составила 10 %, создана 3D-модель для последующего изготовления. Матрицы с плотностью заполнения в 10 % были изготовлены с ориентацией ZXY на платформе построения 3D-принтера. Для всех 3-х изделий подтверждена работоспособность матрицы, изготовленной методом 3D-печати по технологии FDM

5. По изготовленной матрице был выполнен экономический расчет себестоимости. Были рассчитаны варианты с заполнением 10 % и 100 %. Себестоимость изготовления матрицы со 100 % заполнением оказалась в 1,4 раза выше, чем матрицы с 10 % заполнением. Также были получены коммерческие предложения по изготовлению матрицы с фрезерованием и на покупку типовой матрицы аналогичной геометрии, которая есть в наличии и под заказ. Согласно полученным данным, изготовление матрицы с помощью 3D-печати по технологии FDM значительно быстрее и дешевле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В диссертации решена научно-техническая задача повышения эффективности изготовления инструмента для свободной гибки на листогибочных прессах посредством сокращения времени изготовления и расхода материала на основе разработки и внедрения технологических процессов 3D-печати по технологии FDM.

2. Установлены функциональные зависимости прочности, модуля упругости, номинального относительного удлинения при растяжении пластика от технологических параметров (температура экструзии, скорость 3D-печати, степень обдува) 3D-печати по технологии FDM. Определено, что при изменении технологических параметров 3D-печати происходит изменение механических характеристик образцов, но данные изменения незначительны и их нецелесообразно использовать для повышения механических характеристик матриц. При использовании данных технологических параметров необходимо придерживаться диапазона, указанного в рекомендациях от производителя филамента.

3. В результате численного моделирования получены эмпирические зависимости влияния геометрических параметров узлов матрицы на напряжения, обеспечивающие стабильность прочностных характеристик. Установлено, что при изменении угла V-образного выреза матрицы оказывает влияние на напряжения только при угле в 80° , в диапазоне $70-30^\circ$ напряжения не изменяются. Установлено, что при увеличении радиусов R_1 и R_2 в диапазоне 1-10 мм напряжения в матрице уменьшаются.

4. Экспериментально установлено, что ориентация матриц на платформе построения 3D-принтера оказывает существенное влияние на прочностные характеристики. Ориентация матрицы ZXY выдержала максимальное нагружение и является наиболее целесообразным при проектировании и подготовке матриц к 3D-печати.

5. Экспериментально установлено, что плотность внутреннего заполнения матриц оказывает влияние на их прочностные характеристики. При увеличении

плотности заполнения с 10 до 100 %, матрица может выдерживать силу гибки в диапазоне от 20,95 до 33,4 т/м. Сокращение плотности заполнения со 100 % до 80 % практически не влияет на прочностные характеристики, что является резервом сокращения времени печати и расхода материала.

6. На основе полученных результатов исследований разработана инженерная методика, которая позволяет определять технологические параметры 3D-печати, обеспечивающие снижение себестоимости, расхода материала и времени изготовления матрицы в условиях единичного и мелкосерийного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакиновская, А. А. Исследование возможностей применения формообразующего инструмента, изготовленного аддитивными методами, для гидроударной штамповки / А. А. Бакиновская, В. С. Петраковский, А. А. Шведов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2020. – С. 16-22.
2. Балашов, А. В. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью / А. В. Балашов, М. И. Маркова // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 1 (52). – С. 66.
3. Варфоломеев, М. С. Особенности изготовления отливок из алюминиевых сплавов по выжигаемым аддитивным FDM-моделям / М. С. Варфоломеев, И. А. Петров // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2023. – № 4. – С. 5-14.
4. Василевич, В. Г. Температурные зависимости прочностных и вязкоупругих характеристик изделий, получаемых методом FDM-печати / В. Г. Василевич, О. И. Карпович, Г. А. Величко // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. – 2024. – Т. 15. – № 1. – С. 98-104.
5. Вдовенко, А. Д. Экспериментальное исследование влияния технологических параметров FDM-печати на механические свойства полимерных образцов / А. Д. Вдовенко, М. С. Никитенко, М. В. Пимонов, А. С. Сивушкин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2025. – Т. 171. – № 5. – С. 42-50.
6. Гарипова, Л. И. Механические характеристики деталей, изготавливаемых методом FDM-печати / Л. И. Гарипова, А. С. Батраков, Ф. Ф. Хабибуллин // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2024. – № 1. – С. 132.
7. Гаспарова, Л. Б. Исследование прочностных характеристик зубчатых колес, изготовленных аддитивным способом при варьировании технологических параметров / Л. Б. Гаспарова, М. В. Якимов, В. Д. Косоуров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27. – № 3-2 (125). – С. 299-306.

8. Гончарова, Ю. А. Исследование механических свойств композиционного материала на основе 3D-печатных каркасов, наполненных полимерным компаундом / Ю. А. Гончарова // *Агроинженерия*. – 2022. – Т. 24. – № 2. – С. 65-70.
9. Григоренко, Г.Д. Влияние параметров печати на прочность деталей штампов, изготовленных методом послойного наплавления полимера / Г.Д. Григоренко, С.А. Евсюков // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2017. – Т. 15. – № 4. – С. 177-181.
10. Григорьев, Л. Л. Холодная штамповка: Справочник / Л. Л. Григорьев, К. М. Иванов, Э. Е. Юргенсон – СПб : Политехника, 2011. – 665 с.
11. Гущин, И. А. Аддитивное производство изделий повышенной прочности на пятиосевых FDM 3D-принтерах: дис. канд. техн. наук: 2.5.6. – Технология машиностроения / И. А. Гущин. – Волгоград : ВолгГТУ, 2025.
12. Дворянкин, А. О. Совершенствование технологии изготовления оснастки для изделий машиностроения за счёт применения 3D-печати : автореф. дис. канд. техн. наук: 2.5.6. – Технология машиностроения / А. О. Дворянкин. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023.
13. Драгунов, Ю. Г. Марочник сталей и сплавов / Ю. Г. Драгунов, А. С. Зубченко, Ю. В. Каширский, [и др.]. – 6. – Москва : Инновационное машиностроение, 2019.
14. Ерофеев, В. Т. Исследование физико-механических характеристик образцов из полилактида в аддитивной технологии / В. Т. Ерофеев, Т. Ф. Ельчищева, Е. М. Преображенская, М. В. Макачук // *Региональная архитектура и строительство*. – 2019. – № 3. – С. 92-101.
15. Карасев, Н. И. Комплексный анализ механического поведения FDM-термопластов в условиях компрессионного нагружения / Н. И. Карасев, А. М. Бражникова // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2025. – Т. 27. – № 3(2) – С. 238-245.
16. Карасев, Н. И. Экспериментальное исследование деформационного поведения термопластов при одноосном растяжении в условиях FDM-технологии / Н. И. Карасев, И. Б. Воробьев // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2025. –

Т. 27. – № 3(2). – С. 231-237.

17. Каталог Ferrari Costruzioni Meccaniche. Ottimo tools / Каталог Ferrari Costruzioni Meccaniche. Ottimo tools. – 2024. – URL: <https://ottimo-tools.ru/uploads/store/1b8d86b1328ae04833594e32ec703a7b.pdf> (дата обращения: 11.03.2024). –

Текст : электронный.

18. Каталог Rolleri SPA. Листогибочный инструмент. Издание 19 / Каталог Rolleri SPA. Листогибочный инструмент. Издание 19. – 2024. – URL: <https://www.stanki.ru/upload/iblock/a8f/a8fbbb94942827b6e7957a56f3a13fe4.pdf> (дата обращения: 11.03.2024). – Текст : электронный.

19. Каталог Барус Инструмент. Инструмент для листогибочных прессов / Каталог Барус Инструмент. Инструмент для листогибочных прессов. – 2024. – URL: <https://www.barus.tools/upload/iblock/862/1wz402qgl-zifwvk2w21rfzkbqq2mjbn5/%D0%9A%D0%90%D0%A2%D0%90%D0%9B%D0%9E%D0%93%20%D0%98%D0%9D%D0%A1%D0%A2%D0%A0%D0%A3%D0%9C%D0%95%D0%9D%D0%A2%D0%90%20%D0%94%D0%9B%D0%AF%20%D0%9B%D0%98%D0%A1%D0%A2%D0%9E%D0%93%D0%98%D0%91%D0%9E%D0%A7%D0%9D%D0%AB%D0%A5%20%D0%9F%D0%A0%D0%95%D0%A1%D0%A1%D0%9E%D0%92.pdf> (дата обращения: 11.03.2024). – Текст : электронный.

20. Кондрашов, С. В. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) / С. В. Кондрашов, А. А. Пыхтин, С. А. Ларионов, А. Е. Сорокин // Труды ВИАМ. – 2019. – № 10 (82). – С. 34-49.

21. Куликов, А. Д. Формообразование листовых заготовок из меди М1 полимерным инструментом из полилактида PLA / А. Д. Куликов, И. А. Бурлаков, П. А. Петров [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. – 2024. – Т. 22. – № 4. – С. 163-170.

22. Куликов, А. Д. Штамповка тонкостенных заготовок с применением инструмента из полилактида PLA / А. Д. Куликов, И. А. Бурлаков, П. А. Петров, П. А. Полшков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 12. – С. 616-620.

23. Курчев, А. И. Обзор современных аддитивных технологий / А.И. Курчев, Д.Н. Трушников – URL: <https://www.in-core.ru/articles/innovatsii-i-razvitie-proizvodstva/zamenyat-li-additivnye-tekhnologii-traditsionnye-sposoby-obrabotki-detaley-plyusy-i-minusy-additivny/> (дата обращения: 15.03.2024). – Текст : электронный.
24. Лавриненко, В. Ю. Экспериментально исследования процесса гибки листовых заготовок на прессах и листоштамповочных молотах с использованием FDM-штампов / В. Ю.Лавриненко, М. А. Сережкин, Н. А. Балахонцева, Ж. Садилов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – № 2. – С. 358.
25. Левина, Т. А. К вопросу о влиянии параметров процесса на механические свойства 3D-печати FDM: комплексный обзор / Т. А. Левина, И. С. Кушнир, Я. М. Глухих, А. Я. Ключков // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2023. – Т. 15. – № 3. – С. 123-131.
26. Леонович, И. А. Взаимосвязь между средней плотностью ABS-пластика аддитивной структуры и его прочностными и упругими свойствами / И. А. Леонович, Д. Д. Адинцов, Д. И. Евмененко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 2 (87). – С. 4-13.
27. Лопатов, М. Г. Применение аддитивных технологий в подготовке листового штамповочного производства / М. Г. Лопатов, О. С. Тимофеева // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2025. – Т. 68. – № 7. – С. 623-632.
28. Михальченко, А. А. Влияние режимов 3D-печати термопластами на прочностные свойства изделий / А. А. Михальченко, А. Б. Невзорова, И. Б. Одарченко // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2023. – № 1 (92). – С. 31-40.
29. Петров, П. А. Повышение прочности формообразующего инструмента из полилактида PLA методом закалки / П. А. Петров, И. А. Бурлаков, П. А. Полшков [и др.] // Станкоинструмент. – 2023. – № 1. – С. 58.
30. Петрова, Г. Н. Исследование комплекса характеристик базовых материалов для FDM технологии аддитивного синтеза. Физико-механические и теплофи-

зические свойства / Г. Н. Петрова, М. М. Платонов, В. А. Большаков, С. А. Пономаренко // Пластические массы. – 2016. – № 5-6. – С. 53-58.

31. Потапов, А. А. Конструкторско-технологическое обоснование режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками : дис. канд. техн. наук: 2.5.6. – Технология машиностроения / А. А. Потапов. – Тула : ТулГУ, 2025.

32. Распопина, В. Б. Влияние направления печати по FDM-технологии на механические свойства изделия / В. Б. Распопина, В. В. Мартынова, Е. А. Ступина // iPolytech Journal. – 2024. – Т. 28. – № 4. – С. 477-487.

33. Рудман, Л. И. Справочник конструктора штампов. Листовая штамповка / Л. И. Рудман. – Москва : Машиностроение, 1988. – 496 с.

34. Сережкин, М. А. Анализ возможности использования 3d-печати для быстрого инструментального производства в области холодной листовой штамповки / М. А. Сережкин, Д. О. Климюк, А. И. Плохих // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2020. – № 3. – С. 341.

35. Сорокин, В. Г. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин. – Москва : Машиностроение, 1989. – 640 с.

36. Судан, А. Технологические методы управления деформационно-прочностными характеристиками полимерных изделий, полученных методом FDM-печати / А. Судан, Е. Т. Воропаева // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. – 2020. – Т. 10. – № 2. – С. 74-81.

37. Теньшов, Д. В. Разработка пуансона с матрицей V-образной формы при помощи FDM технологии инженерным пластиком специального назначения / Д. В. Теньшов, А. А. Тувин, А. В. Нестюк // Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение. – 2025. – Т. 82. – № 2. – С. 95-99.

38. Типалин, С. А. Гибка листового металла в полимерной матрице / С. А. Типалин, Б. Ю. Сапрыкин, Ю. Г. Калпин, С. А. Копылов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 604-608.

39. Турченко, М. В. Исследование прочности 3D-печатных изделий при варьировании технологических параметров в процессе печати / М. В. Турченко, Ю. А. Гончарова, Р. М. Касимов // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25. – № 2. – С. 46-51.

40. Хасанов, Б. Д. Механические свойства ABS-, PETG- и PLA-пластиков, полученных по FDM-технологии / Б. Д. Хасанов, Д. Г. Алленов, М. Г. Алленов, К.Б. Дейнова // Технология машиностроения. – 2023. – Т. 8. – С. 5-12.
41. Чан, Динь Хынг. Разработка и исследование технологии микроштамповки листовых деталей из цветных металлов и сплавов, с применением штампового инструмента, полученного методами 3D-печати : дис. канд. техн. наук: 2.5.7 / Чан Динь Хынг. – Москва : МИСИС, 2025.
42. Шалыгин, С. В. Методология прогнозирования модуля упругости для материала изделий, полученных методом послойного направления и работающих в условиях трехточечного изгиба / С. В. Шалыгин, Г. С. Русских // Справочник. Инженерный журнал. – 2024. – Т. 3. – С. 26-32.
43. Шалыгин, С. В. Разработка методики построения внутренней структуры изделия, полученного методом трёхмерной печати с учётом граничных условий и нагружения : дис. ... канд. техн. наук: 2.5.2. – Машиноведение / С. В. Шалыгин. – Омск : ОмГТУ, 2024.
44. Шеметов, Л. И. Трансформация геометрии образца для механических испытаний конструкционных материалов в FDM-структуре / Л. И. Шеметов, В. Б. Распопина, А. С. Чернышков // iPolytech Journal. – 2022. – Т. 26. – № 3 (164). – С. 386-400.
45. Шмелёв, А. В. Экспериментальное и расчетное определение механических характеристик образцов АБС-пластика при растяжении, изготовленных методом 3D-печати / А. В. Шмелёв, В. И. Ивченко, А. В. Талалуев // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – № 4 (112). – С. 2.
46. Abramova, T. S. Comparative tests of mechanical characteristics and structure of basic and engineering plastic filaments for additive manufacturing / T. S. Abramova, S. A. Bekher // Defektoskopiâ. – 2023. – no. 10. – P. 70-72.
47. Aizawa, T. Fabrication of punch and die using plasma-assisted 3D printing technology for piercing sheet metals / T. Aizawa, Y. Suzuki, T. Yoshino, T. Shiratori // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2022. – Vol. 6. – no. 3. – P. 49.

48. Amada / Amada. – 2024. – URL: <https://www.amada.co.jp/en/> (дата обращения: 11.03.2024). – Текст : электронный.
49. Asnafi, N. Design and Validation of 3D-Printed Tools for Stamping of DP600 / N. Asnafi, J. Rajalampi, D. Aspenberg // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering : 651. – 2019. – P. 012010.
50. Athale, M. Experimental characterization and finite element simulation of FDM 3D printed polymer composite tooling for sheet metal stamping / M. Athale, T. Park, R. Hahnlen, F. Pourboghrat // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Vol. 121. – no. 9-10. – P. 6973-6989.
51. Backes, F. Concurrent manufacturing of parts and tools for the sheet-metal industry / F. Backes, V. Franke, M. Geiger // Journal of Intelligent Manufacturing. – 1998. – no. 9. – P. 347-352.
52. Brischetto, S. Tensile and compressive behavior in the experimental tests for PLA specimens produced via fused deposition modelling technique / S. Brischetto, R. Torre // Journal of Composites Science. – 2020. – Vol. 4. – no. 3. – P. 140.
53. Bystronic / Bystronic. – 2023. – URL: <https://bystronic.com/che/en> (дата обращения: 10.05.2023). – Текст : электронный.
54. Catalogue ToolsPress. European style. Press brake tooling and accessories / Catalogue ToolsPress. European style. Press brake tooling and accessories. – 2024. – URL: https://toolspress.com/it/index.php?controller=attachment&id_attachment=3220 (дата обращения: 11.03.2024). – Текст : электронный.
55. Chacón, J. M. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection / J. M. Chacón, M. A. Caminero, E. García-Plaza, P. J. Núñez // Materials & Design. – 2017. – Vol. 124. – P. 143-157.
56. Chadha, A. Effect of fused deposition modelling process parameters on mechanical properties of 3D printed parts / A. Chadha, M. I. Ul Haq, A. Raina et al. // World Journal of Engineering. – 2019. – Vol. 16. – no. 4. – P. 550-559.
57. Dave, H. K. Compressive strength of PLA based scaffolds: effect of layer height, infill density and print speed / H. K. Dave, S. R. Rajpurohit, N. H. Patadiya et al.

// Int. J. Mod. Manuf. Technol. – 2019. – Vol. 11. – no. 1. – P. 21-27.

58. Ding, Q. Anisotropy of poly (lactic acid)/carbon fiber composites prepared by fused deposition modeling / Q. Ding, X. Li, D. Zhang et al. // Journal of applied polymer science. – 2020. – Vol. 137. – no. 23. – P. 48786.

59. Drazan, T. Analysis of 3D printed metric nuts manufactured by the mex method from ASA material / T. Drazan, V. Chadima, K. Jasik et al. // MM Science Journal. – 2025.

60. Du, Z. H. Rapid sheet metal manufacturing. Part 1: indirect rapid tooling / Z. H. Du, C. K. Chua, Y. S. Chua et al. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2002. – Vol. 19. – no. 6. – P. 411-417.

61. Durgun, I. Sheet metal forming using FDM rapid prototype tool / I. Durgun // Rapid Prototyping Journal. – 2015. – Vol. 21. – no. 4. – P. 412-422.

62. Ferrari Costruzioni Meccaniche / Ferrari Costruzioni Meccaniche. – 2023. – URL: <https://ferraritools.it/> (дата обращения: 10.05.2023). – Текст : электронный.

63. Frohn-Sörensen, P. 3D printed prototyping tools for flexible sheet metal drawing / P. Frohn-Sörensen, M. Geueke, T. B. Tuli et al. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 115. – no. 7-8. – P. 2623-2637.

64. Frohn-Sörensen, P. Design for 3D Printed Tools: Mechanical Material Properties for Direct Polymer Additive Tooling / P. Frohn-Sörensen, M. Geueke, B. Engel et al. // Polymers. – 2022. – Vol. 14. – no. 9. – P. 1694.

65. Geueke, M. Structural optimization of additively manufactured polymer tools for flexible sheet metal forming / M. Geueke, P. Frohn-Sörensen, J. Reuter et al. // Procedia CIRP. – 2021. – Vol. 104. – P. 1345-1350.

66. Gibson, I. Additive Manufacturing Technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing / I. Gibson, D. Rosenson, B. Stucker, M. Khoras. – 3rd ed. – Cham : Springer International Publishing, 2021. – 675 p.

67. Giorleo, L. Topology optimization of polymer-based bending tools manufactured via additive technology: Numerical and experimental validation / L. Giorleo, K. I. Deniz // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2025. – Vol. 9. – no. 9. – P. 310.

68. Gonabadi, H. The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer / H. Gonabadi, A. Yadav, S. J. Bull // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 111. – no. 3. – P. 695-709.
69. Hernandez, R. Analyzing the tensile, compressive, and flexural properties of 3D printed ABS P430 plastic based on printing orientation using fused deposition modeling / R. Hernandez, D. Slaughter, D. Whaley et al. // 27th annual international solid freeform fabrication symposium, Austin, TX. – 2016. – P. 939-950.
70. Hölker-Jäger, R. Additive manufacture of tools and dies for metal forming / R. Hölker-Jäger, A. E. Tekkaya // Laser Additive Manufacturing. – 2017. – Vol. Elsevier. – P. 439-464.
71. Homrani, K. Investigation into Influence of Tensile Properties When Varying Print Settings of 3D-Printed Polylactic Acid Parts: Numerical Model and Validation / K. Homrani, S. Volcher, E. R. Lorphèvre, A. Demarbaix et al. // Polymers. – 2024. – Vol. 16. – no.. 16. – P. 2253.
72. Hsueh, M. H. Effect of printing parameters on the thermal and mechanical properties of 3d-printed PLA and PetG, using fused deposition modeling / M. H. Hsueh, C. J. Lai, S. H. Wang et al. // Polymers. – 2021. – Vol. 13. – no. 11. – P. 1758.
73. Kaleem, M. A. Design criteria to use 3D printed polymeric tools in metal forming processes / M. A. Kaleem, P. Frohn-Sörensen, R. Steinheimer, B. Engel // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2025. – Vol. 408. – P. 01008.
74. Ketec Precision Tooling / Ketec Precision Tooling. – 2023. – URL: <http://www.ketecool.com/en/> (дата обращения: 10.05.2023). – Текст : электронный.
75. Kholil, A. Compression strength characteristics of ABS and PLA materials affected by layer thickness on FDM / A. Kholil, E. Asyaefudin, N. Pinto, S. Syaripuddin // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2022. – Vol. 2377. – P. 012008.
76. Kulikov, A. D. Prospects for the application of polymer stamping tool / A. D. Kulikov, P. A. Petrov, I. A. Burlakov, P. A. Polshkov // Stankoinstrument. – 2025. – no. 3. – P. 62-67.

77. Kumar, S. R. Polymer additive manufacturing of ASA structure: Influence of printing parameters on mechanical properties / S. R. Kumar, S. Sridhar, R. Venkattraman, M. Venkatesan // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 39. – P. 1316-1319.
78. Leal, R. Additive manufacturing tooling for the automotive industry / R. Leal, F. M. Barreiros, L. Alves et al. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 92. – no. 5. – P. 1671-1676.
79. Lies, N. J. Understanding the Stochastic Nature of Process Parameter Development of Blown Powder Laser Beam Directed Energy Deposition Additive Manufacturing of Pure Molybdenum / N. J. Lies, D. E. Driemeyer, A. P. Stebner // *Advanced Engineering Materials*. – 2026. – P. e202503089.
80. LVD / LVD. – 2024. – URL: <https://www.lvdgroup.com/en> (дата обращения: 11.03.2024). – Текст : электронный.
81. Mandic, V. An Experimental–Numerical Framework for Springback Prediction and Angle Compensation in Air Bending with Additively Manufactured Polymer Tools / V. Mandic, M. Delic, D. Adamovic et al. // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2026. – Vol. 10. – no. 1. – P. 30.
82. Mate / Mate. – 2023. – URL: <https://www.mate.com/> (дата обращения: 10.05.2023). – Текст : электронный.
83. Mercado-Colmenero, J. M. A numerical and experimental study of the compression uniaxial properties of PLA manufactured with FDM technology based on product specifications / J. M. Mercado-Colmenero, M. A. Rubio-Paramio, M. D. la Rubia-Garcia et al. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 103. – no. 5. – P. 1893-1909.
84. Morales, N. G. The effect of interlayer cooling on the mechanical properties of components printed via fused deposition / N. G. Morales, T. J. Fleck, J. F. Rhoads // *Additive Manufacturing*. – 2018. – Vol. 24. – P. 243-248.
85. Nakamura, N. Bending of sheet metals using plastic tools made with 3D printer / N. Nakamura, K. I. Mori, F. Abe, Y. Abe // *Procedia Manufacturing*. – 2018. – Vol. 15. – P. 737-742.

86. Nakamura, N. 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 / N. Nakamura, Y. Hata, W. Daodon et al. // *Materials*. – 2025. – Vol. 18. – no. 3. – P. 608.
87. Nakamura, N. Applicability of plastic tools additively manufactured by fused deposition modelling for sheet metal forming / N. Nakamura, K. Mori, Y. Abe // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 108. – no. 4. – P. 975-985.
88. Narayan, Y. S. Compressive strength assessment in additively manufactured sustainable poly lactic acid specimens as per ASTM D695 standard / Y. S. Narayan, K. J. Prakash, P. Narendra et al. // *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2024. – Vol. 552. – P. 01027.
89. Narendra, K. The effect of process parameters on tensile behavior of 3D printed flexible parts of ethylene vinyl acetate (EVA) / K. Narendra, P. K. Jain, P. Tandon, P. M. Pandey // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2018. – Vol. 35. – P. 317-326.
90. Olekhver, A. I. Assessment of the possibility of using large-sized die tooling obtained using additive technologies / A. I. Olekhver, Y. Y. Remshev, D. V. Gusev // *Cifra. Машиностроение*. – 2025. – no. 1 (6).
91. Pavan, M. V. Compressive test Fractured Surface analysis on PLA-Cu composite filament printed at different FDM conditions / M. V. Pavan, K. Balamurugan, P. Balamurugan // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 988. – P. 012019.
92. Pepelnjak, T. Altering the elastic properties of 3D printed poly-lactic acid (PLA) parts by compressive cyclic loading / T. Pepelnjak, A. Karimi, A. Maček, N. Mole // *Materials*. – 2020. – Vol. 13. – no. 19. – P. 4456.
93. Pernet, B. Compressive strength assessment of 3D printing infill patterns / B. Pernet, J. K. Nagel, H. Zhang // *Procedia CİRP*. – 2022. – Vol. 105. – P. 682-687.
94. Rajpurohit, S. R. Effect of process parameters on tensile strength of FDM printed PLA part / S. R. Rajpurohit, H. K. Dave // *Rapid Prototyping Journal*. – 2018. – Vol. 24. – no. 8. – P. 1317-1324.

95. Rankouhi, B. Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation / B. Rankouhi, S. Javadpour, F. Delfanian, T. Letcher // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. – 2016. – Vol. 16. – no. 3. – P. 467-481.
96. REC. ABS пластик REC 1.75мм чёрный / REC. – 2024. – URL: <https://rec3d.ru/plastik-dlya-3d-printerov/abs/abs-plastik-rec-1-75mm-chjornyj/> (дата обращения: 15.01.2024). – Текст : электронный.
97. REC. PLA пластик REC 1.75мм чёрный / REC. – 2024. – URL: <https://rec3d.ru/plastik-dlya-3d-printerov/pla/pla-plastik-rec-1-75mm-chjornyj/> (дата обращения: 15.01.2024). – Текст : электронный.
98. Riddick, J. C. Fractographic analysis of tensile failure of acrylonitrile-butadiene-styrene fabricated by fused deposition modeling / J. C. Riddick, M. A. Haile, R. Von Wahlde et al. // *Additive Manufacturing*. – 2016. – Vol. 11. – P. 49-59.
99. Schuh, G. Sheet Metal Forming Using Additively Manufactured Polymer Tools / G. Schuh, G. Bergweiler, P. Bickendorf et al. // *Procedia CIRP*. – 2020. – no. 93. – P. 20-25.
100. Scipioni, S. I. Error introduced by direct 3D printing of compression samples of PLA made by FDM process / S. I. Scipioni, F. Lambiase // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 129. – no. 9. – P. 4355-4368.
101. Singh, R. Multi-material additive manufacturing of sustainable innovative materials and structures / R. Singh, R. Kumar, I. Farina et al. // *Polymers*. – 2019. – Vol. 11. – no. 1. – P. 62.
102. Squires, A. D. Feasibility and characterization of common and exotic filaments for use in 3D printed terahertz devices / A. D. Squires, R. A. Lewis // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2018. – Vol. 39. – no. 7. – P. 614-635.
103. Squires, A. D. Mechanical and optical viability of eighteen filaments for 3D printing of terahertz components / A. D. Squires, R. A. Lewis // *2017 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. – IEEE, 2017. – P. 1-2.

104. Stratasys. Additive Manufacturing for Custom Metal Form Tooling / Stratasys. – URL: https://533-lav-099.mktoapi.com/rs/533-LAV-099/images/Custom%20Metal%20Forming_EMEA_EN.pdf (дата обращения: 18.01.2023). – Текст : электронный.

105. Szalai, S. Investigation of Digital Light Processing-Based 3D Printing for Optimized Tooling in Automotive and Electronics Sheet Metal Forming / S. Szalai, B. F. Szívós, V. Nemes et al. // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2025. – Vol. 9. – no. 1. – P. 25.

106. Szalai, S. Investigation of FDM-based 3D printing for optimized tooling in automotive and electronics sheet metal cutting / S. Szalai, B. F. Szívós, V. Nemes et al. // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15. – no. 1. – P. 442.

107. Tondini, F. 3D printing to facilitate flexible sheet metal forming production / F. Tondini, U. Arinbjarnar, A. Basso, C. V. Nielsen // Procedia CIRP. – 2021. – no. 103. – P. 91-96.

108. ToolsPress / ToolsPress. – 2023. – URL: <https://toolspress.com/en/> (дата обращения: 10.05.2023). – Текст : электронный.

109. Torre, R. Buckling developed in 3D printed PLA cuboidal samples under compression: Analytical, numerical and experimental investigations / R. Torre, S. Brischetto, I. R. Dipietro // Additive Manufacturing. – 2021. – Vol. 38. – P. 101790.

110. Uddin, M. S. Evaluating mechanical properties and failure mechanisms of fused deposition modeling acrylonitrile butadiene styrene parts / M. S. Uddin, M. F. R. Sidek, M. A. Faizal et al. // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2017. – Vol. 139. – no. 8. – P. 081018.

111. UKB / UKB. – 2023. – URL: <https://www.ukb-gmbh.de/ru/> (дата обращения: 10.05.2023). – Текст : электронный.

112. Upadhyay, K. Determination and comparison of the anisotropic strengths of fused deposition modeling P400 ABS / K. Upadhyay, R. Dwivedi, A. K. Singh // Advances in 3D printing & additive manufacturing technologies. – Springer, 2016. – P. 9-28.

113. Vambol, O. Determining the parameters for a 3D-printing process using the

fused deposition modeling in order to manufacture an article with the required structural parameters / O. Vambol, A. Kondratiev, S. Purhina, M. Shevtsova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 2. – no. 1. – P. 110.

114. Wang, S. Effects of fused deposition modeling process parameters on tensile, dynamic mechanical properties of 3D printed polylactic acid materials / S. Wang, Y. Ma, Z. Deng et al. // Polymer testing. – 2020. – Vol. 86. – P. 106483.

115. Wang, W. Large-scale material extrusion-based additive manufacturing of short carbon fibre-reinforced silicon carbide ceramic matrix composite preforms / W. Wang, X. Gao, L. Zhang et al. // Virtual and Physical Prototyping. – 2023. – Vol. 18. – no. 1. – P. e2245801.

116. Wang, X. Effect of porosity on mechanical properties of 3D printed polymers: Experiments and micromechanical modeling based on X-ray computed tomography analysis / X. Wang, L. Zhao, J. Y. H. Fuh, H. P. Lee // Polymers. – 2019. – Vol. 11. – no. 7. – P. 1154.

117. WILA / WILA. – 2023. – URL: <https://www.wilatooling.com/en-us/> (дата обращения: 10.05.2023). – Текст : электронный.

118. Wilson Tool / Wilson Tool. – 2023. – URL: <https://wilsontool.com/en-us> (дата обращения: 10.05.2023). – Текст : электронный.

119. Wu, W. Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS / W. Wu, P. Geng, G. Li et al. // Materials. – 2015. – Vol. 8. – no. 9. – P. 5834-5846.

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

121. Zaragoza, V. G. Manufacturing and performance of 3D printed plastic tools for air bending applications / V. G. Zaragoza, K. Rane, M. Strano, M. Monno // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 66. – P. 460-469.

122. Zaragoza, V. G. Sheet metal bending with flexible tools / V. G. Zaragoza, M. Strano, L. Iorio, M. Monno // Procedia Manufacturing. – 2019. – Vol. 29. – P. 232-239.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акты внедрения

РТ

ООО НПО «РЕНОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ИНН/КПП 7701913185/773601001

Россия, 119331, г. Москва, вн. тер. г. Муниципальный округ Ломоносовский, ул. Кравченко, д. 12,
помещ. 11/1/П; тел.: +7 (499) 653-61-91; e-mail: info@renotech.org; веб-сайт: www.renotech.org

Утверждаю

Генеральный директор
ООО НПО «Реновационные технологии»



Половников В.В.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

**«Повышение эффективности изготовления инструмента для свободной
гибки листового металла путем применения аддитивных технологий в
условиях единичного и мелкосерийного производства» А.А. Шилейко на
соискание ученой степени кандидата технических наук**

Настоящим актом подтверждается, что полученная Шилейко Андреем Алексеевичем инженерная методика разработки и изготовления инструмента была учтена при разработке новой продукции. Изготовление инструмента с помощью аддитивных технологий помогло сократить срок изготовления образцов и ускорить запуск партии нового продукта.

Главный конструктор



Андрियाш И.А.



Соответствие требованиям ГОСТ Р ИСО 9001-2015 Сертификат № СДС.РТС.СМК.01972-23





МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический университет»
РТУ МИРЭА

просп. Вернадского, д. 78, Москва, 119454
тел.: (499) 600 80 80, факс: (495) 434 92 87
e-mail: mirea@mirea.ru, <http://www.mirea.ru>

№ _____

на № _____ от _____

АКТ

об использовании в учебном процессе материалов диссертационной работы Шилейко Андрея Алексеевича на тему «Повышение эффективности изготовления инструмента для свободной гибки листового металла путем применения аддитивных технологий в условиях единичного и мелкосерийного производства»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (далее – РТУ МИРЭА) настоящим Актом подтверждает, что результаты диссертационной работы Шилейко Андрея Алексеевича внедрены в учебный процесс Института перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА на кафедре цифровых и аддитивных технологий.

Материалы результатов исследований, полученные Шилейко А.А., используются в учебном процессе подготовки бакалавров (15.03.01) и магистров (15.04.01) по направлению «Машиностроение» при проведении практических и лабораторных занятий по дисциплинам:

- Технологии аддитивных производств;
- Технологии изготовления деталей методами пластической деформации



Первый проректор

Н.И. Прокопов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты испытаний образцов на растяжение

Таблица Б1 – Первоначальное поперечное сечение образца A_0

№ эксперимента, j	A_0 , мм ²						
	№ опыта						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
1	46,31	46,00	46,14	46,18	45,91	45,80	46,06
2	45,41	45,29	45,42	45,30	45,28	45,13	45,31
3	45,75	45,61	45,87	45,59	45,56	45,37	45,62
4	44,75	45,39	45,59	45,84	45,41	45,17	45,36
5	46,31	45,80	45,39	45,68	45,66	44,53	45,56
6	45,67	45,60	45,54	45,38	45,42	45,12	45,45
7	45,68	45,42	45,66	45,81	45,50	45,42	45,58
8	44,80	44,76	44,42	44,46	44,76	44,50	44,62
9	44,31	44,37	44,41	44,65	44,35	44,32	44,40
10	45,39	45,78	45,38	45,30	45,14	45,13	45,35
11	45,46	45,54	45,68	45,64	45,47	45,58	45,56
12	45,13	45,03	44,69	45,27	44,92	45,34	45,06

Таблица Б2 – Растягивающая нагрузка F

№ эксперимента, j	F, Н						
	№ опыта						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
1	816,10	812,70	814,10	797,00	821,90	840,90	817,12
2	650,00	642,00	665,40	782,00	760,60	677,30	696,22
3	865,70	924,80	906,30	924,40	902,00	879,70	900,48
4	587,90	554,90	672,30	599,70	757,40	698,80	645,17
5	806,20	849,20	766,70	786,60	876,90	853,90	823,25
6	782,30	838,50	814,90	833,80	854,20	793,30	819,50
7	881,70	1015,80	965,10	986,50	940,00	935,50	954,10
8	814,60	861,00	895,90	856,60	853,60	863,20	857,48
9	799,70	786,70	798,00	770,40	772,90	822,70	791,73
10	720,10	784,70	788,70	761,80	780,50	799,50	772,55
11	874,10	818,50	783,50	863,70	840,80	854,30	839,15
12	912,50	920,20	885,40	859,90	940,20	949,30	911,25

Таблица Б3 – Измененная расчетная длина образца Δl

№ экспери- мента, j	Δl , мм						
	№ опыта						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
1	1,42	1,31	1,37	1,34	1,48	1,43	1,39
2	0,99	0,94	1,02	1,24	1,26	1,06	1,09
3	1,32	1,81	1,69	1,76	1,69	1,48	1,62
4	0,91	0,91	1,07	0,92	1,33	1,21	1,06
5	1,27	1,44	1,23	1,38	1,68	1,93	1,49
6	1,27	1,41	1,35	1,39	1,42	1,28	1,35
7	1,33	1,80	1,93	1,82	1,80	1,60	1,71
8	1,48	1,63	1,65	1,54	1,56	1,80	1,61
9	1,32	1,28	1,32	1,33	1,16	1,42	1,30
10	1,12	1,31	1,33	1,40	1,53	1,38	1,35
11	1,45	1,33	1,32	1,43	1,41	1,48	1,40
12	1,66	1,63	1,53	1,47	1,74	1,81	1,64

Таблица Б4 – Прочность на растяжение

№ экспери- мента, j	σ , МПа						
	№ опыта						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
1	17,62	17,67	17,64	17,26	17,90	18,36	17,74
2	14,31	14,18	14,65	17,26	16,80	15,01	15,37
3	18,92	20,28	19,76	20,28	19,80	19,39	19,74
4	13,14	12,23	14,75	13,08	16,68	15,47	14,22
5	17,41	18,54	16,89	17,22	19,21	19,18	18,07
6	17,13	18,39	17,89	18,38	18,81	17,58	18,03
7	19,30	22,36	21,14	21,53	20,66	20,60	20,93
8	18,18	19,23	20,17	19,26	19,07	19,40	19,22
9	18,05	17,43	17,67	17,05	17,23	18,36	17,63
10	15,86	17,14	17,38	16,82	17,29	17,72	17,03
11	19,05	17,37	17,05	18,22	18,09	18,44	18,04
12	20,22	20,43	19,81	18,99	20,93	20,94	20,22

Таблица Б5 – Относительное удлинение

№ экспери- мента, j	ε, %						
	№ опыта						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
1	1,23	1,14	1,19	1,17	1,29	1,24	1,21
2	0,86	0,82	0,89	1,08	1,09	0,92	0,94
3	1,15	1,57	1,47	1,53	1,47	1,28	1,41
4	0,79	0,79	0,93	0,80	1,15	1,05	0,92
5	1,11	1,25	1,07	1,20	1,46	1,68	1,29
6	1,10	1,22	1,17	1,21	1,23	1,11	1,18
7	1,16	1,57	1,67	1,58	1,57	1,39	1,49
8	1,29	1,42	1,44	1,34	1,35	1,56	1,40
9	1,14	1,11	1,15	1,15	1,01	1,23	1,13
10	0,98	1,14	1,16	1,22	1,33	1,20	1,17
11	1,26	1,16	1,15	1,25	1,22	1,29	1,22
12	1,44	1,42	1,33	1,27	1,51	1,57	1,43

Таблица Б6 – Модуль упругости

№ экспери- мента, j	E, МПа						
	№ опыта						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
1	1691,05	1713,85	1698,03	1700,84	1685,70	1708,23	1699,62
2	1700,99	1682,49	1717,26	1705,41	1670,60	1689,59	1694,39
3	1849,05	1801,05	1819,23	1821,66	1826,31	1841,70	1826,50
4	1751,94	1697,67	1714,25	1728,67	1695,50	1712,53	1716,76
5	1778,54	1768,83	1793,27	1740,63	1730,50	1735,82	1757,93
6	1718,91	1756,52	1738,07	1760,88	1767,90	1772,10	1752,39
7	1858,68	1805,20	1779,49	1824,82	1814,19	1831,97	1819,06
8	1748,82	1686,65	1709,78	1695,72	1701,17	1693,27	1705,90
9	1709,07	1715,62	1718,80	1667,57	1660,19	1711,30	1697,09
10	1784,37	1736,67	1745,39	1721,71	1703,49	1748,31	1739,99
11	1769,22	1756,30	1783,41	1765,48	1734,61	1721,54	1755,09
12	1812,64	1822,07	1813,66	1772,19	1811,30	1800,18	1805,34

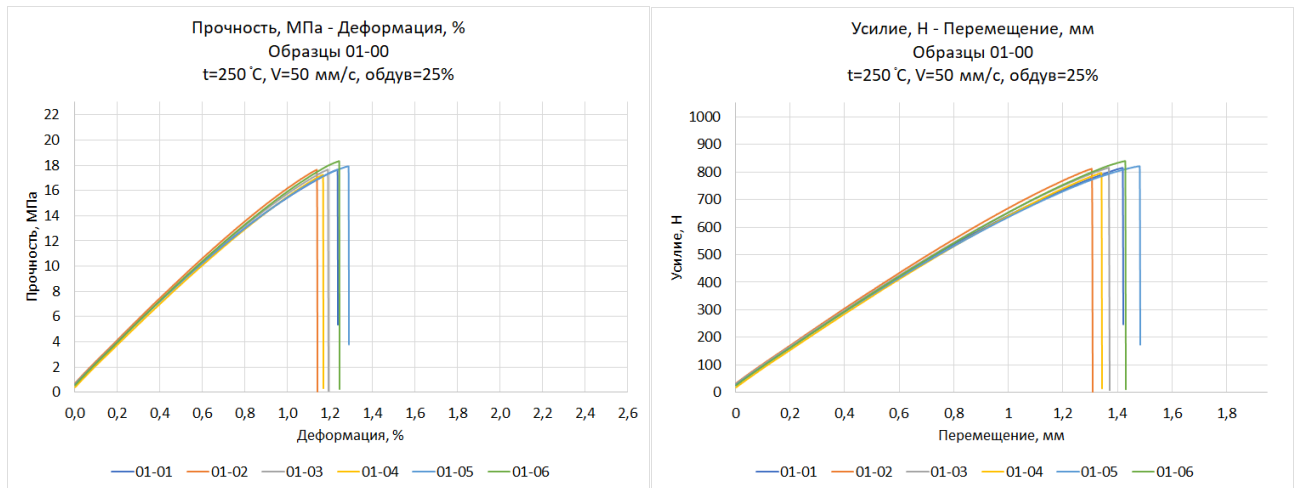


Рисунок Б1 – Графики для образцов 01-00.

Слева – «Прочность-Деформация», справа – «Нагрузка-Перемещение»

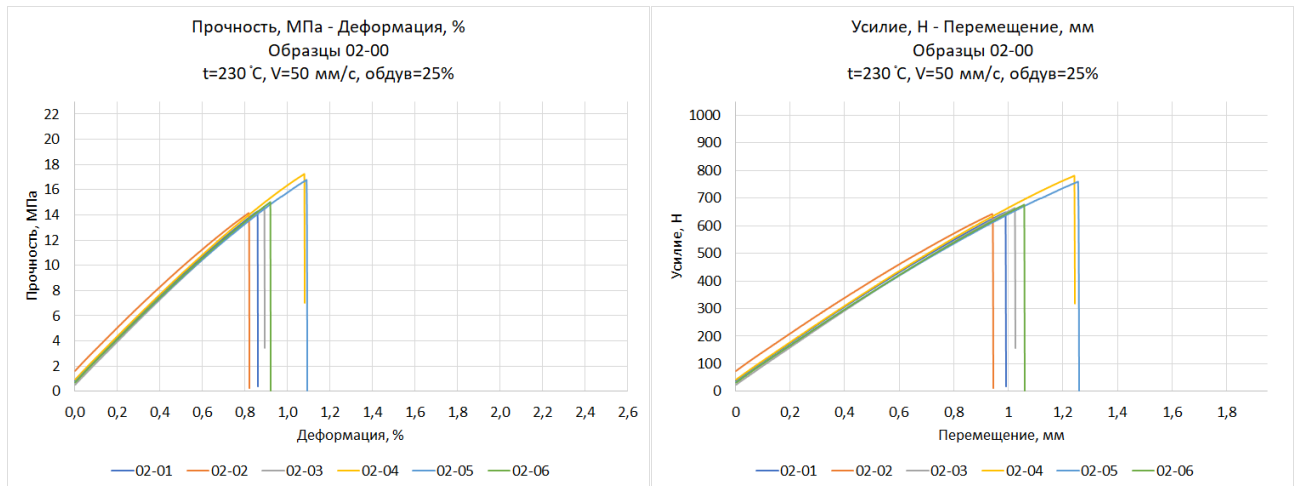


Рисунок Б2 – Графики для образцов 02-00.

Слева – «Прочность-Деформация», справа – «Нагрузка-Перемещение»

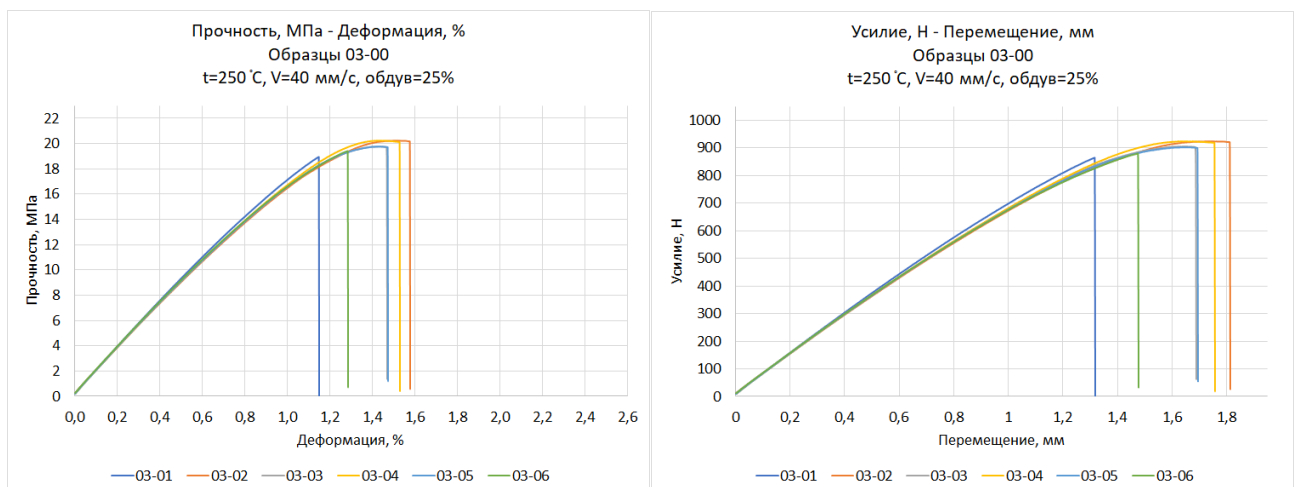


Рисунок Б3 – Графики для образцов 03-00.

Слева – «Прочность-Деформация», справа – «Нагрузка-Перемещение»

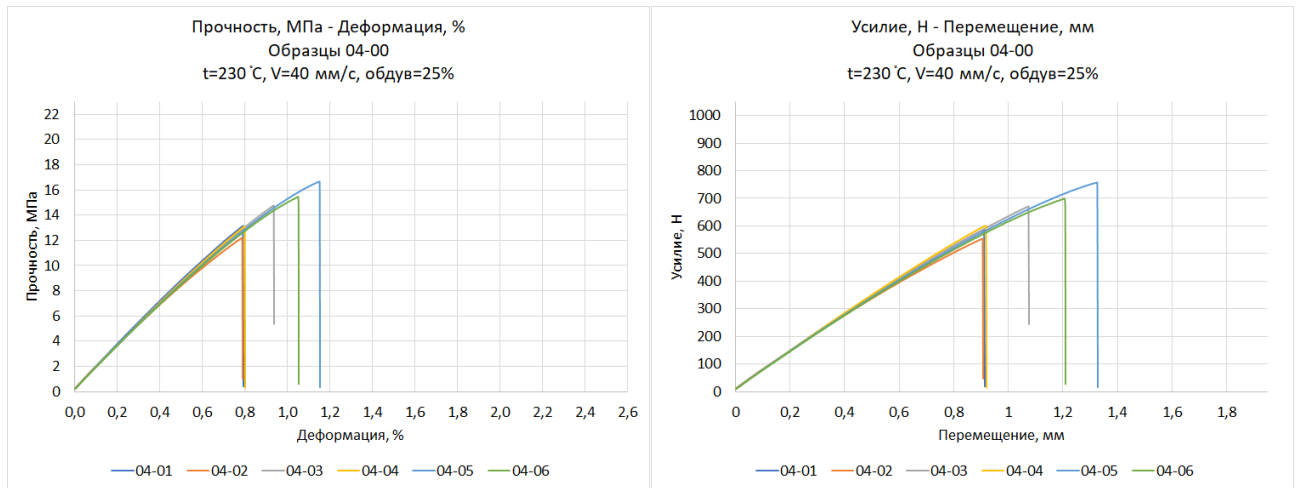


Рисунок Б4 – Графики для образцов 04-00.

Слева – «Прочность-Деформация», справа – «Нагрузка-Перемещение»

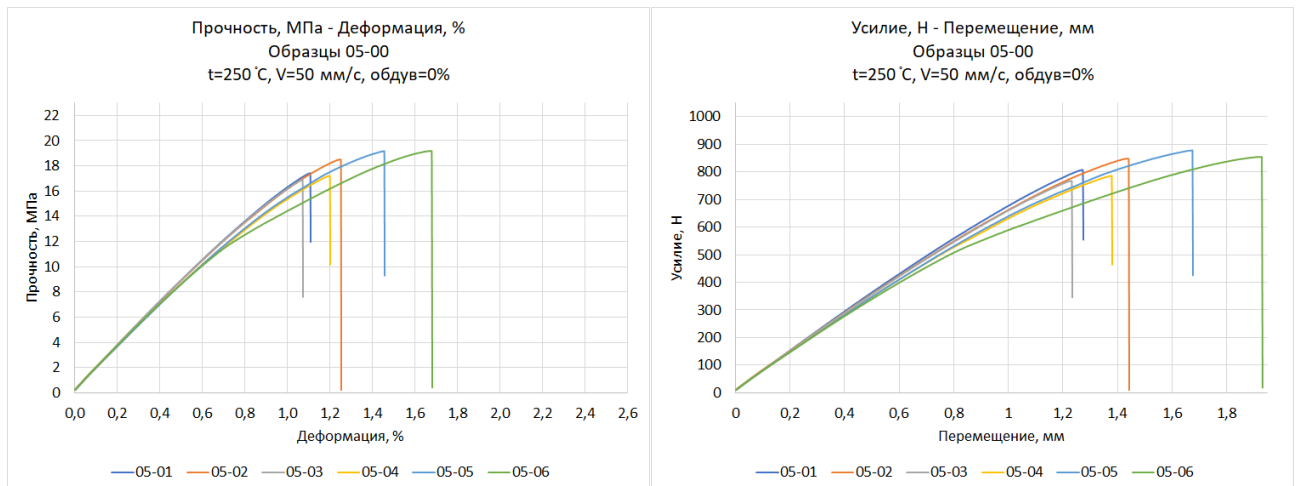


Рисунок Б5 – Графики для образцов 05-00.

Слева – «Прочность-Деформация», справа – «Нагрузка-Перемещение»

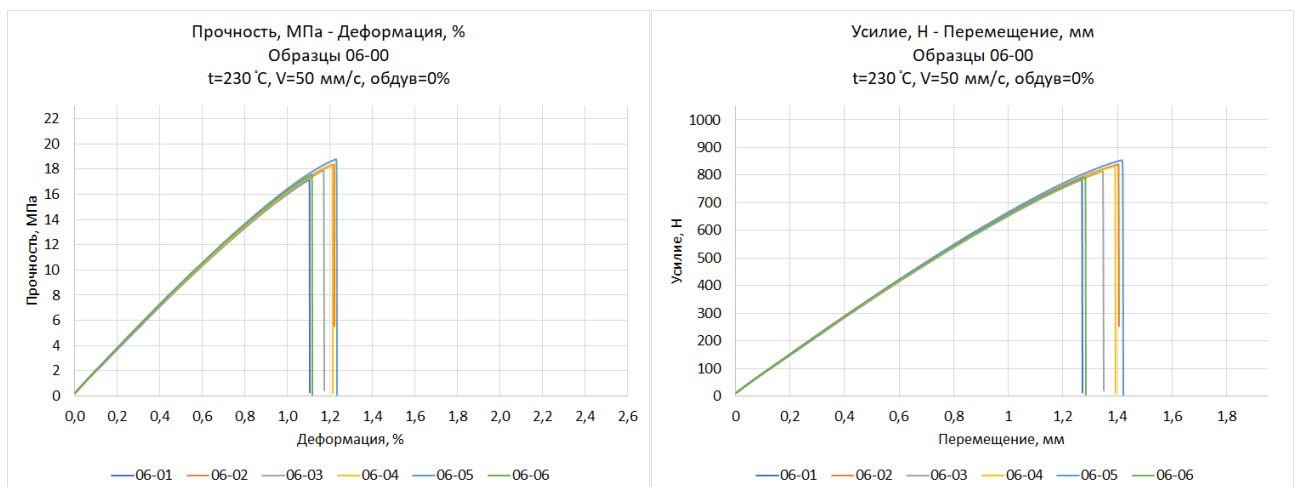


Рисунок Б6 – Графики для образцов 06-00.

Слева – «Прочность-Деформация», справа – «Нагрузка-Перемещение»

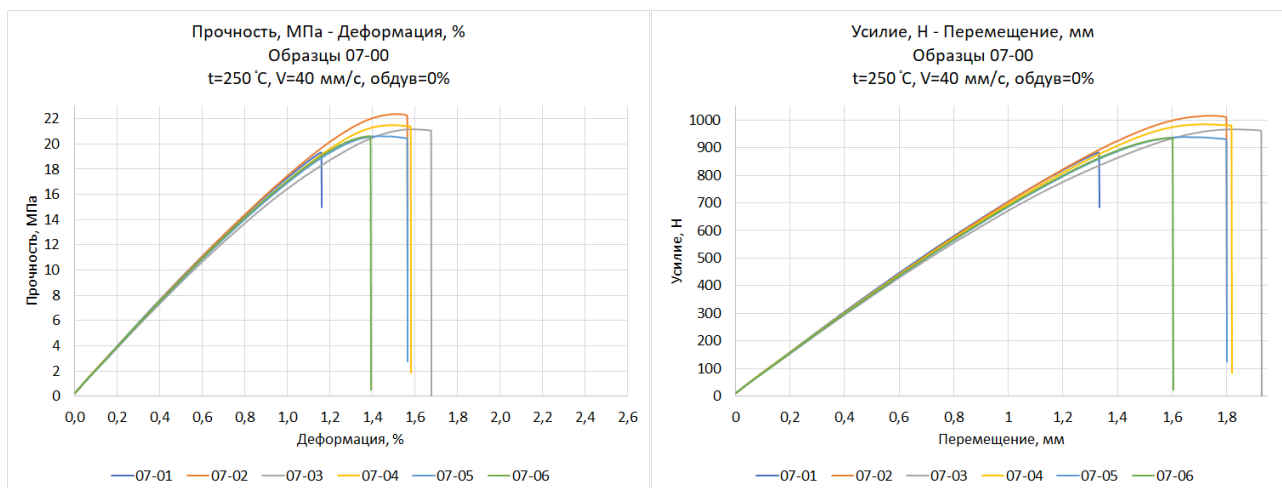


Рисунок Б7 – Графики для образцов 07-00.

Слева – «Прочность-Деформация», справа – «Нагрузка-Перемещение»

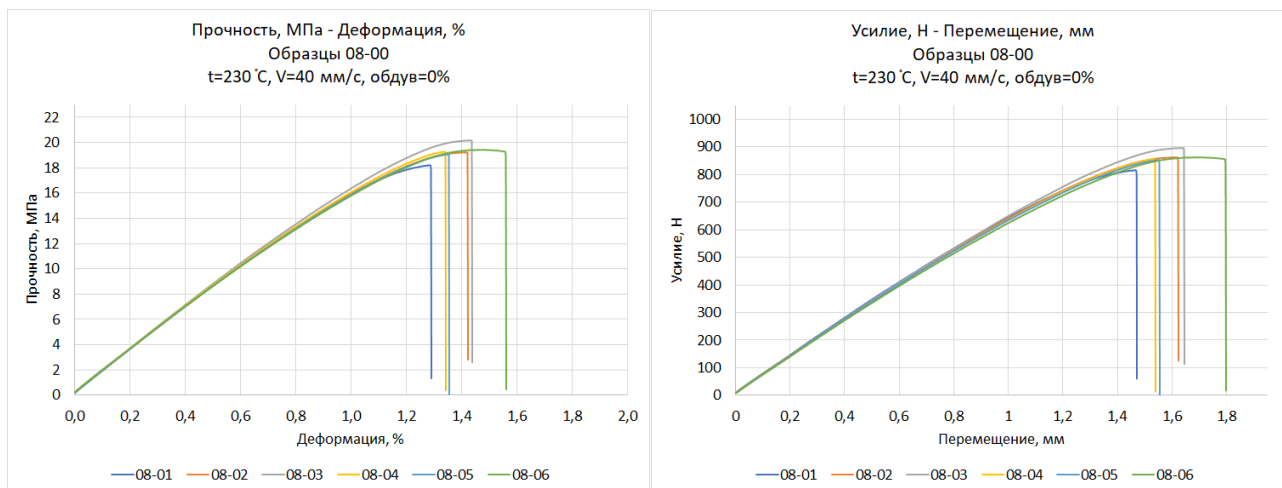


Рисунок Б8 – Графики для образцов 08-00.

Слева – «Прочность-Деформация», справа – «Нагрузка-Перемещение»

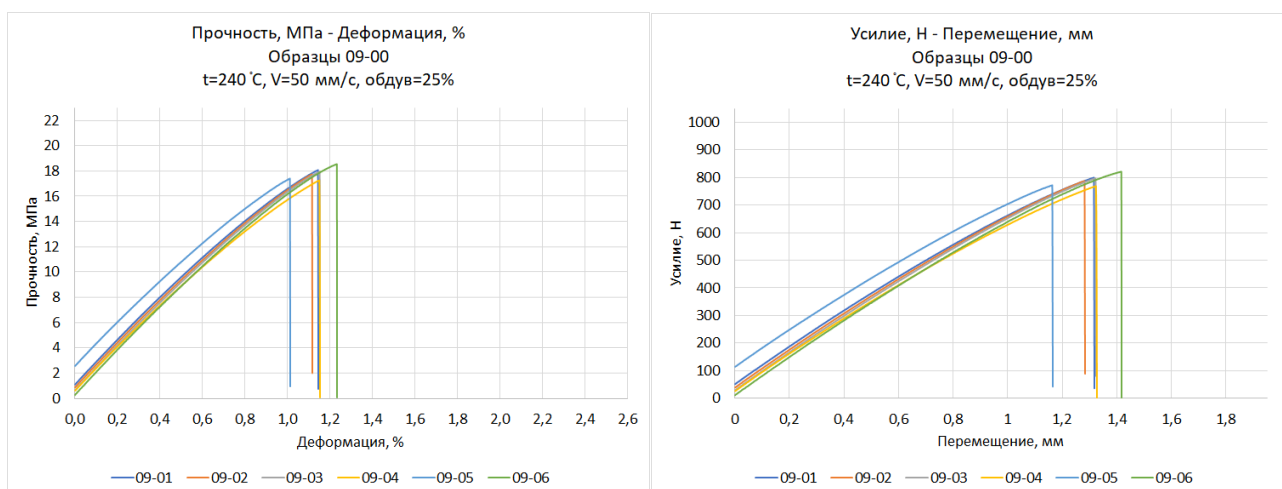


Рисунок Б9 – Графики для образцов 09-00.

Слева – «Прочность-Деформация», справа – «Нагрузка-Перемещение»

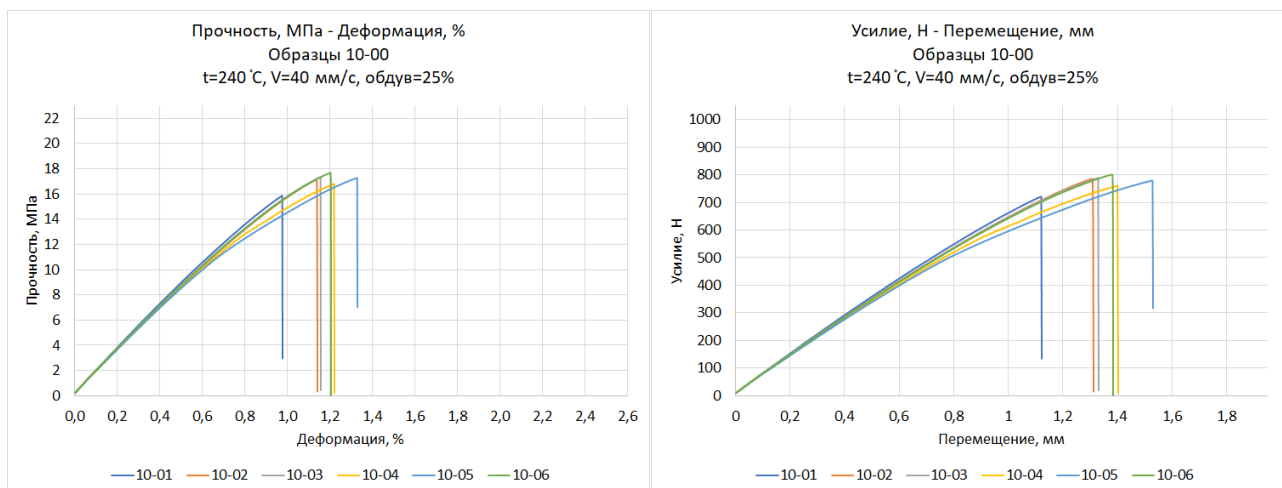


Рисунок Б10 – Графики для образцов 10-00.

Слева – «Прочность-Деформация», справа – «Нагрузка-Перемещение»

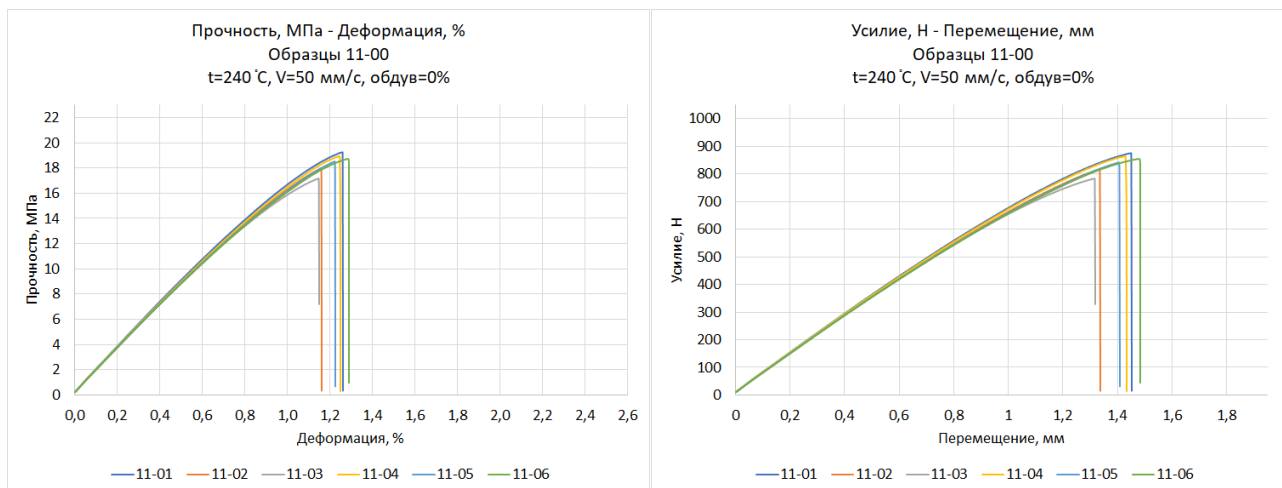


Рисунок Б11 – Графики для образцов 11-00.

Слева – «Прочность-Деформация», справа – «Нагрузка-Перемещение»

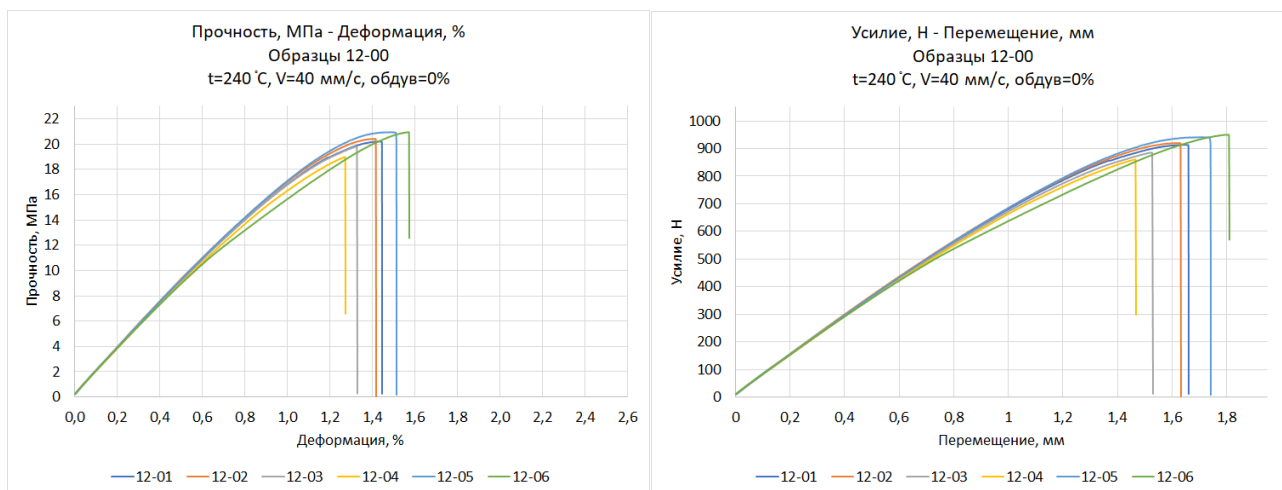


Рисунок Б12 – Графики для образцов 12-00.

Слева – «Прочность-Деформация», справа – «Нагрузка-Перемещение»

ПРИЛОЖЕНИЕ В**Исходные данные для программы QForm 12.0.2****Параметры заготовки:**

Материал заготовки «08кп cold»: плотность – 7851 кг/м, модуль Юнга – 203000 МПа, коэффициент Пуассона – 0,3.

Параметры инструмента:

Привод для пуансона: привод – гидравлический; направление движения – «-1», номинальная скорость 5 мм/с, максимальная сила – 120 МН.

Привод для матрицы: привод – неподвижный.

Смазка: отсутствует

Материал пуансона «42CrMo4; 1.7225»: модуль Юнга – 210000 МПа, коэффициент Пуассона – 0,29, предел текучести – 1020 МПа, параметр упрочнения – 0,028, плотность – 7716 кг/м³.

Материал матрицы «PLA»: модуль Юнга – 2960/3070 МПа (сжатие/растяжение), коэффициент Пуассона – 0,35, предел текучести – 77,4/31,2 МПа (сжатие/растяжение), параметр упрочнения – 0,001, плотность – 1240 кг/м³,

Температура: 20 °С

Условия остановки. Перемещение инструмента: 10 мм