

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский политехнический университет»

На правах рукописи

**ЧАН ДИНЬ ХЫНГ**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
МИКРОШТАМПОВКИ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЦВЕТНЫХ  
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ, С ПРИМЕНЕНИЕМ ШТАМПОВОГО  
ИНСТРУМЕНТА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДАМИ 3D-ПЕЧАТИ**

Специальность 2.5.7 «Технологии и машины обработки давлением»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: к.т.н., Dr.-Ing., доц. Петров Михаил Александрович

Москва – 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	9
<b>Глава 1. Микроштамповка</b>	16
1.1 Становление направления микроштамповки	16
1.2 Размерные уровни, термины и определения	18
1.3 Понятие размерных эффектов в микроштамповке	19
<b>Глава 2. Разработка технологии микроштамповки</b>	25
2.1 Методика проектирования технологии	25
2.2 Краткое описание операций вырубка и вытяжка	27
2.3 Качество поверхности и контактное трение	32
2.4 Определение механических свойств исследуемых материалов	36
2.5 Испытательное оборудование и деформирующий инструмент	42
2.6 Теоретический расчёт основных технологических параметров	43
<b>Глава 3. Численное моделирование процесса микродеформирования</b>	44
3.1 Постановка расчётной задачи	47
3.2 Изучение процесса микровырубки круглых заготовок	49
3.3 Изучение процесса микровытяжки детали «Стаканчик»	50
3.3.1 Влияние трения на процесс	51
3.3.2 Моделирование вытяжки с процессом теплообмена	55
3.3.3 Влияние коэффициента вытяжки на утонение стенки	59
3.3.4 Складкообразование в процессе микровытяжки	62
3.4 Влияние несоосности инструмента на результат микровытяжки	69
3.5 Взаимосвязь технологических параметров процесса микровытяжки	69
3.5.1 Построение линейного уравнения регрессии	70
3.5.2 Построение пятифакторной модели максимальной силы деформирования	82
<b>Глава 4. Оборудование и деформирующий инструмент</b>	91
4.1 Испытательное оборудование	91
4.1.1 Классическая испытательная машина	93
4.1.2 Специализированное оборудование	94
4.2. Изготовление штамповой оснастки	96

4.2.1 Подготовка 3D-моделей	101
4.2.2 Подготовка фасетной модели и управляющей программы	101
4.2.3 Технологии 3D-печати	102
4.2.3.1 Технология экструзионной печати	106
4.2.3.2 Технология печати порошковыми материалами	107
4.2.3.3 3D-печать деталей оснастки и пост-обработка	110
4.3 Контроль точности изготовления деталей и сборки при помощи 3D-сканирования	113
4.4. Определение шероховатости поверхности прототипов	126
<b>Глава 5. Износ контактных поверхностей</b>	128
5.1. Описание эксперимента по схеме «стержень по пластине»	130
5.2. Проведение КЭ-моделирования износа инструмента при микровыдавливании	131
5.3 Определение коэффициента износа материала	135
<b>Глава 6. Экспериментальные исследования микродеформирования</b>	144
6.1 Микровытяжка детали «Стаканчик»	144
6.2 Микроформовка детали «Пластина»	149
<b>Выводы по работе</b>	151
<b>Заключение</b>	154
<b>Библиографический список</b>	155
<b>Приложения</b>	175
Приложение 1. Публикации по теме диссертации	175
Приложение 2. Механические испытания материалов	178
Приложение 3. Результаты теоретических расчётов технологического процесса	181
Приложение 4. Результаты 3D-печати инструментов	183
Приложение 5. Результаты микровырубки и микровыдавливания	185
Приложение 6. Дефекты и повреждение деталей инструментов	187
Приложения 7. Акт внедрения в учебный процесс в РФ	188
Приложения 8. Акт внедрения в учебный процесс в СРВ	189

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

Параметр	Ед. измерения	Название
$a_0$ и $b_0$	-	сдвиг прямой по оси ординат
$a_1^{cp}$ и $b_1$	-	наклон прямой к оси абсцисс
$B$	-	степень вытяжки
$C$	мм	односторонний зазор между пуансоном и матрицей
$D_{II}^r$	мм	текущий диаметр пуансона
$D_{II}^b$	мм	базовый диаметр пуансона, принят равным 8
$D_1'$	мм	наружный диаметр
$D_2'$	мм	максимальный внутренний диаметр
$D_3'$	мм	минимальный внутренний диаметр
$d_w$	мм	диаметр круглого отпечатка
$d$	мкм	средний размер зерна или кристаллита
$E$	ГПа	модуль упругости
$F_{max}$	Н	максимальная сила деформирования
$F_{max}^{cm}$ и $F_{max}^{b/cm}$	Н	максимальная сила деформирования со смазкой и без смазки, соответственно
$F_{пр}$	Н	сила прижима
$F_{выр}$	Н	сила вырубки
$F_N$	Н	нормальная сила реакции опоры
$h$	мм	высота сегмента
$h_{II}$	мм	перемещение пуансона
$h_3$	мм	высота заусенца
$H$	-	степень влияния смазки на макс. силу деформирования
$H_1'$	мм	минимальное расстояние или минимальная высота складки

$H_2'$	мм	максимальное расстояние или минимальная высота складки
НВ	МПа	твёрдость стержня (по Бринеллю, НВ)
К	-	отношение величины зазора к исх. толщине заготовки
k	-	поправочный коэффициент
$k_c$	Н/мм	жёсткость пружины
$K_{пр}$	МПа	прочностной коэффициент
$K_{изн}$	-	коэффициента износа
$K_v$	МПа	модуль объёмной упругости жидкости
$K_{c/t}$	-	коэффициент, характеризующий отношение зазора С к толщине заготовки
$k_y$	-	коэффициент утяжки
$k_{п}$	-	коэффициент блестящего пояска
$k_c$	-	коэффициент скола
$k_x$	-	коэффициент непрямолинейности
$k_{\alpha}$	-	коэффициент угла
L	мм	периметр заготовки
$m_{тр}$	-	фактор трения
m	-	коэффициент вытяжки
n	-	показатель деформационного упрочнения
N	-	степень вытяжки
$P_1$	МПа	давление в ЗСК
$P_m$	МПа	нормальное давление при наличии смазки
q	МПа	распределённое давление, для латуни 1,5
R	мм	исходный радиус сферической части стержня
$R_M$	мм	радиус матрицы
$\epsilon_0, \epsilon_{45}, \epsilon_{90}$	-	коэффициент пластической деформации вдоль направления прокатки (ВП), по

		диагонали к направлению прокатки (ДП), под 45°, и перпендикулярно к направлению прокатки (ПП), соответственно
$S_{\text{рск}}$	мм	расстояние скольжения
$t_0$ или $s_0$	мм	исходная толщина заготовки
$t_0^*$ или $s_0^*$	мм	относительная толщина заготовки
$t_{\text{мин}}$	мм	минимальная толщина заготовки
$t_{\text{мин}}^\lambda$	мм	минимальная толщина подобной заготовки
$V$	мм/с	скорость деформирования
$W$	мм <sup>3</sup>	объем износа материала
$\alpha_{\text{рс}}$	-	доля реальной поверхности контакта
$\alpha$	-	доля поверхности контакта
$\beta$	-	показатель Лоде
$\Delta_1$	-	коэффициент, определяющий первый или второй вид оптимального зазора
$\Delta_2$	-	коэффициент, учитывающий влияние скорости деформирования
$\Delta$	%	степень утонения стенки
$\delta$	%	относительное удлинение
$\varepsilon$	-	логарифмическая деформация, $\ln(1+\varepsilon)$
$\varepsilon_{\text{ш}}$ и $\varepsilon_{\text{т}}$	-	логарифмическая деформация по ширине и по толщине образца
$\dot{\varepsilon}$	с <sup>-1</sup>	скорость деформации
$\lambda$	-	коэффициент подобия
$\mu$	-	коэффициент трения
$\mu_{\text{ст}}$	-	коэффициент сухого трения
$\nu$	-	коэффициент Пуассона
$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	плотность материала

$\sigma_T$	МПа	нормальное напряжение
$\sigma_B$	МПа	предел кратковременной прочности
$\sigma_{сд}$	МПа	сопротивление сдвигу
$\sigma_T$	МПа	напряжение текучести
$\sigma_T^*$	МПа	напряжение, связывающее напряжение текучести и технологические параметры
$\tau$	МПа	касательное напряжение
$\tau_{срез}$	МПа	напряжение среза

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И АББРЕВИАТУР

БФП	базовый фотополимер
ГУ	граничные условия
ЗРМ	заходное ребро матрицы
ЗСК	закрытые смазочные карманы
ИРП	исчерпание ресурса пластичности
КПФП	керамоподобный фотополимер
КЭ	конечный элемент
МКЭ	метод конечных элементов
МПЭ	многофакторное планирование эксперимента
ОСК	открытые смазочные карманы
ПЭТГ	полиэтилентерефталат-гликоль
DMLS	прямое лазерное спекание металла
DTP	Digital Twin Prototype, цифровой двойник прототипа
FFF	формообразование плавящейся проволокой
FDM	прямое моделирование плавлением
LCD	фотополимеризация с помощью ЖК-экрана
SLM	селективное лазерное сплавление

## **ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность.** Сверхмелкие или миниатюрные детали, размером от нескольких десятков микрометров до нескольких миллиметров, изготовленные в основном из металлов и цветных сплавов методами ОМД, применяемые в микроэлектронике, измерительных приборах и биомедицинской промышленности, довольно распространены. Таким образом, исследование технологии микроштамповки имеет важное значение. Кроме того, многообразие инструмента и его высокая трудоёмкость изготовления заставляет задуматься о более прогрессивных способах его изготовления. Одним из таких способов являются технологии 3D-печати, которые обладают уникальными преимуществами, по сравнению с технологиями механической обработки, в части простоты подготовки и изготовления сложных контуров. Однако вопрос износа поверхности и стойкости практически нигде не рассматривается.

**Объектом исследования** являются заготовки и детали из цветных металлов и сплавов.

**Предметом исследования** являются инструменты для процесса чистовой микровырубки и микровытяжки из металлических сплавов и полимеров, полученные методом 3D-печати.

**Цель диссертационной работы.** Разработка теоретических основ технологического процесса микроштамповки, с учётом влияния качества поверхности штампового инструмента, полученного методами 3D-печати.

В работе решались следующие **задачи**: 1) Исследовать технологические факторы, влияющие на процесс формоизменения детали типа «Стаканчик»: размер исходной заготовки, коэффициент трения на контактной поверхности, зазор между пуансоном и матрицей, точность позиционирования и сборки, и другие 2) Подготовить геометрические 3D-модели инструментов и реологические модели характеристики поведения материала, для дальнейшего моделирования процесса листовой

микроштамповки. Изготовить деформирующий инструмент основываясь на полученных 3D-моделях, проверить качество изготовления и сборки бесконтактным методом на основе 3D-сканирования и выполнить оценку влияния точности изготовления на результат штамповки. 3) Провести имитационное моделирование для анализа и оценки влияния технологических параметров на критическое значение деформации и появление дефекта в виде складок. 4) Изучить факторы, влияющие на износ инструмента с применением численного моделирования (определить контактные давления), а также натуральных экспериментов (определить коэффициент износа) на парах трения, изготовленных разными технологиями 3D-печати. 5) Определить максимальную силу деформирования при микровытяжке детали «Стаканчик». 6) Исследовать результат разделительной операции листовых заготовок, толщиной не более 100 мкм, предназначенных под последующий процесс микровытяжки детали «Стаканчик». 7) Исследовать формообразование деталей-представителей из цветных сплавов в процессе микроштамповки. 8) Сравнить полученные результаты на основании серии экспериментов и численного моделирования (выполнить процедуру валидации) для детали «Стаканчик» из медной заготовки.

**Научная новизна** заключается в: 1) комплексных исследованиях на миниатюрных инструментах, полученных по технологиям аддитивного производства; 2) математической модели в виде пятифакторного уравнения регрессии изменения максимальной силы деформирования от технологических параметров; 3) результатах экспериментальных исследований, полученных на специализированном стенде, представляющем из себя мехатронную систему, оснащённую датчиками измерения силы и контроля перемещения пуансона; 4) оценке точности инструментов для формообразующей и разделительной операций для микродеформирования при помощи бесконтактной системы 3D-сканирования.

**Практическая значимость** может быть охарактеризована следующими положениями:

1) Разработана технология микроштамповки деталей, которые могут быть применены в реальном секторе экономики, например, при разработки миниатюрных устройств, например, микроробототехника, микрохирургия и другие.

2) Изготовлены детали-демонстраторы, имеющие осесимметричную (операция микровытяжки) и вытянутую (операция микропрофилирования) формы.

3) Изготовлены рабочие инструменты для пластического деформирования листовой заготовки, размером от 20 мм и менее, методами 3D-печати, что указывает на возможность применения аддитивных технологий в этой области.

4) Результаты исследований были внедрены в учебный процесс для направления подготовки 15.04.01 «Машиностроение» и используются при чтении лекций и проведении лабораторных занятий по дисциплине «Моделирование процессов листовой и объёмной штамповки».

**Предполагаемое внедрение.** На промышленных предприятиях серийного производства, специализирующихся на выпуске радио- и микроэлектронных компонентов. Результаты работы были внедрены в учебных процессах по направлениям подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет» (г. Москва, Российская Федерация) и 7510201 «Машиностроение» в университете «Чан Дай Нгхиа» (г. Хошимин, Социалистическая Республика Вьетнам). Акты внедрения размещены в Приложениях 7 и 8, соответственно.

**Методы исследования и достоверность результатов.** При выполнении работы применялись методы математического и численного моделирования, в которых применяются законы механики твёрдого тела и стандартные алгоритмы оптимизации, в частности, аппроксимация

функции. Использовались современные лицензионные программы для расчёта технологических процессов обработки давлением Abaqus и QForm, а также инструменты реконструкции 3D-моделей и цифровой метрологии, представленные программами RV 3D Studio и GOM Inspect, соответственно.

Достоверность получения технологических данных и их влияние на результат моделирования были подтверждены методикой, разработанной и опробованной в лабораторных условиях и при реализации учебного процесса.

Основные научные положения, а также выводы и рекомендации имеют теоретическое и практическое обоснование, которые не противоречат имеющимся литературным данным.

**Личный вклад** соискателя состоит в:

- непосредственном участии автора при проведении работ по подготовке специализированного оборудования для микродеформирования;
- выполнении экспериментов по микровырубке и микровыдавливанию, определению механических свойств полос из Л63 и М1, толщиной 100 мкм;
- проведении экспериментов и изучении износа рабочей поверхности инструмента;
- подготовке 3D-геометрии и печати деформирующего инструмента из металлов и полимеров;
- 3D-сканировании изучаемых объектов;
- выполнении конечно-элементного моделирования процесса микровытяжки (более 180 расчётов), с последующим анализом и валидацией полученных результатов.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) Подготовка геометрической 3D-модели инструмента для процесса листовой микроштамповки. Для исследования размерного эффекта используются аффинные преобразования, геометрическое подобие. Коэффициент подобия (КП) или масштабирования (КМ)  $\lambda$ , который в

данном исследовании принимает значения от 1 до 0,25 с множителем 0,5 используется для пропорционального уменьшения геометрических параметров заготовки и штампа. В работе рассматривается диапазон размеров 1...8 мм, так как для работы в этом диапазоне не требуется применения микроскопов с целью перемещения заготовки.

2) **Подготовка реологической модели** характеристики поведения материала. Определение механических свойств тонколистовых заготовок из меди М1 и латуни Л63, толщиной 100 мкм, используемых в качестве исходных заготовок для процесса микроштамповки, посредством серии экспериментов на одноосное растяжение для трёх коэффициентов подобия.

3) **Разработка специализированного оборудования** настольного исполнения для определения силы деформирования, возникающей в процессе микроштамповки.

4) **Изготовление матричных вставок** по разным технологиям 3D-печати и других деталей деформирующего инструмента, с выполнением сопутствующих доделочных операций или пост-обработки, контролем точности сборки и определением результата влияния неточности сборки на качество детали.

5) **Выполнение компьютерного моделирования**, состоящего из трёх блоков: геометрическое моделирование (CAD), моделирование технологического процесса (CAE) и проверка геометрической точности (CAI) размеров готового изделия на основании результатов оптического 3D-сканирования на основе структурированного подсвета. В объем моделирования технологического процесса включено моделирование разделительной операции, операции вытяжки стаканчика с разными условиями оформления сглаживания заходного ребра матрицы, силовыми характеристиками прижимного кольца, коэффициентами трения. Для всех вариантов рассматривался один и тот же набор коэффициентов геометрического подобия ( $\lambda$ ): 1; 0,5; 0,25 или 1; 1/2; 1/4

6) **Построение математической модели**, показывающей влияние пяти факторов (зазор между пуансоном и матрицей ( $C$ ), радиус скругления матрицы ( $R_m$ ), коэффициент трения ( $\mu$ ), сила прижима ( $F_{пр}$ ) и коэффициент вытяжки ( $m$ )) на силу деформирования процесса микровытяжки при помощи КЭ-моделирования.

7) **Исследование износа матрицы** в области заходного радиуса разделено на 3 основных блока, основанных на теоретической модели износа Арчарда: распределение поверхностного давления по радиусу матрицы, влияние геометрической формы матриц на распределение поверхностного давления, расчет коэффициента износа материалов.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы были представлены на следующих конференциях:

1) XXXIII-ья Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС-2021) (Москва, 30 ноября – 2 декабря 2021 г.);

2) Всероссийской научно-практической конференции «Наука – Общество – Технологии – 2022» (Москва, 1 – 4 марта 2022 г.);

3) Международная научно-практическая конференция RusMetalCon, «Материаловедение и металлургические технологии» (Челябинск, 7 сентября 2022 г.);

4) Всероссийской научно-практической конференции «Наука – Общество – Технологии – 2023» (Москва, 27 февраля 2023 г.);

5) Международной научно-практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов» (Томск, 26 апреля 2023 г.);

6) Международный форум «Моделирование процессов штамповки, прокатки и прессования в QForm» (Москва, 28 сентября 2023 г.);

7) XXXV-ая Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС-2023) (Москва, 13 – 14 ноября 2023 г.);

8) Всероссийскую научно-техническую конференцию студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» (Тула, 2023);

9) 34-ая Международная конференция по компьютерной графике, обработке изображений и машинному зрению, системам визуализации и виртуального окружения (ГрафиКон 2024) (Омск, 17 – 19 сентября 2024 г.).

По теме работы сделано 9 докладов, представленных на студенческих, всероссийских и международных научных конференциях.

**Публикации.** Основные результаты работы опубликованы в 16 печатных работах. Всего в перечне ВАК по шифру специальности 7 работ. Полный перечень публикаций указан в приложении 1.

## ГЛАВА 1. МИКРОШТАМПОВКА

### 1.1 Становление направления микроштамповки

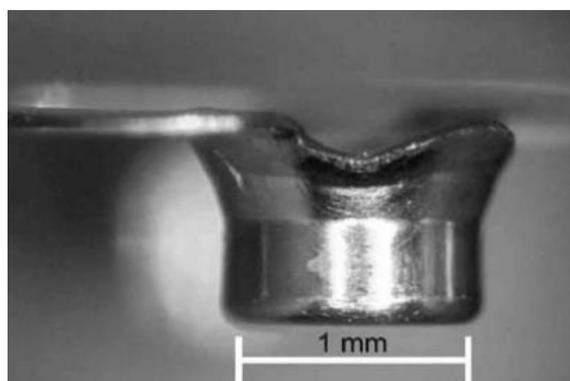
Растущий спрос на конкурентоспособные портативные устройства (гаджеты) и их миниатюризация демонстрирует потребность в разработке новых технологических процессов для микропроизводства. Микроштамповка является надежной технологией изготовления металлических деталей в микромасштабе с высокими стандартами точности. Миниатюризация размера изделия требует изготовления соответствующего инструмента, с контролем размеров до десятых или сотых долей миллиметров. Толщина листового материала также меняется и может изменяться от нескольких миллиметров до нескольких микрометров.

Одной из главных задач этой технологии является перенос результатов испытаний в лабораторных масштабах, на реальное промышленное производство, избегая при этом снижение коэффициентов использования металла (КИМ). Численное моделирование процесса микроштамповки предлагает привлекательную альтернативу реальным физическим экспериментам, требующим высоких затрат для повторного выполнения. Моделирование методом конечных элементов (КЭ) является мощным инструментом и предназначено для прогнозирования результатов реального процесса микроштамповки, выполняемого в различных технологических условиях.

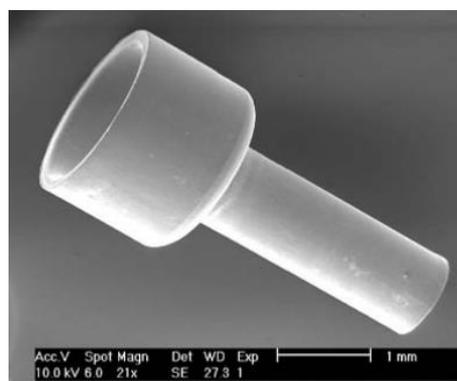
В своей работ Гайгер, Экштайн, Энгель и другие, опубликованной в 2001 г. представили обзор технологий микродеформирования, включая вытяжку, вдавливание, формовку, выдавливание, прессование, редуцирование, вырубка, пробивка и ряд других операций (рис. 1.1) [1].

И Гайгер, и Фоллертсен с коллегами указывают на то, что потребители изделий, полученных методами микроштамповки, непрерывно

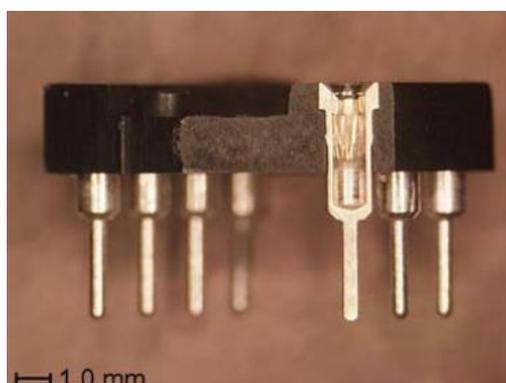
увеличивается, при этом основными потребителями являются компании, производящие микроэлектронные изделия и компоненты [1,4,5].



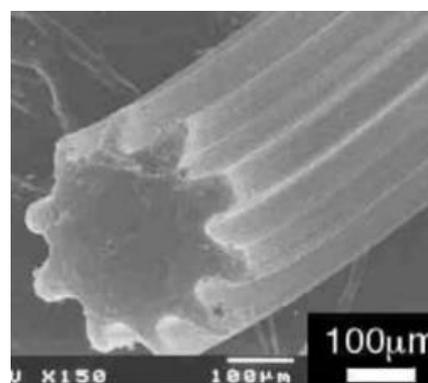
а) крышка электронной пушки



б) вал микромотора



в) контакты микросхемы



г) вал-шестерня

Рисунок 1.1. Примеры деталей, полученных микроштамповкой [1]

Представление о прикладных, производственных технологиях трансформируются по мере развития фундаментальных исследований. С появлением высокотехнологичных отраслей, например, микроэлектронной промышленности, в технологиях заготовительного производства стали выделять направление по изготовлению микродеталей и изделий [2]. Лавируя между размером изделий и их требуемым количеством, общая доля заготовительного производства не уменьшилась. Наоборот, массовое производство микродеталей заставляет более тщательно подходить к разработке производственной технологии, чтобы не допустить большого процента брака.

Разработка микропроцессов проводится согласно общепринятым подходам. Отличием при этом является сочетание многочисленных нюансов, большая часть из которых хорошо укладывается в теорию подобия и, поэтому, может быть предсказана на этапе проектирования.

За последние три десятилетия появились обзорные статьи по направлению микродеформирования [3,8,9,10,15,16]. Можно сказать, что это направление продолжает развиваться, но требует весьма тщательных фундаментальных исследований.

## 1.2 Размерные уровни, термины и определения

В англоязычной литературе уже два десятилетия существует устоявшийся термин «микроштамповка», указывающий на то, что технология штамповки отнесена к микроуровню. В современной практике к микроштамповке можно также отнести и процессы, при реализации которых извлечение деталей ручным способом невозможно в силу их малости. То есть границы микроштамповки можно распространить и на детали с наибольшим размером 20 ...30 мм, на которых, однако, размерные эффекты выражены в меньшей степени. Под термином «микроштамповка» (листовая или объёмная, в холодном или горячем состояниях) будем понимать набор операций обработки материалов давлением, выполняемых на мезо и микроуровне, т.е. в диапазоне 1...10 мм (наименьший диапазон макроуровня или переходный «мезоуровень») и в диапазоне 10 мкм... 1 мм («микроуровень»). В работе будем рассматривать диапазон 1...8 мм, так как для работы в этом диапазоне не требуется применения микроскопов с целью перемещения заготовки и листовой детали.

Для изделий микро-уровня в англоязычном пространстве существуют такие термины, как *microforming* (микродеформирование), *microstamping* (микроштамповка), *miniaturized* (миниатюрный) и другие. Сложность изготовления малоразмерных изделий заключается в необходимости

применения дополнительных средств объективного контроля процесса и манипуляции/позиционирования, а также специализированного оборудования.

На рис. 1.2 показана размерная шкала, наглядно показывающая уровни технологические уровни, оперирование на которых не всегда возможно традиционными инструментами. Так, на наноуровне наилучшим инструментом будет являться атомно-силовой микроскоп, способный бесконтактно, на основе взаимодействия полей атомов, перемещать отдельные атомы и формировать таким образом наноструктуры. Таким образом микромир не полностью может быть воссоздан инструментами микродеформирования, так как с уменьшением размеров растёт и точность изготовления, что усложняет работу традиционными технологиями.

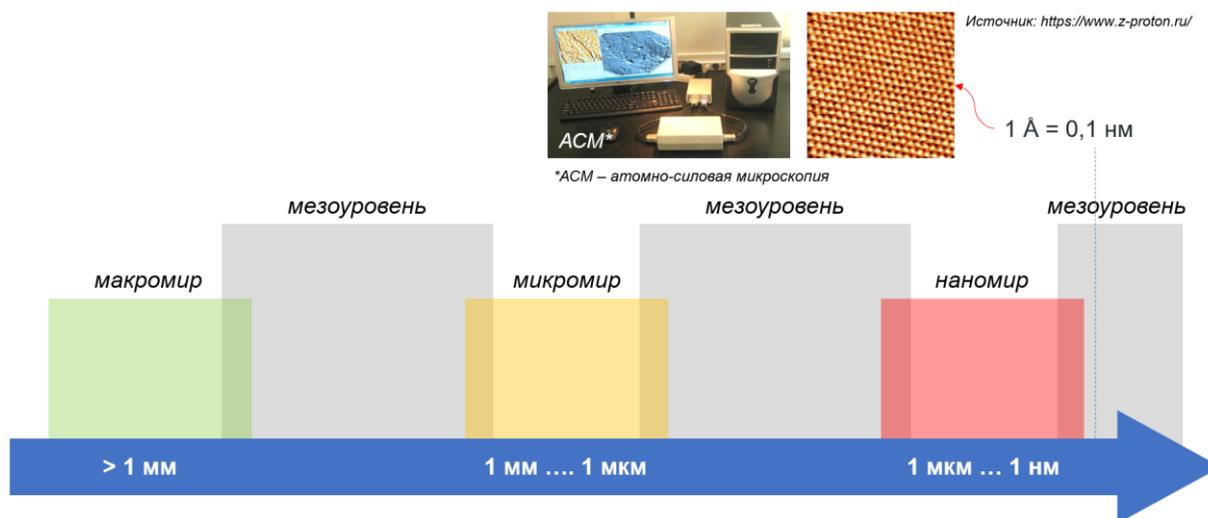


Рисунок 1.2. Размерные уровни

### 1.3 Понятие размерных эффектов в микроштамповке

Основной фундаментальной предпосылкой для разработки технологии микроштамповки остаётся уравнение Холла-Петча [20,21,22], основывающегося на теории дислокаций, согласно которому с уменьшением размера зерна происходит существенный рост прочностной характеристики изделия, согласно уравнению (1.1), для определённой степени деформации

( $\varepsilon$ ), что приводит к снижению пластических свойств. Иными словами, существует минимальный размер зерна, разрушение которого потребует достаточно высоких напряжений. Соответственно, пластичность металлического образца обусловлена дефектами поликристалла, являющегося совокупностью большого числа кристаллитов или зёрен, имеющих разный размер. Так как размеры зёрен могут изменяться в диапазоне макро- (до 1 мм), микро- (от 1 мм до 1 мкм) и нано-шкал (от 1 мкм до 1 нм), а также иметь промежуточные (мезо-) уровни, то встаёт вопрос об изучении технологических особенностей процесса деформирования на каждом из уровней. В связи с этим появляются отдельные научные направления по изучению материалов и технологий на разных размерных уровнях.

$$\sigma_T = \sigma_0 + \frac{u}{\sqrt{d}} \quad (1.1)$$

где  $\sigma_0$  – напряжение, необходимое для инициализации движения дислокаций, напряжение, которое характеризует меру межзёренного трения (например, для меди  $\sigma_0 = 20...25$  МПа, для алюминия  $\sigma_0 = 20$  МПа, для титана  $\sigma_0 = 80$  МПа;  $u$  – коэффициент деформационного упрочнения или константа материала (например, для меди  $u = 0,11...0,14$  МПа $\times$  м $^{0,5}$ , для алюминия  $u = 0,04$  МПа $\times$  м $^{0,5}$ , для титана  $u = 0,4$  МПа $\times$  м $^{0,5}$ ).

Например, было проанализировано влияние размера зерна заготовки и скорости деформирования [6,11]. Эти факторы считались двумя основными влияющими факторами по следующим причинам: напряжение текучести уменьшается с уменьшением размера заготовки и скорость деформирования связана со скоростью деформации, трением и временем протекания процесса. В работах [7,8,130] показано, что влияние коэффициента трения уменьшается при увеличении диаметра пуансона с 1 до 5 мм (рис. 1.3).

В статьях [18,19] рассматриваются размерные эффекты, влияющие на технологию изготовления деталей, критический размер зерна и компьютерное моделирование микропроцессов [23-25,28,30,31]

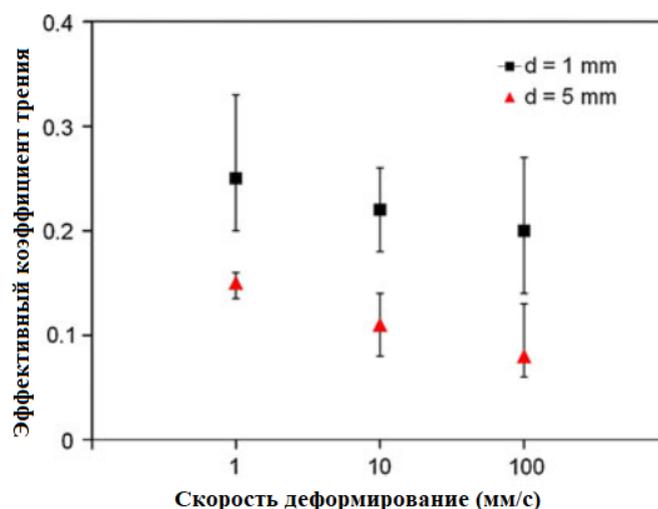


Рисунок 1.3. Изменение эффективного коэффициента трения при глубокой вытяжке с различными скоростями деформирования [7]

Основываясь на предположении, что с уменьшением размеров прочность материала приближается к прочности одного кристаллита, работе Гонга и Гуо [177] были подготовлены образцы разной толщины. При изготовлении образцов на одноосное растяжение ширина рабочей зоны была также пропорционально уменьшена. При проведении испытаний скорость растяжения тоже была задана неодинаковой. В результате были получены диаграммы сопротивления деформации (рис. 1.4) и установлено, что наблюдается пластическое разрушение образцов в четырёх случаях, но с уменьшением образцов механизм пластического разрушения тендирует к скольжению, а не к разрушению за счёт образования микроразрывов.

В работе Менга и других [27] показано (рис. 1.5), что при деформировании тонколистовых заготовок в условиях одноосного растяжения, их кривые сопротивления деформации показывают аномальное поведение течения материала, не свойственное макроуровню, а именно, сопротивление деформации растёт с уменьшением размера зерна, что хорошо согласуется с уравнением Холла-Петча.

Немаловажным является трение, возникающее в процессах микродеформирования. Данный вопрос рассматривался многими

исследователями [12,26,32,59,130,131,166,167], так как с уменьшением образца доля работы трения в контексте общей затрачиваемой работы деформирования, растёт. Более подробно этот вопрос рассмотрен в разделе 2.3.

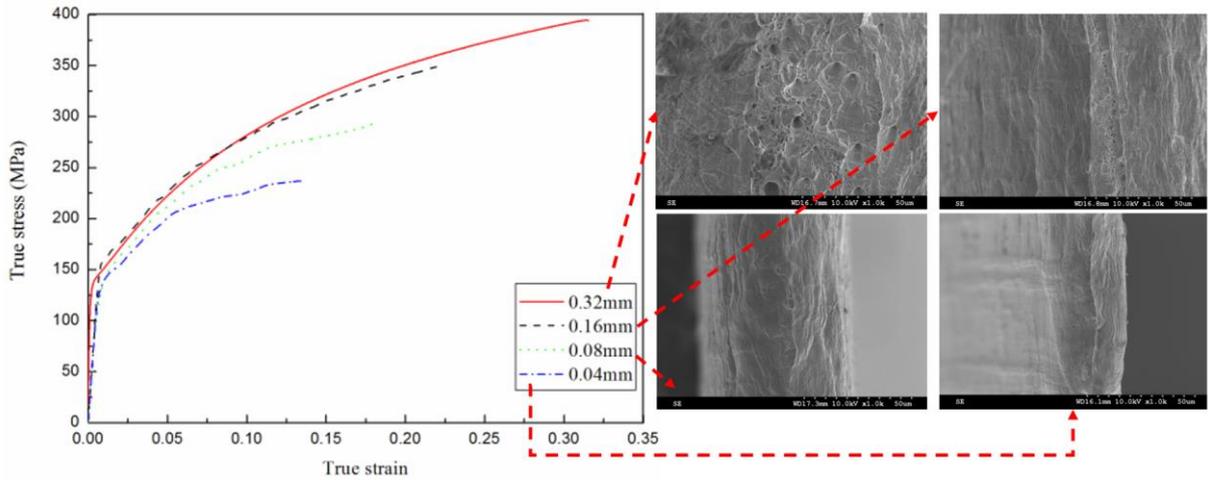


Рисунок 1.4. Графики сопротивления деформации для тонколистовых образцов

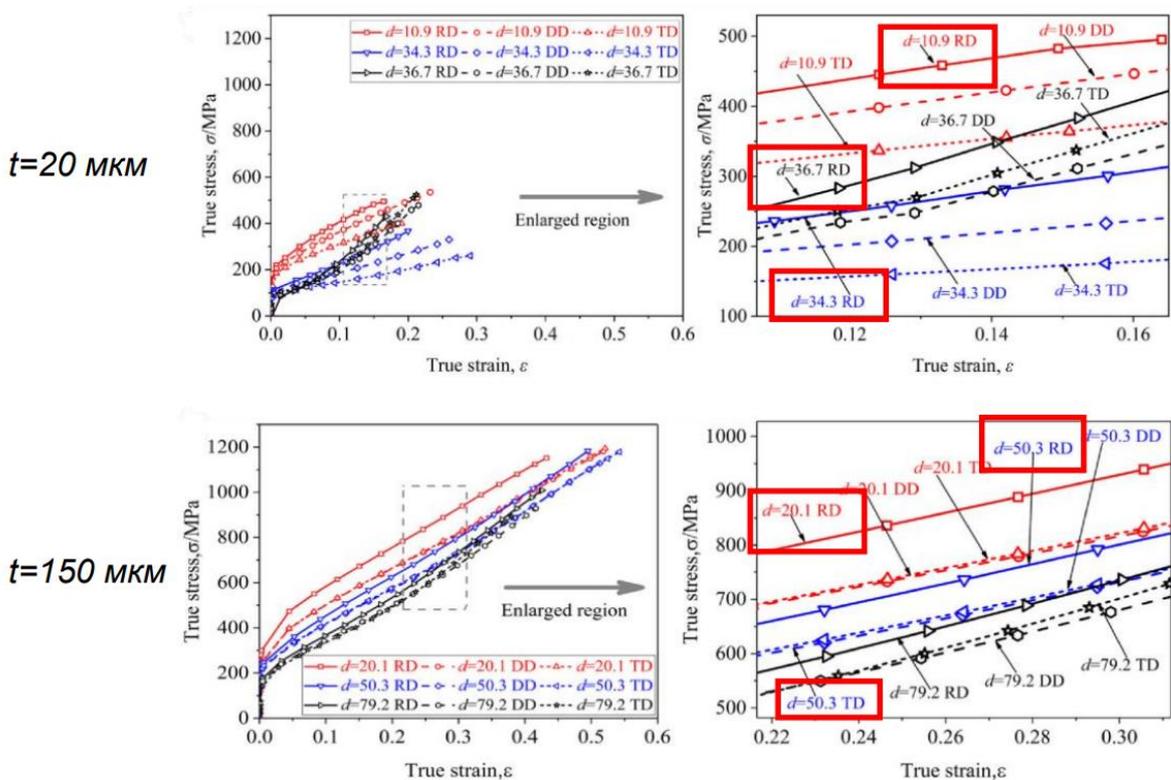


Рисунок 1.5. Графики сопротивления деформации для тонколистовых образцов

Влияние размера образца на силу деформирования является основным фактором и в процессе микровытяжки. Дело в том, что данный показатель характеризует габариты оборудования и, соответственно, предопределяет его жесткостную характеристику. Обобщенная функция для определения силы вытяжки принимает вид, согласно уравнению (1.2).

$$F_{\text{деформация}} = f(\sigma_1, F_{\text{прижим}}, \mu, h, s_0, n, k, r) \quad (1.2)$$

где  $\sigma_1$  – значение главного напряжения,  $h_d$  – высота детали,  $n$  – показатель деформационного упрочнения,  $u$  – коэффициент деформационного упрочнения,  $r$  – коэффициент пластической деформации.

На поведение материала влияют размерные эффекты, возникающие при уменьшении масштаба размер образца от обычного до микро. Напряжение течения, анизотропия, пластичность и предел формования зависят от размера образца и микроструктуры, что приводит к действующей силе деформации. Авторы работ показали, что сила деформирования уменьшается, при снижении коэффициента подобия с 1 до 0,2 (рис. 1.6).

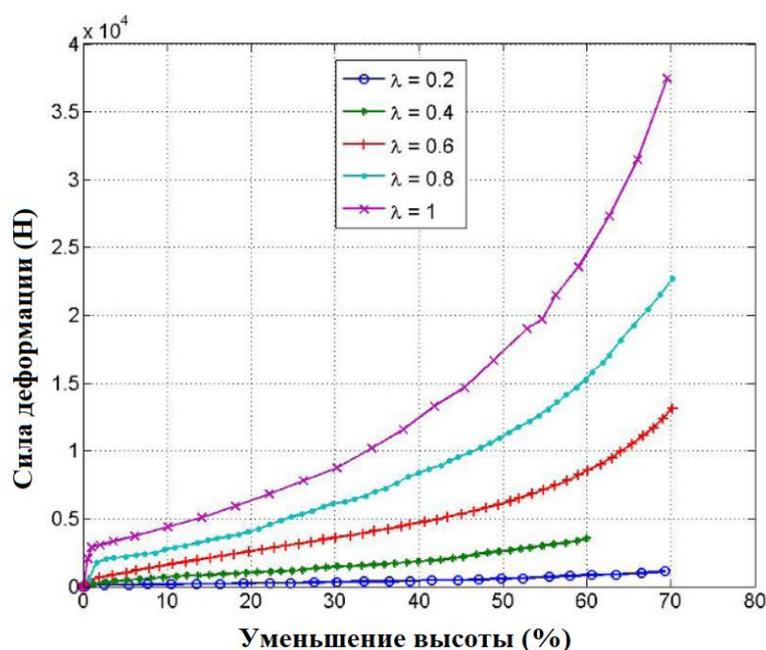


Рисунок 1.6. Графики силы деформирования от процента уменьшения образца для разных  $\lambda$  [4,127,130]

В работах [37,38] показано, что для образцов с разным коэффициентом подобия напряжение текучести уменьшается с уменьшением его размеров (рис. 1.7).

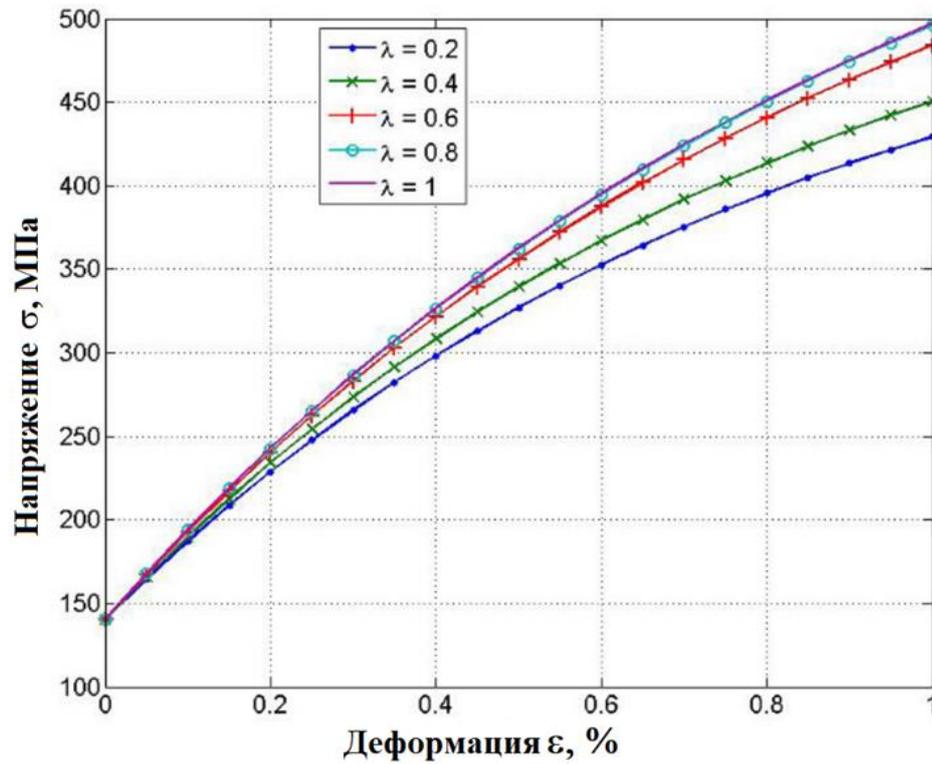


Рисунок 1.7. Влияние размера образцов на напряжение текучести для пяти значений  $\lambda$  [4]

График напряжения текучести был определен с использованием модели насыщения, согласно уравнению (1.3).

$$\bar{\sigma} = \sigma_{\tau} + Q(1 - \exp(-b\varepsilon^{-p})) \quad (1.3)$$

где  $\bar{\sigma}$  – напряжение текучести;  $Q$  – значение насыщения;  $b$  – скорость перехода между  $\sigma_{\tau}$  и  $\sigma_{\tau} + Q$ ;  $\varepsilon^{-p}$  – эквивалентная пластическая деформация [126].

## ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МИКРОШТАМПОВКИ

### 2.1 Методика проектирования технологии

Методика проведения исследования показана на рис. 2.1. Она включает в себя подготовку инструмента для листовой микроштамповки и сопутствующие доделочные операции (пост-обработка), контроль точности сборки и определение результатов влияния неточности сборки на листовые детали при помощи компьютерного моделирования (Computer-Aided Inspection или CAI), проведение серии экспериментов на специализированном испытательном оборудовании, контроль точности изготовления заготовки после чистовой вырубке и вытяжки контактными и бесконтактными способами (CAI), проведение построения 3D-моделей (Computer-Aided Design или CAD) и численного моделирования технологического процесса (Computer-Aided Engineering или CAE) и, наконец, валидация результатов или сравнение результатов моделирования с результатами экспериментов.



Рисунок 2.1. Общая схема проведения исследования микроштамповки

Вопрос о решении задачи оптимизации (Computer-Aided Optimation) может быть сформулирован с целью оптимизации отдельных элементов деформирующего инструмента (топологическая, размерная, толщинная и т.д.) или оптимизации параметров технологического процесса (многофакторное планирование экспериментов).



Рисунок 2.2. Сравнение схем разработки технологических процессов

Дальней целью реализации схемы разработки новых технологий является создание цифрового двойника технологического процесса, для которого характерно наличие двухсторонней связи реального и виртуального объектов, через обмен данными и информацией между ними. Согласно концепции профессора М. Гривза, таким образом разрабатывается цифровой двойник прототипа (DTP), который в дальнейшем может стать полноценным экземпляром. Цифровые двойники могут быть выделены не только для конечной детали или изделия, но и для технологического процесса, так как он позволяет реализовать виртуальное проектирование и испытание технологического процесса [109,185].

Целью реализации методики является получение части технологического цифрового двойника (ЦД-Т) двухоперационного процесса микроштамповки листовых деталей [139] из алюминиевых, медных и латунных тонколистовых материалов (толщина заготовки не более 0,3 мм), без определения двусторонней связи. Его разработка позволит ускорить проектирование подобных процессов, а внесение дополнительной информации, например, о реологическом поведении материала на

мезоуровне, позволит уточнить ЦД-Т и повысить степень адекватности модели с нуля до единицы.

Таким образом появляется методика разработки цифровых и гибридных двойников технологических процессов. Достоверность применяемых математических моделей подтверждается процессами сертификации, верификации и валидации цифровых моделей с реальными объектами.

## 2.2 Краткое описание операций вырубка и вытяжка

Наиболее распространёнными операциями в листовой штамповке являются вырубка и вытяжка. Первая служит для получения заготовки из металлургических изделий (лист, лента, полоса) и является разделительной операцией, а вторая для выполнения формообразующей операции при помощи втягивания материала в полость матрицы и его пластического деформирования.

При вырубке выделяют три стадии, а именно: упругой деформации, пластической деформации и хрупкого разрушения или скалывания. На рис. 2.3 рассмотрен очаг деформации при вырубке, в котором можно выделить четыре зоны с разной степенью упрочнения материала [184]. С уменьшением величины зазора очаг деформации локализуется. Величина интенсивности напряжения и деформации также определяется зазором.

На поверхности среза выделяют область собственно реза, представляющую собой цилиндрическую блестящую поверхность (поясок) и матовую поверхность (поясок) или поверхность хрупкого разрушения, место локализации микротрещин. При оптимальных зазорах магистральная трещина, соединяющая режущие кромки инструментов, развивается таким образом, что в точке их встречи касательная совпадает с направлением перемещения пуансона. В этом случае высота матового пояска минимальная. Увеличение зазора и острота кромок приводит к различным

эффектам. При оптимальном зазоре силовые характеристики операции вырубki минимальны, качество поверхности реза на детали высокое, преобладает блестящий поясok, и износ инструмента минимальный. В случае притупленных кромок режущего инструмента зона на этапе пластической деформации увеличивается, увеличивается сопротивление сдвигу и образуется заусенец.

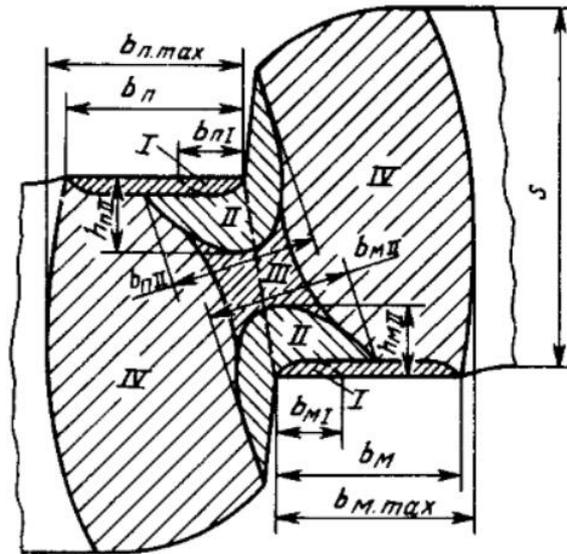


Рисунок 2.3. Очаг деформации при выполнении разделительной операции: I – зона наибольшего утонения; II – зона наиболее интенсивного упрочнения; III – промежуточная зона, упрочнение принимает среднее значение; IV – зона недеформированного материала, упрочнение минимальное.

В литературе имеются формулы, по которым возможно определить величину зазора для получения деталей требуемого качества. Однако, входящие в эти уравнения коэффициенты определяются эмпирическим путём. Для определения оптимального зазора ( $z_0$ ) можно воспользоваться уравнением (2.1), а для вычисления  $\sigma_{сд}$  уравнением (2.2).

$$z_0 = 0,32\Delta_1\Delta_2t\sqrt{\sigma_{сд}} \quad (2.1)$$

$$\sigma_{сд} \approx \frac{1 + \frac{2t}{D_3}}{\sigma_T} \quad (2.2)$$

Существует два правила по выбору зазоров при выполнении разделительной операции по замкнутому контуру. Во-первых, в случае выполнения вырубki наружного контура зазор образуется за счёт уменьшения размеров пуансонов, а размер матрицы принимается равным предельному размеру детали. Во-вторых, в случае пробивки отверстий зазор образуется за счёт увеличения размеров матрицы, а размер пуансона принимают равным наибольшему предельному размеру отверстия. Можно выделить и третье правило, для тонколистовых материалов, толщиной менее 0,5 мм, для разделения которых применяют беззазорные инструменты с сопряжением рабочих частей без механической обработки. Так для скорости деформирования 1 мм/с значение  $\Delta_2 = 1$ . Для латуни цветных металлов и сплавов мягкого исполнения при  $t = 0,1$  мм величина оптимального зазора соответствует  $z_0 = 0.00015...0,008$  мм. Видно, что такую точность гарантировать весьма трудно и она может быть достигнута шероховатостью сопрягаемых поверхностей.

Для оценки качества реза полученных деталей введены классы геометрических несовершенств поверхности разделения (рис. 2.4), которые определяются коэффициентами  $k_y$ ,  $k_n$ ,  $k_c$ ,  $k_x$  и  $k_\alpha$ , согласно уравнениям (2.3), и высотой заусенца ( $h_3$ ). При величине зазора, превышающего оптимальное значение, и деформировании материалов с  $t \leq 0,2$  мм может происходить утягивание материала в зазор. Тогда к величине  $h_3$  добавляется высота утягиваемого материала, получаемого за счёт вытяжки с утонением и последующего неконтролируемого разрушением материала. Такой вариант не является оптимальным, так как оценить высоту заусенца весьма сложности, а место образования границы разрушения непредсказуемо.

Ещё одним способом разделительной операции является чистовая вырубка (рис. 2.5). Её особенность заключается в том, что сдвиговое

напряжение компенсируется условием всестороннего сжатия материала в месте разделения. Это приводит к «зарастанию» микротрещин и отсутствию матового пояса. Реализация подобного процесса осуществляется на прессах тройного действия и в специальных инструментах, в которых предусмотрено стопорное клиновое ребро в прижиме.

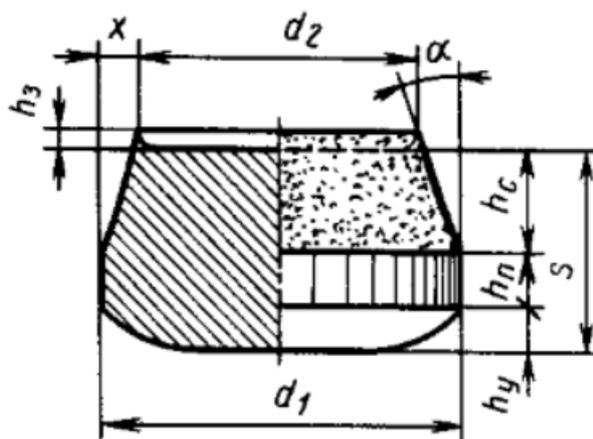


Рисунок 2.4. Описание качества поверхности разделения

$$k_y = \frac{h_y}{t}, k_{\Pi} = \frac{h_{\Pi}}{t}, k_c = \frac{h_c}{t}, k_x = \frac{h_x}{t}, k_{\alpha} = \frac{h_{\alpha}}{t} \quad (2.3)$$

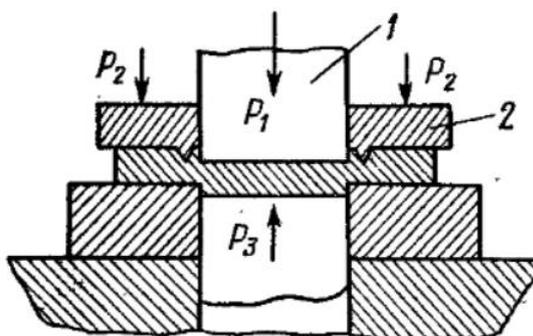


Рисунок 2.5. Принцип чистой вырубki: 1 – пуансон, 2 – прижим со стопорным ребром.

Рассмотрим основную формообразующую операцию – вытяжка (рис. 2.6). В процессе вытяжки осесимметричной детали на фланце или в стенке могут возникнуть дефекты, включая складки или фестоны, трещины и царапины. Складки на фланце возникают из-за изгиба заготовки при её

сжатии пуансоном и могут быть предотвращены достаточно высокой силой прижима. Если зазор слишком велик, то образуются большие неподдерживаемые области. Разрыв материала происходит из-за высоких растягивающих напряжений, вызывающих утонение и разрушение металла в стенке стаканчики. КЭ-моделирование применяется для анализа эволюции дефектов в заготовках с использованием различных диаметров матрицы. Дефекты появляются на стенке детали, когда коэффициент, характеризующий отношение зазора к толщине материала ( $K_{c/t}$ ), находится вне области оптимального диапазона. Рассмотрение вопроса о влиянии размерного фактора на технологические параметры микроштамповки в русскоязычной научной литературе за последние 30 лет в открытой периодике почти не проводилось.

В зоне контакта, т.е. на радиусе матрицы, происходит сочетание растяжения и изгиба. В зоне контакта (б) происходит как граничное, так и смешанное трение. Граничное трение – это состояние, при котором характеристики трения и износа определяются свойствами поверхностей и свойствами жидких смазочных материалов, отличными от их объемной вязкости, в то время как смешанное трение – это состояние, при котором характеристики трения и износа определяются свойствами поверхностей, вязкими и невязкими свойствами жидких смазок [48,166]. Условия контакта в зоне контакта (б) наиболее тяжелые во всех зонах контакта, поскольку преобладающий тип смазки представляет собой комбинацию граничного и смешанного трения. Таким образом, механизм износа инструмента на радиусной части штампа важен для трибологических исследований штамповки листового металла.

Возможными, наиболее распространёнными дефектами осесимметричной вытяжки детали «Стаканчик» являются:

- складки на фланце, устраняются увеличением силы прижима, изменением коэффициента трения;

- складки в стенках, как следствие утягивания складок с фланца, устраняются увеличением силы прижима, изменением коэффициента трения или изменением коэффициента вытяжки;
- фестоны, вызванные анизотропией свойств материала, уйти от которых возможно введя контроль за течением материала, например, при помощи перетяжных рёбер и порогов.

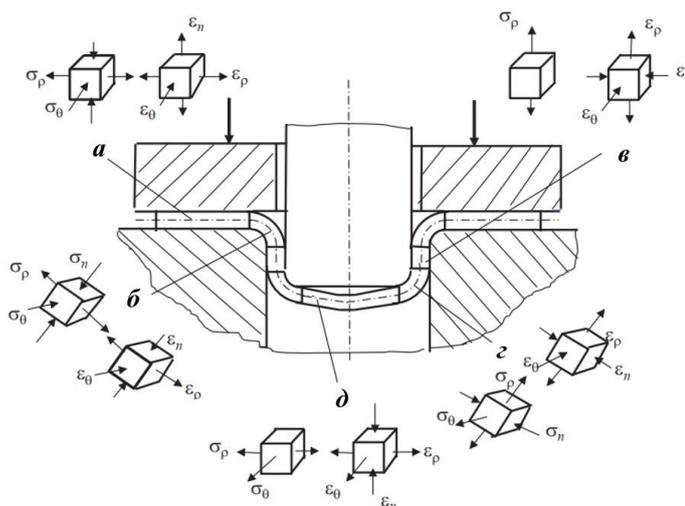


Рисунок 2.6. Схема напряженно-деформированного состояния отдельных участков заготовки при вытяжке ( $\sigma$  – напряжения,  $\varepsilon$  – деформации). а – область под прижимом; б – область на радиусе матрицы; в – стенка стаканчика; г – область на радиусе пуансона; д – дно стаканчика

Возможно и преждевременное разрушение материала детали с отрывом донной части, что указывает на высокий уровень растягивающих напряжений, который снижается уменьшением силы прижима, уменьшенным зазором или слишком малым радиусом скругления пуансона и матрицы в области перехода от стенки к донной части стаканчика.

### 2.3 Качество поверхности и контактное трение

Большая разница между процессом микровытяжки и процессом макровытяжки заключается в размере объектов и связанных с этим

значениями площади поверхностей контактов. При уменьшении объектов площадь контакта значительно уменьшается, в то время как характеристика общей топографии поверхности остается примерно постоянной. При смыкании инструментов образуются карманы (открытого и закрытого типов), впадины шероховатой поверхности, в которые попадает смазочное вещество (рис. 2.7). Следовательно, соотношение числа карманов к площади контакта резко снижается, и внешняя нагрузка перераспределяется на другое количество карманов. В случае открытых карманов смазка может перемещаться по рельефу поверхности, по принципу сообщающегося сосуда. В случае закрытого кармана смазка оказывается в замкнутой полости, образованной рельефом поверхности, и возникает местное сопротивление, которое повышает требуемую силу деформирования, так как смазочные вещества являются слабо сжимаемыми жидкостями.

Когда прикладывается деформирующая сила ( $F$ ) на поверхности контакта появляются и растут нормальные напряжения ( $\sigma_n$ ), неровности (пики шероховатости) начинают пластически деформироваться, и в силу малой сжимаемости смазочного вещества, наблюдается увеличение давления смазки в карманах на боковые поверхности впадин. Впадины шероховатости, которые соединяются с краем поверхности, не могут удерживать смазку, образуя так называемые открытые смазочные карманы (ОСК). При увеличении давления смазка вытекает и не может поддерживать или передавать деформирующую нагрузку. Закрытые смазочные карманы (ЗСК), напротив, не имеют соединения с краем поверхности. Смазка задерживается в этих карманах и находится под давлением во время микроштамповки. Активная деформация наблюдается в большей степени на поверхности, в которых имеются ЗСК, что приводит к более высокому контактному напряжению и более высокой степени выглаживания неровностей поверхности заготовки более твердым и прочным материалом инструмента и, следовательно, большей доле реальной площади контакта и более высокому трению. Развивающееся

гидростатическое давление принимает на себя часть внешней нагрузки, тем самым уменьшая нормальное давление на неровности, что приводит к снижению трения. В итоге закрытые смазочные карманы уменьшают трение. За счет уменьшения размера образца увеличивается доля открытых смазочных карманов, а также коэффициент трения. Модель ОСК и ЗСК и их влияние были подтверждены дополнительными и независимыми исследованиями, которые подробно описаны в работах [29, 137].

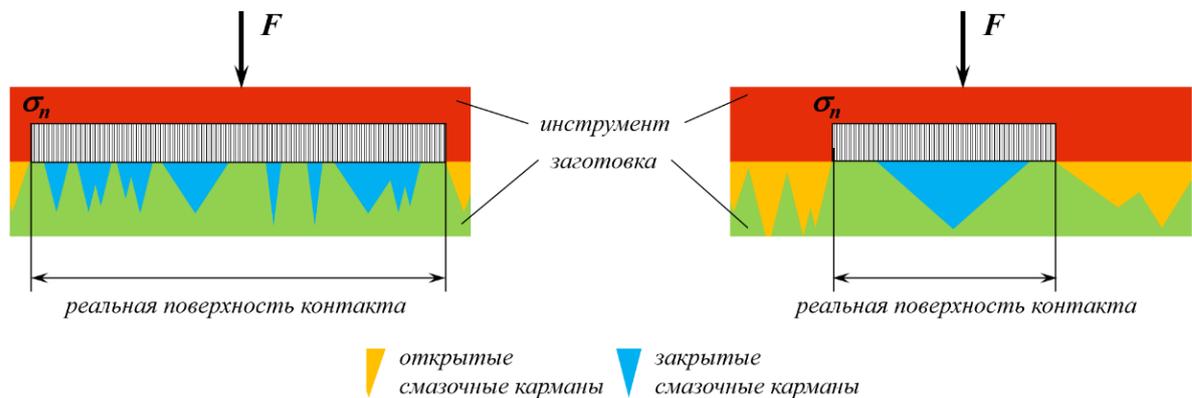


Рисунок 2.7. Сравнение размеров контактной поверхности для процессов макроштамповки (слева) и микроштамповки (справа)

В листовой штамповке применяется модель трения Кулона-Амонтона, согласно которой касательное напряжение на контактной поверхности пропорционально коэффициенту трения и нормальному напряжению к контактной поверхности, уравнение (2.4). В силу неидеального распределения нормального напряжения по поверхности, и, соответственно, аналогичного характера распределения касательного напряжения, то вводят граничное условие, согласно которому  $0 \leq \tau \leq \beta \sigma_T / 2$ , где  $1 \leq \beta \leq 2/3^{0.5}$ . Тогда получается, что максимальное значение, которое может принимать касательное напряжение  $\tau \sim \sigma_T / 3^{0.5}$  или  $\tau \sim m_{тр} \sigma_T$ , при  $m_{тр} \sim \mu \times 3^{0.5}$ , так как свыше этого значения коэффициента трения будет наблюдаться пластическое формоизменения, что противоречит классической постановке задачи о трении Кулона, согласно которой тела в процессе трения не получают

остаточную деформацию. Авторы работы [29] рассматривают две модели, в которых дополняют классическую теорию трения для листовой штамповки и включают в рассмотрение функции коэффициента трения влияния ОСК и ЗСК, уравнения (2.5 и 2.6). Для эксперимента по вытягиванию полосы (рис. 2.8а), коэффициент трения по которому определяется уравнением Кулона, при помощи метода конечного элемента и решения оптимизационной задачи были найдены коэффициенты  $C$  уравнения (2.7) и построены графики функции (рис. 2.8б) коэффициента трения от контактного давления.

$$\tau = \mu\sigma_n, \mu = \frac{\tau}{\sigma_n} \quad (2.4)$$

$$\mu = \mu_{ст} \left[ 1 - \frac{P_l}{P_m} (1 - \alpha_{rc}) \left( 1 - \frac{1}{\lambda} \right)^2 \right], K_V = -V \frac{dP_l}{dV} \quad (2.5)$$

$$\mu = \frac{m_{тр}}{\sqrt{3(1 - m_{тр}^2 \alpha^2) + \sqrt{3} \alpha^{n/2}}} \quad (2.6)$$

$$\mu = C_1 + C_2 e^{-C_4 P} + C_3 e^{-C_5 P} \quad (2.7)$$

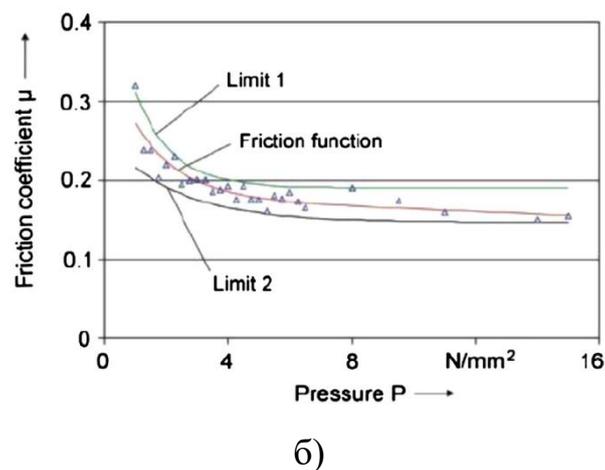
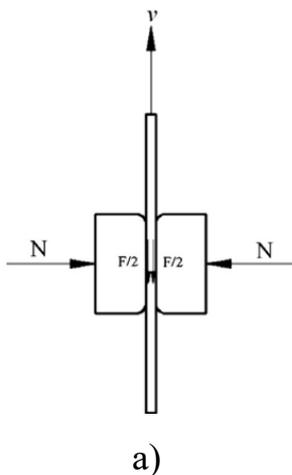


Рисунок 2.8. Сравнение размеров контактной поверхности для процессов: схема испытания по вытягиванию полосы (а) и графики зависимости  $\mu=f(P)$

На рисунке 2.9 приведено сравнения соотношения шероховатости поверхности к толщине листовой заготовки из фосфористой бронзы С5191-

Н. Хотя абсолютные значения шероховатости поверхности почти близки для двух случаев и составляют  $Rz=0,8$  мкм, существует большая разница в относительных соотношениях к толщине заготовки. Это означает, что шероховатость поверхности может в значительной степени повлиять на силу трения [127].

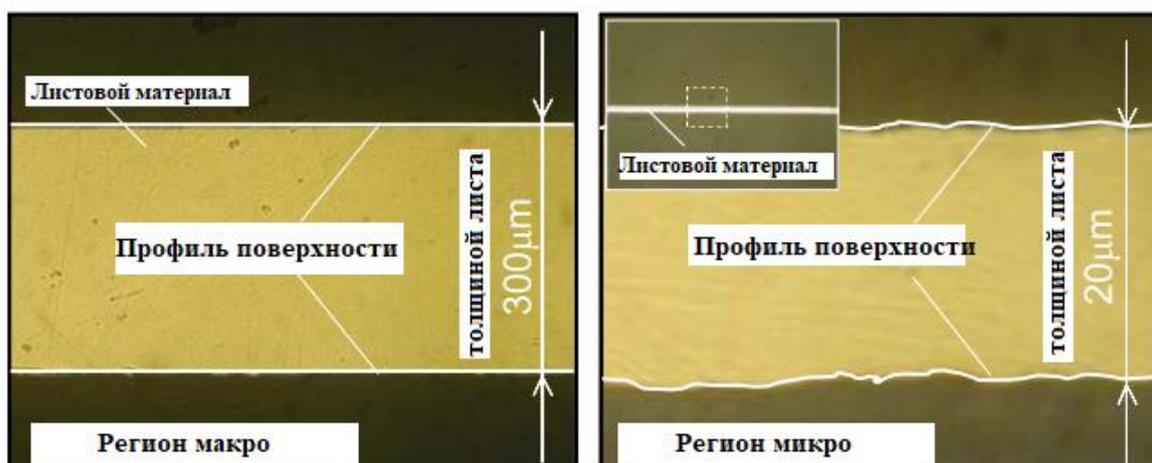


Рисунок 2.9 Сравнение изображений поперечного сечения заготовок [127].

Таким образом, изменение трения на микроуровне зависит в большей степени от топографии поверхности, которая в численном виде выражается через шероховатость поверхности, так как этот факт определяет долю ОСК, ЗСК и реальной плоскости контакта твёрдых тел.

#### 2.4 Определение механических свойств исследуемых материалов

Благодаря своей высокой прочности, электро- и теплопроводности, а также хорошей коррозионной стойкости и ряду других ценных физико-механических характеристик, медь М1 всегда была популярным выбором при производстве токопроводящих деталей и электронных схем. Кроме того, миниатюризация деталей в электронной промышленности растет, поэтому исследование медных материалов и сплавов на основе меди для микроштамповки имеет важное значение.

По результатам механических испытаний определялись такие свойства, как предел текучести, предел прочности и относительное удлинение, а также анизотропия свойств, являющаяся важным показателем склонности листового материала к образованию фестонов.

В качестве материалов были выбраны медь М1 (по ГОСТ 859-214) и латунь Л63 (по ГОСТ 15527-2004), в мягком состоянии поставки. В экспериментах также использовался алюминий технической чистоты А5 (по ГОСТ 618-2014), а при моделировании дополнительно применялась латунь Л80. Химический состав и основные механические свойства представлены в табл. 2.1 и 2.2, соответственно. Заготовки вырезались из ленты, толщиной 100 мкм. Геометрия образцов соответствовала ГОСТ 1497-84, были изготовлены пропорциональные (тип А) и непропорциональные (тип Б) варианты образцов (рис. 2.10). Геометрические размеры образцов показаны в табл. 2.3.

Таблица 2.1. Химический состав материалов

медь М1							
Cu+Ag	Bi	Fe	Zn	Sb	P	Cu	Pb
99,9	до 0,001	0,005	0,004	0,002	-	-	0,005
латунь Л63							
-	до 0,002	до 0,2	34,22- 37,5	до 0,005	до 0,01	62-65	до 0,07
алюминий А5 (ДПРНМ)							
Si	Mn	Fe	Zn	Mg	Ti	Cu	Al
0,25	0,05	0,3	0,06	0,03	0,02	0,02	99,5

Образцы были изготовлены под тремя углами: по направлению к прокатке (0°) или сокращённо «ВП», по диагонали (45°) или сокращённо «ДП» и под прямым углом к направлению прокатки (90°) или сокращённо

«ПП». Образцы соответствовали коэффициентам подобия ( $\lambda$ ), представленным в таблице 2.1.

Таблица 2.2. Основные механические свойства материала заготовки при 20°C

Параметр	Материал			
	Л63	Л80	М1	А5
$\rho$ , [кг/м <sup>3</sup> ]	8 440	8 640	8 940	2 700
$\sigma_{в,}$ [МПа]	290...400	260...370	200...260	60
E, [ГПа]	116	110	125...128	70
$\nu$ , [-]	0,33	0,33	0,35	0,33
НВ, [МПа]	70	65	55	20

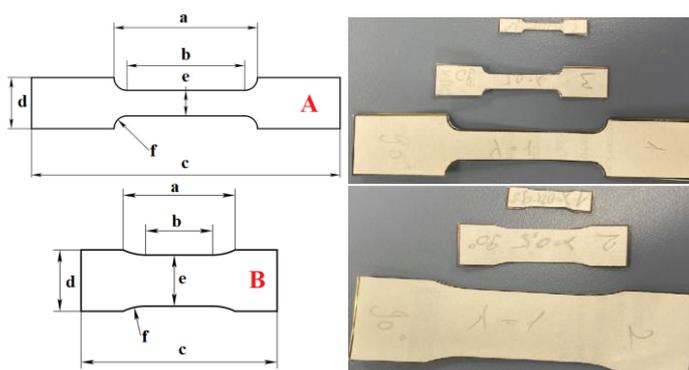


Рисунок 2.10. Образцов для испытаний на растяжение

Таблица 2.3. Геометрические размеры образцов

Тип образца	$\lambda$	a	b	c	d	e	f
A	0,68	47,26	38,76	101,66	17	8,5	R4,26
	0,34	23,63	19,38	50,83	8,5	4,25	R2,13
	0,17	11,82	9,69	25,42	4,25	2,13	R1,06
B	0,96	41,7	24,96	72,96	23,04	19,2	R19,2
	0,48	20,85	12,48	36,48	11,52	9,6	R9,6
	0,24	10,86	6,5	19	6	4,8	R5

Вычисление коэффициентов пластической деформации, уравнение (2.8), для трёх направлений выполнялось согласно ГОСТ Р ИСО 10113-2014. По результатам измерений вычислялись коэффициенты Лэнкфорда для плоскостной, уравнение (2.9), и нормальную, уравнение (2.10), анизотропию ленты. Согласно принятым положениям, нормальная анизотропия ( $\bar{r}_m$ ) показывает способность материала к вытяжке, чем выше, тем лучше способность, а плоскостная ( $\Delta r$ ) – вероятность образования фестонов, чем ниже, тем ниже вероятность образования фестонов).

$$r = \frac{\varepsilon_{ш}}{\varepsilon_T}, \varepsilon_{ш} = \ln \frac{e_1}{e_0}, \varepsilon_T = \ln \frac{t_1}{t_0} \quad (2.8)$$

$$\bar{r}_m = \frac{r_0 + r_{90} + 2 \times r_{45}}{4}, \quad (2.9)$$

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2 \times r_{45}}{2}, \quad (2.10)$$

Эксперименты выполнялись на настольной электромеханической испытательной машине Мелитэк МЭС-Л-0,5 (рис. 2.11). Величина скорости деформирования составляла от 1 мм/с (для  $\lambda=0,68$  и  $0,96$ ) и 0,5 мм/с (для остальных образцов). В ходе выполнения экспериментов на одноосное растяжение было установлено, что применение захватов с параллельными насечками нецелесообразно, так как наблюдается весьма частое вытягивание образцов из зажима. В связи с этим зажимное устройство было заменено на зажим песочного типа, имеющего точечный рельеф поверхности.

На рис. 2.12 представлены результаты испытаний для медных образцов, для трёх значений  $\lambda$ . В Приложении 2 показаны исходные данные для проведения испытаний, вид образцов после испытаний для случаев «ВП» и «ПП», а также представлены графики зависимости напряжения от деформации. В табл. 2.4 и на рис. 2.13 показана зависимость изменения предела прочности от коэффициента подобия для медных

пропорциональных и непропорциональных образцов. На рис. 2.14 показаны графики плоскостной и нормальной анизотропии. Для сравнения на графике 2.14а даны сравнительные точки из статьи [60] для аналогичного материала, но для образцов с другой геометрией. У образцов из латуни сильнее выражена анизотропия свойств по сравнению с образцами из меди, сильная склонность к образованию фестонов.

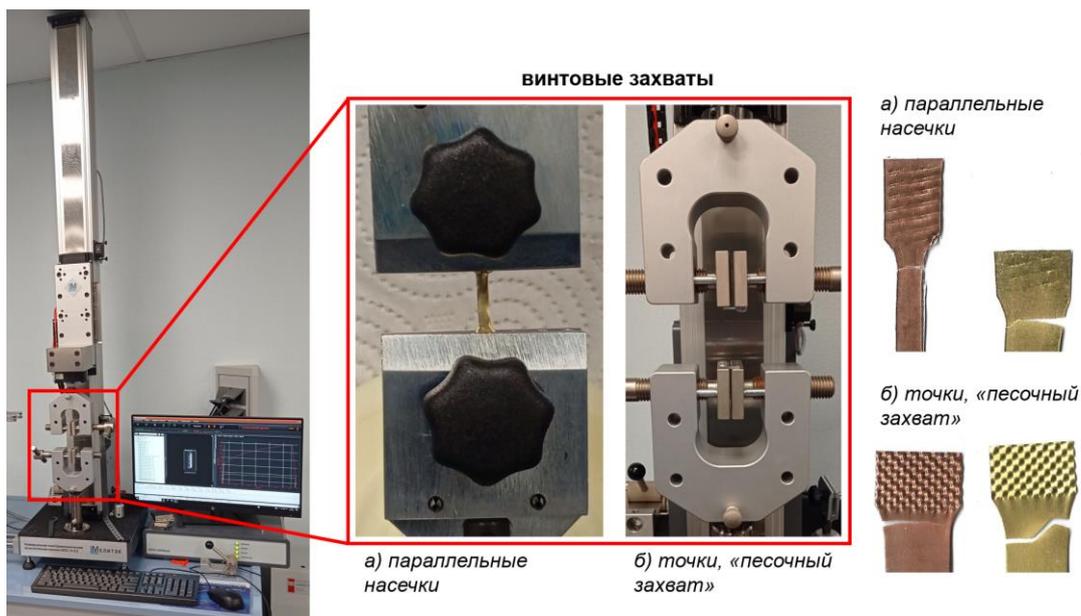


Рисунок 2.11. Оборудование для одноосного растяжения

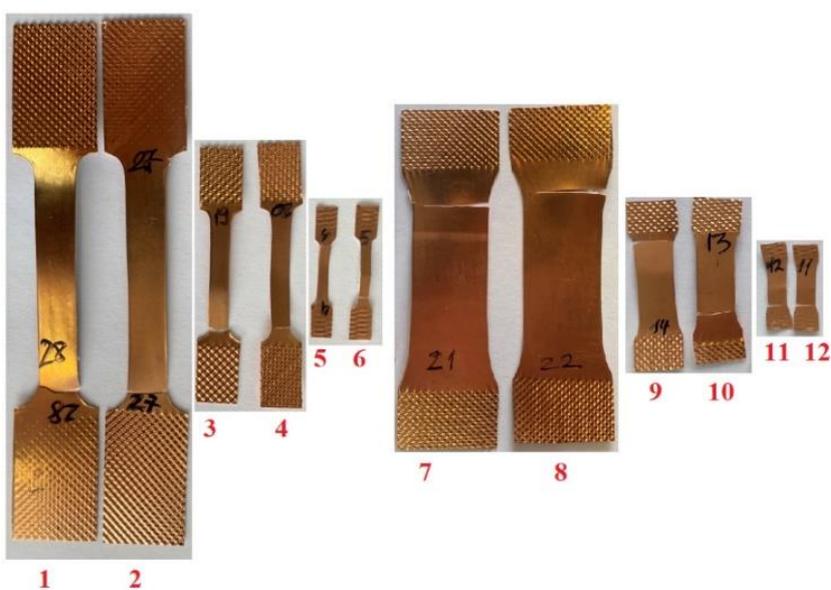


Рисунок 2.12. Образцы после проведения испытаний на растяжение

Таблица 2.4. Значения предела прочности образцов

№	Форма образца	Направление	$\lambda$ , [-]	$\sigma_B$ , [МПа]
1	А	НП	0,25	213
2		ПП	0,25	224
3		НП	0,5	194
4		ПП	0,5	204
5		НП	1	164
6		ПП	1	153
7	В	НП	0,25	278
8		ПП	0,25	274
9		НП	0,5	261
10		ПП	0,5	250
11		НП	1	225
12		ПП	1	241

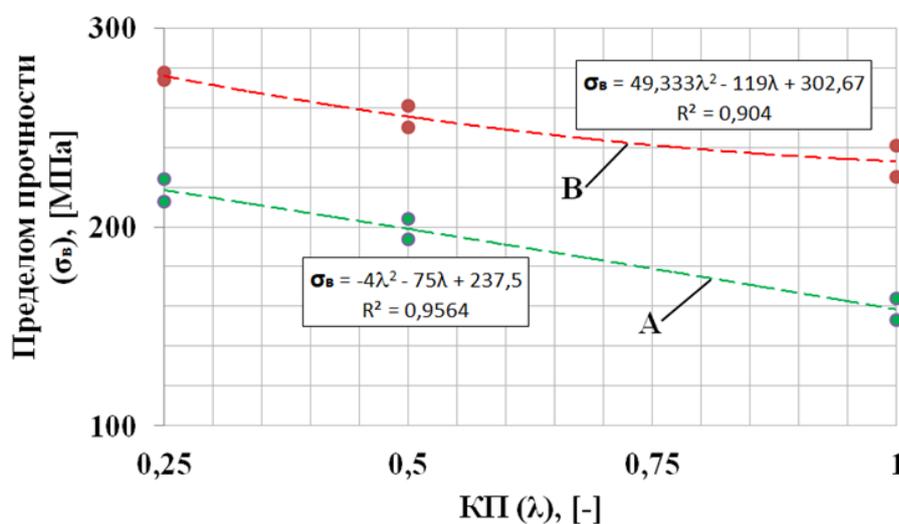
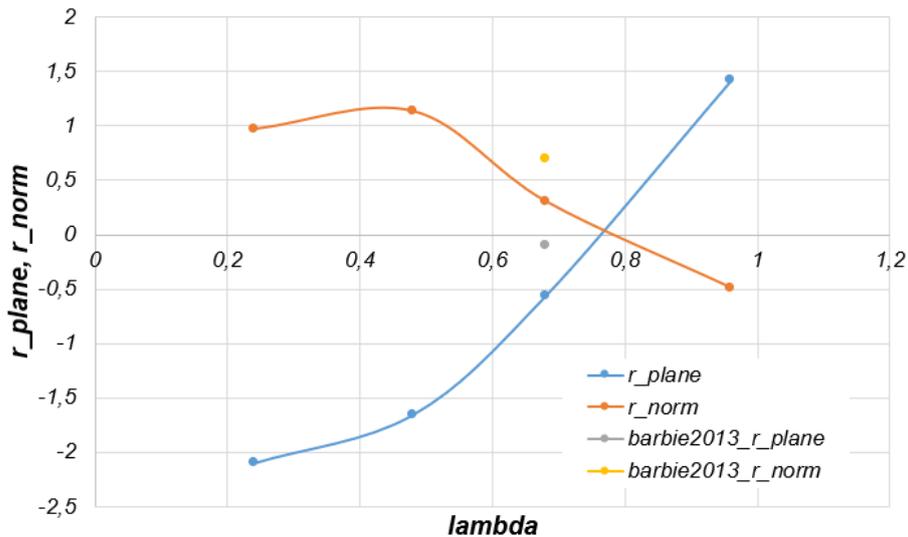
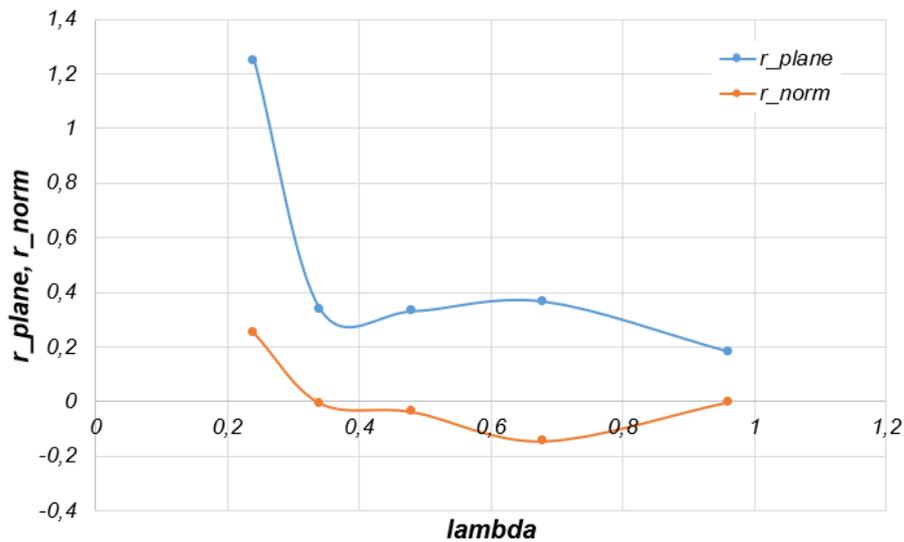


Рисунок 2.13. График изменения предела прочности от коэффициента подобия

С другой стороны, более высокие значения нормальной анизотропии указывают на лучшие пластические свойства. Однако сильный наклон графика нормальной анизотропии к оси абсцисс свидетельствует о том, что пластичность весьма неравномерна, по сравнению с медными образцами.



а) латунь Л63



б) медь М1

Рисунок 2.14. Оборудование для одноосного растяжения

## 2.5 Испытательное оборудование и деформирующий инструмент

Для выполнения экспериментов разработано специализированное оборудование. Для разделительных операций и при выполнении экспериментов с  $\lambda=2$  применялась универсальная испытательная машина (УИМ) ЦДМ-100ПУ. Для разделительной и формообразующей операций применяются штамповые инструменты, полученные по технологии 3D-печати. В качестве сравнения результатов были выполнены эксперименты с

применением штампа, полученного традиционными способами механической обработки.

Более подробно данный раздел освещён в главе 4 диссертации.

## 2.6 Теоретический расчёт основных технологических параметров

Расчёт технологических параметров проводился по известным уравнениям и методикам, изложенным в разное время по курсу теории листовой штамповки [39,40,41,42,43,44,45,46,184]. Также был учтён опыт зарубежных исследователей. Расчёты силы вытяжки для цилиндрической детали типа «Стаканчик» без фланца, силы прижима, сила вырубki заготовки определялись по уравнениям (2.11), (2.12) и (2.13), соответственно. Коэффициент подобия ( $\lambda$ ) определяется по уравнению (2.14), максимальная сила деформирования подобия ( $F_{\text{макс}}^\lambda$ ) определяется по уравнению (2.15), коэффициент вытяжки определяется уравнением (2.16). Результаты теоретических расчётов для толщины материала  $t=100$  мкм и  $t=200$  мкм представлены в Приложении 3.

$$F_{\text{макс}} = \pi D_{\text{п}} t \sigma_{\text{т}}^* \quad (2.11a)$$

$$\sigma_{\text{т}}^* = \sigma_{\text{т}} \left( \ln \frac{D_3}{D_{\text{п}}} + \frac{2\mu F_{\text{п}}}{\pi D_3 t \sigma_{\text{т}}} + \frac{t}{2R_{\text{м}} + t} \right) (1 + 1,6\mu) \quad (2.11б)$$

$$F_{\text{пр}} = 0,25\pi q [D_3^2 - (D_{\text{п}} + 2R_{\text{м}})^2] \quad (2.12)$$

$$F_{\text{выр.}} = kLt\tau_{\text{срез}} \quad (2.13)$$

$$\lambda = \frac{D_{\text{п}}^{\text{T}}}{D_{\text{п}}^{\text{б}}} \quad (2.14)$$

$$F_{\text{макс}}^\lambda = \frac{F_{\text{макс}}}{\lambda^2} \quad (2.15)$$

$$B = \frac{1}{m} = \frac{D_3}{D_{\text{п}}} \quad (2.16)$$

### ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МИКРОДЕФОРМИРОВАНИЯ

Процесс цифрового проектирования включает в себя два блока – это численное компьютерное моделирование и контроль точности геометрии детали. В свою очередь компьютерное моделирование включает в себя геометрическое моделирование и численное моделирование технологического процесса. Проверка геометрической точности размеров готового изделия на основании результатов оптического 3D-сканирования на основе структурированного подсвета и применение инструментов цифровой метрологии позволяют оценить результаты компьютерного моделирования и изготовления детали (рис. 3.1).

В объём моделирования технологического процесса включено моделирование разделительной операции, операции вытяжки стаканчика с разными условиями оформления матрицы, силовыми характеристиками прижимного кольца, коэффициентами трения и т.д. На рис. 3.2 показаны схемы процессов. Для всех вариантов рассматривался один и тот же набор коэффициентов геометрического подобия ( $\lambda$ ): 1; 0,5; 0,25 и 0,125 или 1; 1/2; 1/4 и 1/8. За базовый вариант ( $\lambda = 1$ ) принимался вариант исполнения геометрии, данные для которого представлены в табл. 3.1.

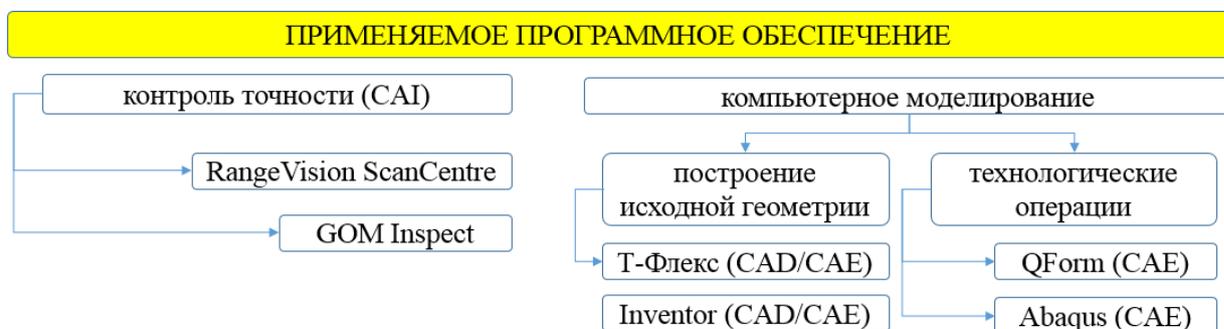


Рисунок 3.1. Набор программного обеспечения для компьютерного моделирования и контроля точности геометрии

Всего было выполнено более 200-сот расчётов, в число которых включались следующие задачи:

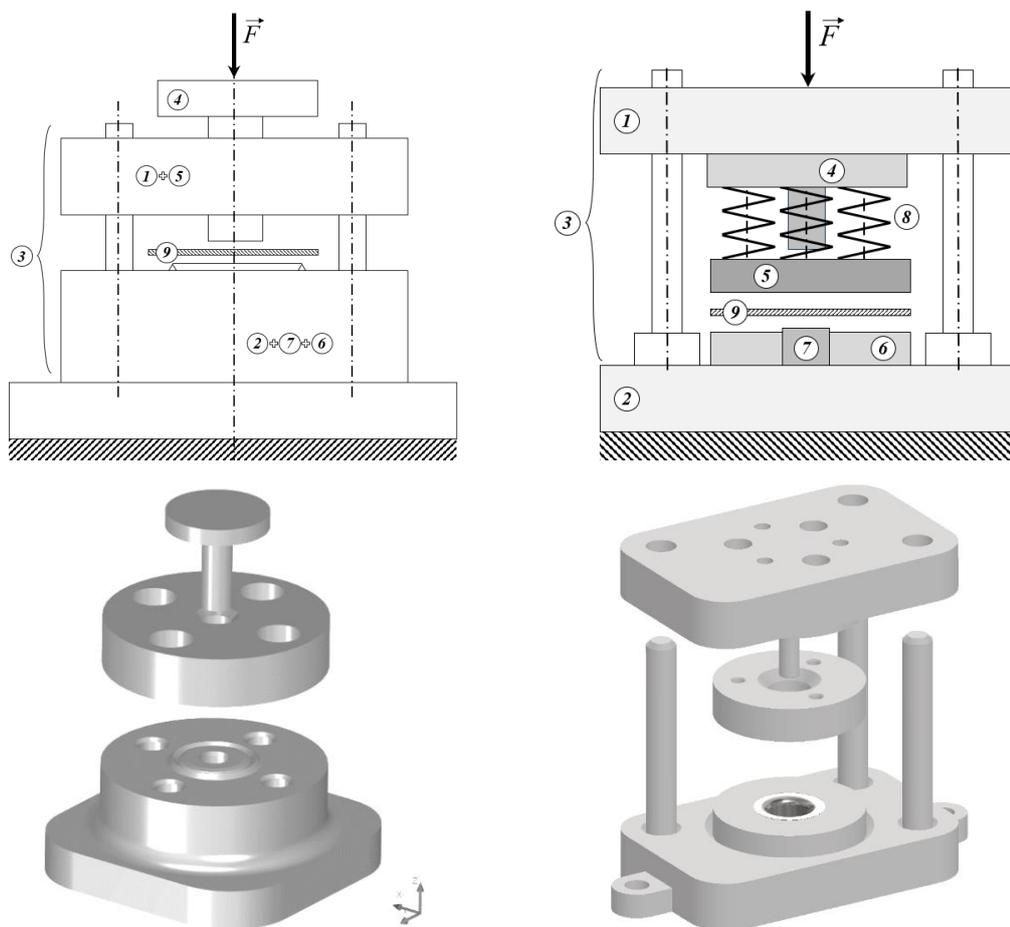
- задача I: изучение разделительной операции микровырубки (Л80);
- задача II: изучение формообразующей операции микровытяжки (М1);
- задача III: влияние трения на микровытяжку (АД33);
- задача IV: изучение формообразующей операции микровытяжки (Л80);
- задача V: изучение влияния коэффициента вытяжки на утонение стенки (М1);
- задача VI: изучение складкообразования (М1);
- задача VII: влияние несоосного расположения инструментов (М1);
- задача VIII: построение трёхфакторного уравнения регрессии  $F_{\text{макс}}$ ;
- задача IX: построение пятифакторного уравнения регрессии для  $F_{\text{макс}}$ .

Таблица 3.1. Геометрические размеры штампов при разных  $\lambda$ , [мм]

$\lambda$ :	1	0,5	0,25	0,125
$D_{\text{п}}$ , мм	8	4	2	1
$D_{\text{з}}$ , мм	15	7,5	3,75	1,875
$R_{\text{п}}$ , мм	1,5	0,75	0,375	0,1875
$R_{\text{м}}$ , мм	1,5	0,75	0,375	0,1875

Сводная таблица по количествам решаемых задач представлена в таблице 3.2

Моделирование технологического процесса осуществлялось как для материалов, применяемых в экспериментах, так и для материалов, которые были рассмотрены исключительно для целей моделирования процесса.



а) вырубка

б) вытяжка

Рисунок 3.2. 3D-модели и схемы исследуемых процессов: 1 – верхняя плита; 2 – нижняя плита; 3 – направляющие втулки и колонки и/или стяжные элементы; 4 – пуансон; 5 – прижим; 6 – матрицедержатель; 7 – матрица; 8 – упругий элемент (пружина); 9 – листовая заготовка.

Таблица 3.2. Статистика решаемых задач

Номер задачи	Кол-во расчётов	ПО
I	24	Abaqus/QForm
II	40	Abaqus/QForm
III	12	QForm
IV	16	Abaqus/QForm
V	15	Abaqus
VI	36	Abaqus
VII	12	QForm

VIII	75	Abaqus
IX	16	Abaqus

Табл. 2.1. Химический состав материалов

латунь Л80							
Cu+Ag	Bi	Fe	Zn	Sb	P	Cu	Pb
-	до 0,002	до 0,1	18,7-21	до 0,005	до 0,01	79-81	до 0,03
АД33							
Si	Mn	Fe	Zn	Mg	Ti	Cu	Al
0,4-0,8	до 0,15	до 0,7	до 0,25	0,8-1,2	до 0,15	0,15- 0,4	96- 98,61

Таблица 2.2. Основные механические свойства материала заготовки при 20°C

Параметр	Материал					
	АД33	03X17H12M2	BT6	ПЕТГ	БФП	КПФП
$\rho$ , [кг/м <sup>3</sup> ]	2 710	8 000	4 450	1 300	1 140	1 360
$\sigma_{в,}$ [МПа]	265	490	1080	48	95	62
E, [ГПа]	71	195	115	2.06	-	2,4
$\nu$ , [-]	0,33	0,25	0,342	-	-	-
HВ, [МПа]	95	179	360	-	-	-

### 3.1 Постановка расчётной задачи

Круглая заготовка сначала вырубается из ленты, а затем втягивается в полость матрицы для формирования стаканчика за один ход пуансона. Сила прижима регулируется при помощи подпружиненного инструмента, чтобы предотвратить образование складок в области фланца. Для исследования

размерного эффекта используются аффинные преобразования и геометрическое подобие. Для заготовок соответствующая толщина ( $t$ ) менялась от 0,8 мм до 0,1 мм также с множителем 0,5. Односторонний зазор между пуансоном и матрицей составляет  $1,5 \times t$ , радиус вытяжного пуансона составляет  $3 \times t$ , радиус матрицы составляет  $2 \times t$ .

Численное моделирование проводилось по методу КЭ в программах Abaqus и QForm. На рис. 3.3. показаны варианты постановки задачи на основе тетрагональных (а) и оболочечных (б) КЭ. На рис. 3.4 показана схема вытяжки с указанием основных конструктивных элементов штампа. Аналогичный инструмент применялся и для вырубки, но в области прижима было предусмотрено острое стопорное кольцевое ребро с углом выступа при вершине  $60^\circ$ , а радиус матрицы и пуансона был равен  $R_m = R_{\text{п}} = 0,5$  мм. Скорость деформирования составляла  $V=1$  мм/с, соответствует скорости перемещения траверсы универсального испытательного оборудования и штока сервопресса (см. раздел 4.1).

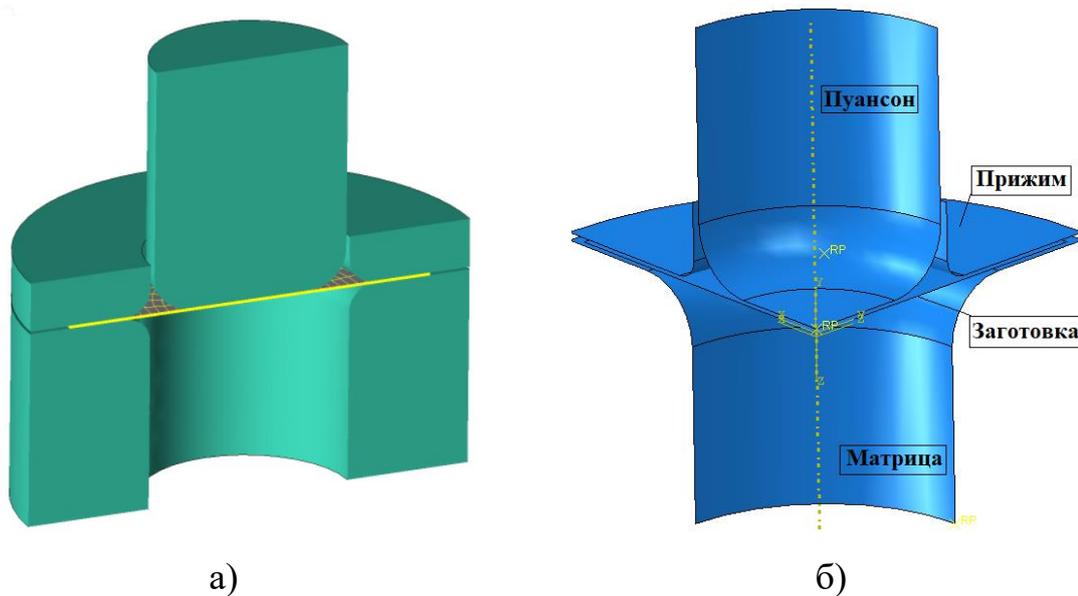


Рисунок 3.3. Схемы моделирования в программах QForm (а) и Abaqus (б)

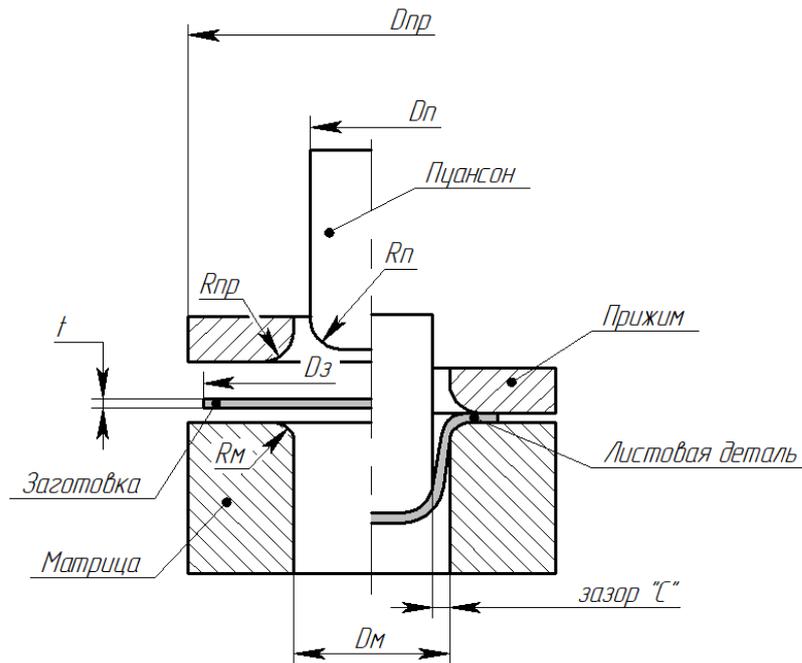


Рисунок 3.4. Схема вытяжки и обозначение технологических параметров

### 3.2 Изучение процесса микровырубki круглых заготовок

**Задача I.** Численное моделирование разделительной операции чистовой вырубki (операция 1) выполнялось в программе Abaqus для положительного и нулевого зазоров и двух значений толщины листовой заготовки  $t = \{0,1 \text{ (рис. 3.5a)}; 0,2 \text{ (рис. 3.5б)}\}$  мм из латуни Л80, для базовых значений геометрии при  $\lambda=1$ .

В качестве критерия разрушения применялся критерий сдвигового разрушения (shear damage). На рис. 3.5 показаны поля интенсивности напряжений или напряжений по Мизесу. Видно, что нулевой зазор приводит к росту напряжений в центральной части листа, в будущей заготовке для вытяжки, и подтверждает наличие области упрочнения материала. Это может негативно сказаться на штампуемости получаемой листовой заготовки.

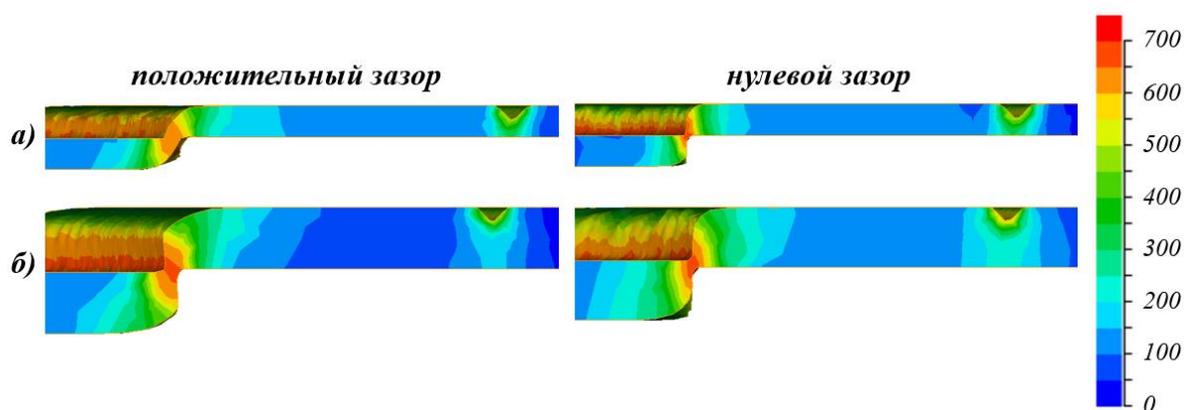


Рисунок 3.5. Поля интенсивности напряжений (операция 1) из латуни Л80

### 3.3 Изучение процесса микровытяжки детали «Стаканчик»

**Задача II.** Для определения потенциальных мест разрушения на второй операции, а также учёта несимметричной установки заготовки до начала операции, была сформулирована задача со следующими характеристиками процесса: изотропное упрочнение, без модели ИРП (M1) и с учётом ИРП по модели Кокрофта-Лэфема-О (M2) [63], толщина заготовки  $t = \{0,1; 0,2; 0,3\}$  мм, перемещение пуансона – 6 мм, сила прижима – 200 Н, тетраэдральная КЭ-сетка.

Результаты моделирования показали, что в зависимости от толщины заготовки утонение стенки стаканчика происходит в большей или меньшей степени для одинакового значения перемещения пуансона, равного 6 мм. При толщине  $t = 0,1$  мм фланца не образуется, а интенсивность напряжений в области стенки и дна стаканчика не превышает критических величин (рис. 3.6). Для толщин  $t = 0,2$  мм и  $t = 0,3$  мм ситуация резко меняется и интенсивность напряжений в стенках стаканчика достигает 300...360 МПа. При этом результаты как без, так и с учётом модели ИРП оказались почти идентичны.

Образование складок в области фланце обнаружено не было, что указывает на правильность выбора коэффициента вытяжки ( $m$ ).

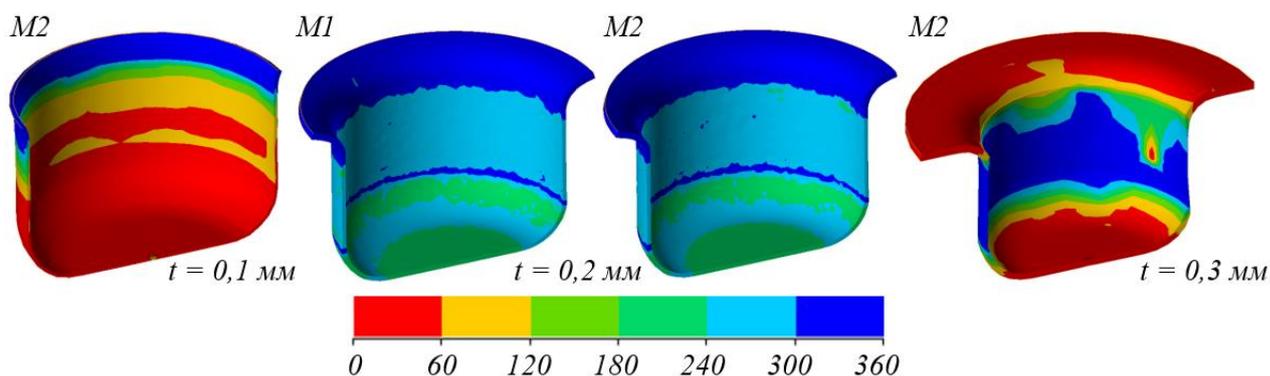


Рисунок 3.6. Поля интенсивности напряжений (операция 2), осесимметричное (идеальное) расположение заготовки из меди М1

### 3.3.1 Влияние трения на процесс

**Задача III.** Материал заготовки – алюминиевый сплав АД33. В дополнении к общим ГУ (табл. 3.1) были сформулированы дополнительные ГУ, представленные в табл. 2.3 и 2.4. Влияние смазки на максимальную силу деформирования определяется по уравнению (3.1). Процесс микровытяжки моделировался для двух условий трения (вариантов), со смазкой и без смазки.

$$H = \frac{F_{\text{макс}}^{\text{б/см}} - F_{\text{макс}}^{\text{см}}}{F_{\text{макс}}^{\text{б/см}}} * 100\%, \quad (3.1)$$

Таблица 2.3. Значения КП и геометрических размеров штампов (мм)

$\lambda$	1	0,5	0,25	0,125
C, мм	1,2	0,6	0,3	0,15
t, мм	0,8	0,4	0,2	0,1

Учёт влияния трения проводился по модели трения Леванова, предназначенной для горячей объёмной штамповки [129]. Однако, в условиях микроштамповки данная модель не проверялась и может быть

также применена на основании гипотезы о том, что на микроуровне условия напряжённо-деформированного состояния материала совпадают для всех процессов обработки давлением. Значения коэффициентов, соответствующие выбранным условиям трения, были выбраны из библиотеки смазочных материалов программы QForm и представлены в табл. 2.5.

Таблица 2.4. Выбранные технологические параметры процесса микровытяжки

$\lambda$	1	0,5	0,25	0,125
V, мм/с	1	0,5	0,25	0,125
$h_n$ , мм	8	4	2	1
$F_{пр}$ , Н	100	50	25	12,5

Таблица 2.5. Параметры модели трения Леванова, согласно библиотеке смазочных материалов программы QForm

Параметры	Минеральное масло	Без смазки
m, [-]	0,15	0,5
Коэффициент Леванова, [-]	1,25	
Коэффициент теплопередачи, [Вт/м <sup>2</sup> К]	75000	30000
Коэффициент паузы, [-]	0,05	

Результаты моделирования показали, что сила деформирования без смазки выше, чем сила деформирования со смазкой (рис. 3.7). Это объясняется появлением нормальной силы при использовании смазок, уменьшающих трение скольжения между поверхностью инструмента и поверхностью заготовки [136,131]. Максимальная сила деформирования определяется, как максимальная сила, действующая на заготовку в процессе микровытяжки. По результатам моделирования процесса микровытяжки,

получено максимальное значение  $F_{\text{макс.}}$ , для соответствующих КП (табл. 2.6). На основании вышеизложенных результатов можно построить график функции, показывающий взаимосвязь между максимальной силой деформирования для двух вариантов постановки задачи (рис. 3.8).

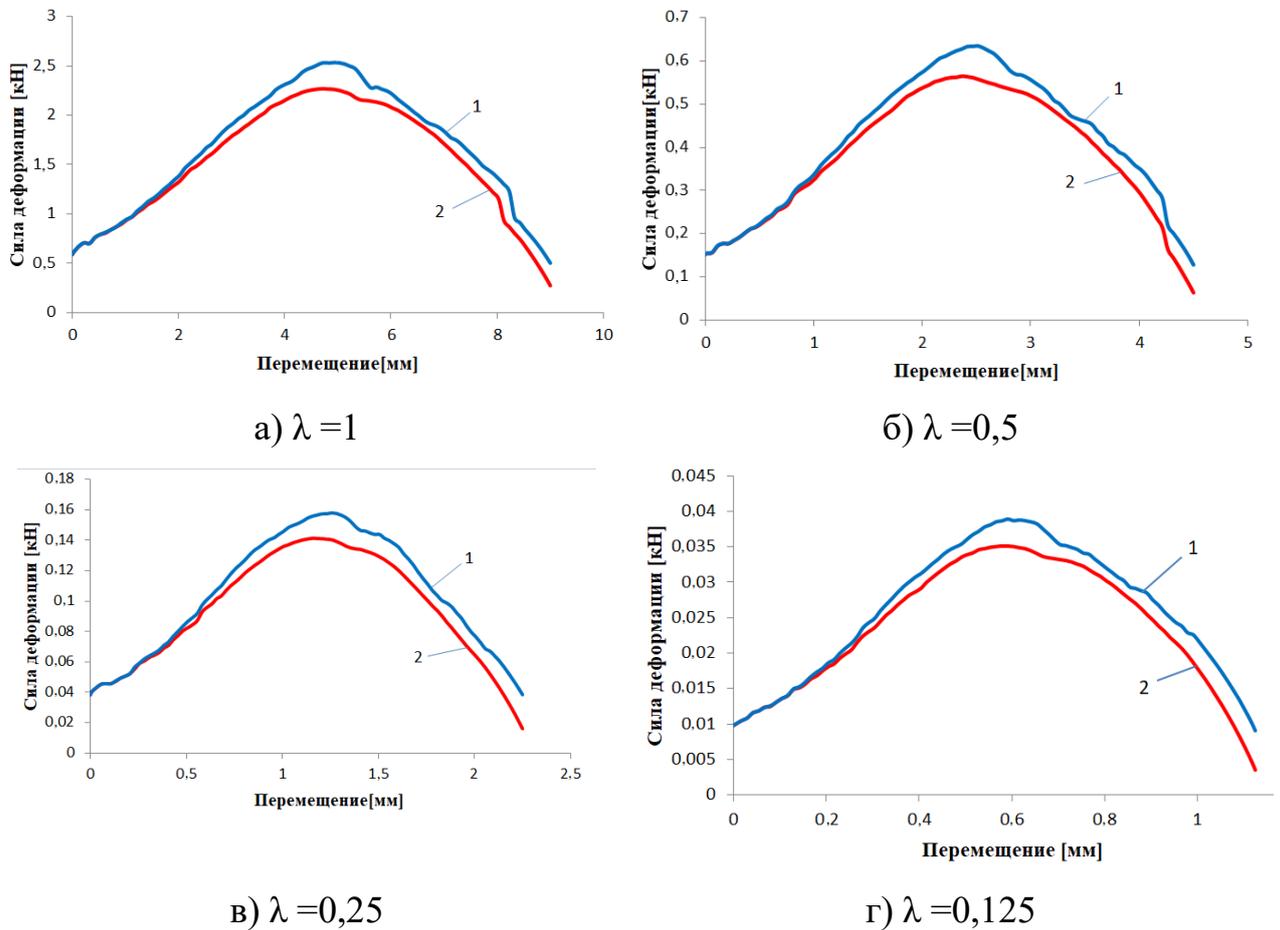


Рисунок 3.7. Графики зависимости силы деформирования от хода пуансона: без смазки (1) и со смазкой (2)

Таблица 2.6. Результаты моделирования по  $F_{\text{макс.}}$

$\lambda, [-]$	1	0,5	0,25	0,125
$F_{\text{макс.}}^{\text{см}}, [\text{H}]$	2,27	0,565	0,141	0,035
$F_{\text{макс.}}^{\text{б/см}}, [\text{H}]$	2,56	0,635	0,158	0,024

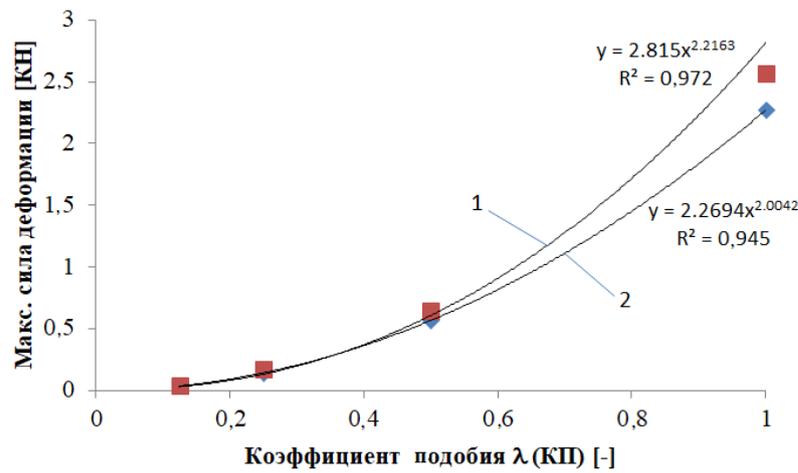


Рисунок 3.8. График зависимости  $F_{\text{макс.}}$  от  $\lambda$ : со смазкой (1) и без смазки (2)

Результаты моделирования показали, что степень влияния смазки на  $F_{\text{макс.}}$  уменьшается, при снижении  $\lambda$  с 1 до 0,125 (рисунок 3.9).  $F_{\text{макс.}}$  уменьшается на 11,3%, при использовании смазки и  $\lambda=1$ .  $F_{\text{макс.}}$  уменьшается на 9%, при использовании смазки и  $\lambda=0,125$ . Это объясняется тем, что уменьшение коэффициента подобия  $\lambda$  приводит к увеличению площади контактной поверхности между рабочей поверхностью инструмента и заготовкой, и роль трения увеличивается. Чем меньше размер ОСК и ЗСК, тем меньшее влияние оказывает смазка, что приводит к необходимости разработать отдельный метод смазки для процессов микроштамповки.

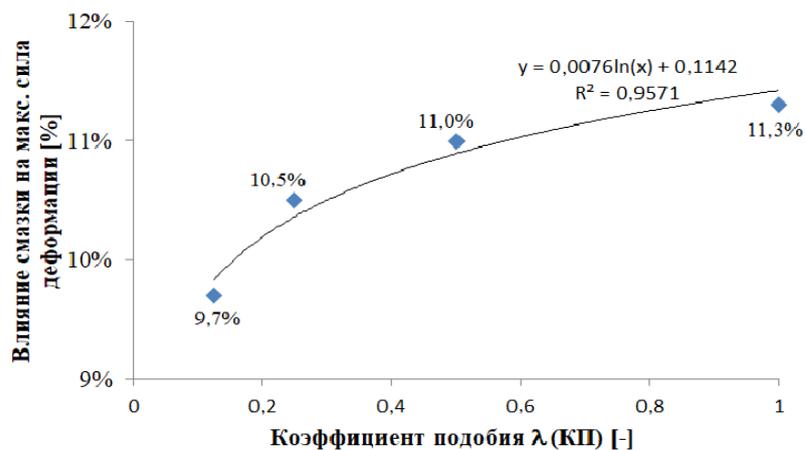


Рисунок 3.9. График степени влияния смазки на макс. силу деформирования

Результаты моделирования вытяжки стаканчика из алюминиевого сплава АД33 показали влияние геометрического размера исходной заготовки и инструментов, а также условия трения на технологические параметры. К основным определённым закономерностям относятся следующие:

- сила деформирования для условий трения без смазки выше, чем сила деформирования для условий трения со смазкой;
- уровень влияния смазки на макс. силу деформирования уменьшается при снижении коэффициента подобия.

### 3.3.2 Моделирование вытяжки с процессом теплообмена

**Задача 4.** Материал заготовки – латунь Л80. Скорость деформирования, ход инструмента и сила прижима показаны в табл. 3.7. Данные по толщине заготовок и величине зазора приведены в табл. 2.3

Таблица 3.7. Технологические параметры процесса микровытяжки

$\lambda$	1	0,5	0,25	0,125
V, мм/с	0,2	0,1	0,05	0,025
$h_{п}$ , мм	9	4,5	2,25	1,125
$F_{пр}$ , Н	2	1	0,5	0,25

Малые изменения силы деформирования  $\Delta F$  определялись, как разность силы деформирования  $F_i$  при  $\lambda = 1$  и  $V = 1$  мм/с (базовые значения) и силы деформирования  $F_j$  для рассматриваемого подобного случая или  $\Delta F = F_i - F_j$ .

Результаты моделирования показали, что сила деформирования уменьшается, при снижении коэффициента масштаба с 1 до 0,125 (рисунок 3.10). Это объясняется тем, что уменьшение коэффициента масштаба  $\lambda$  приводит к пропорциональному уменьшению диаметра пуансона. Значение

$F_{\text{макс.}}$  определяется, как максимальная сила, действующая на заготовку в процессе вытяжки. По результатам моделирования процесса микровытяжки, получено максимальное значение  $F_{\text{макс.}}$ , для соответствующих  $\lambda$ . На рис. 3.11 и в табл. 3.8 показана зависимость изменения  $F_{\text{макс.}}$  от коэффициентов подобия.

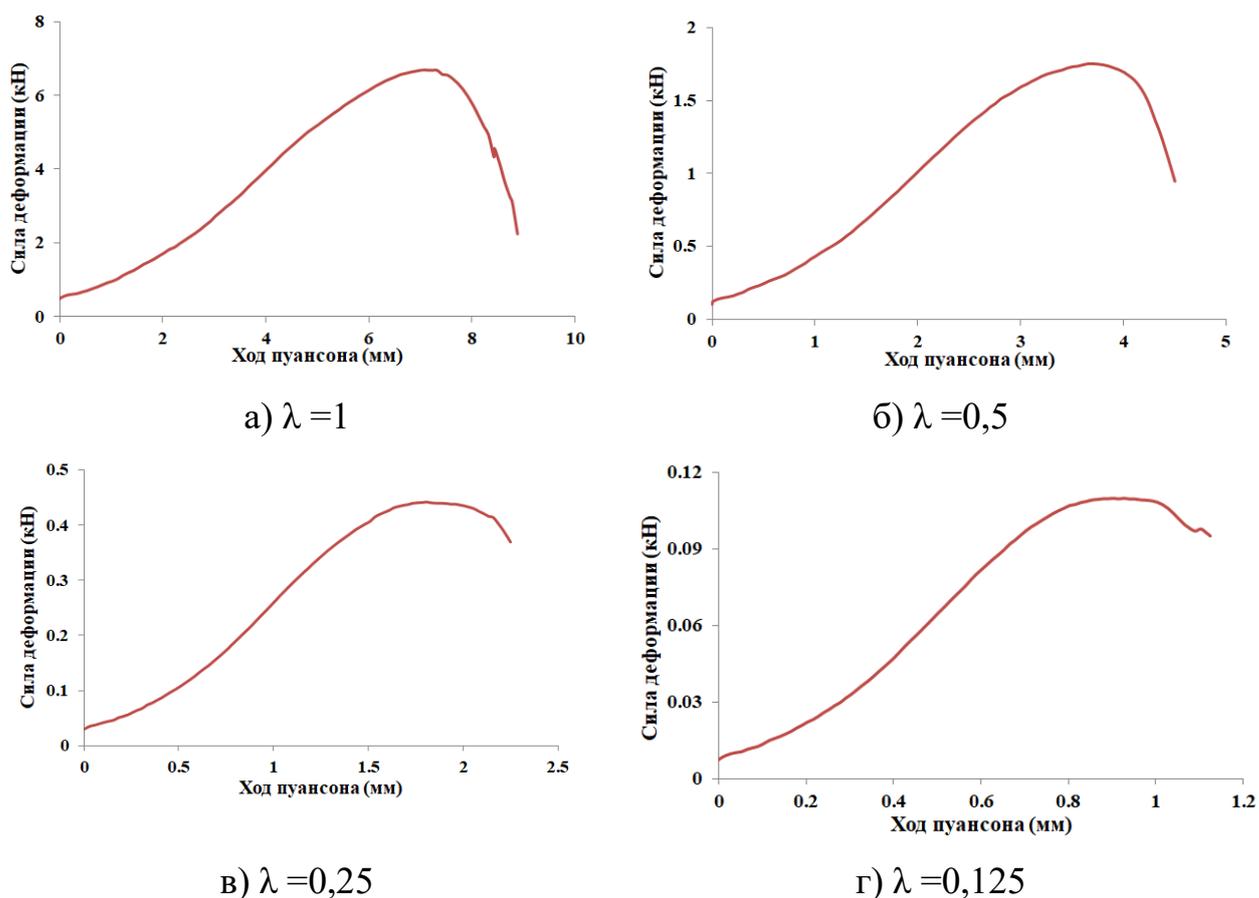


Рисунок 3.10. Графики силы деформирования от хода пуансона.

Таблица 3.8. Максимальные силы деформирования

$\lambda$	1	0,5	0,25	0,125
$F_{\text{макс.}}$	6,685	1,752	0,441	0,110

Максимальные силы деформирования слабо отличаются для разных значений  $\lambda$  при разных скоростях деформирования. Поэтому на рисунке 3.12 и в табл. 3.9 и 3.10 представлены их значения и разности  $\Delta F$  по сравнению с

базовым вариантом для случаев  $V=0,1$  мм/с ( $N=1$ ),  $V=10$  мм/с ( $N=2$ ) и  $V=100$  мм/с ( $N=3$ ).

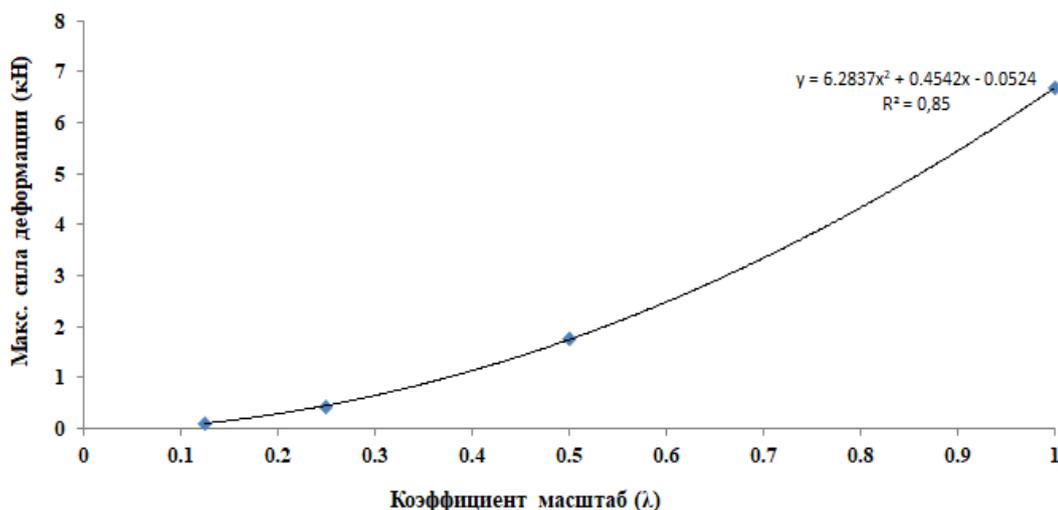


Рисунок 3.11. График зависимости  $F_{\text{макс.}}$  от  $\lambda$

Таблица 3.9. Значения  $F_{\text{макс.}}$  и  $V$

$\lambda$ , [-]	1				0,5			
$V$ , [мм/с]	0,1	1	10	100	0,1	1	10	100
$F_{\text{макс.}}$ , [кН]	6,671	6,645	6,627	6,620	1,746	1,743	1,741	1,740
$\lambda$ , [-]	0,25				0,125			
$V$ , [мм/с]	0,1	1	10	100	0,1	1	10	100
$F_{\text{макс.}}$ , [кН]	0,437	0,437	0,437	0,436	0,110	0,109	0,110	0,109

Таблица 3.10. Определение разницы силы деформирования  $\Delta F$

$\lambda$	1			0,5			0,25			0,125		
$N$	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$ \Delta F $ , [Н]	26	18	25	3,3	2	3,2	0,5	0,4	0,6	0,2	0,2	0,1

С увеличением скорости деформирования значение  $F_{\text{макс.}}$  уменьшается, что не соответствует нормальному реологическому поведению традиционных конструкционных материалов, при котором с увеличением скорости деформирования сила увеличивается. Разность  $\Delta F$ ,

взятая по абсолютной величине, уменьшается неодинаково для разных значений  $V$ .

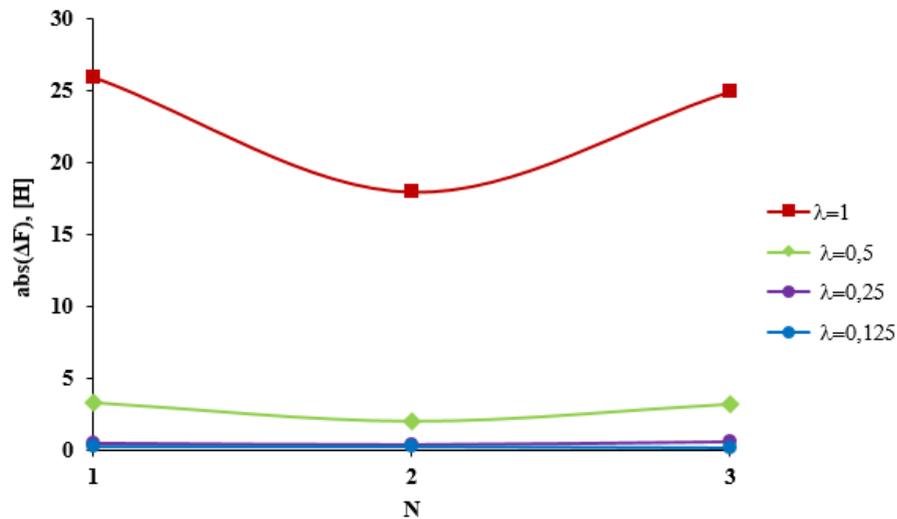


Рисунок 3.12. Графики зависимости разницы  $F_{\text{макс.}}$  от  $V$

Таблица 3.11. Максимальная температура и скорость деформирования

$\lambda, [-]$	1				0,5			
$V, [\text{мм/с}]$	0,1	1	10	100	0,1	1	10	100
$F, [\text{кН}]$	20,8	25,8	60	150	20,36	22,6	47	140
$\lambda, [-]$	0,25				0,125			
$V, [\text{мм/с}]$	0,1	1	10	100	0,1	1	10	100
$F, [\text{кН}]$	20,23	21,3	33	105	20,08	20,8	31,5	90

Результаты моделирования показали, что температура детали не изменилась при скорости деформирования  $V=0,1$  мм/с, независимо от  $\lambda$  и коэффициента теплопередачи. Максимальная температура для заготовки диаметром 8 мм, при  $\lambda=1$  и  $V=100$  мм/с, составила  $\sim 150^\circ\text{C}$ . При той же скорости деформирования максимальная температура детали, диаметром 1 мм, при  $\lambda=0,125$ , составила  $\sim 90^\circ\text{C}$  (рис. 3.13).

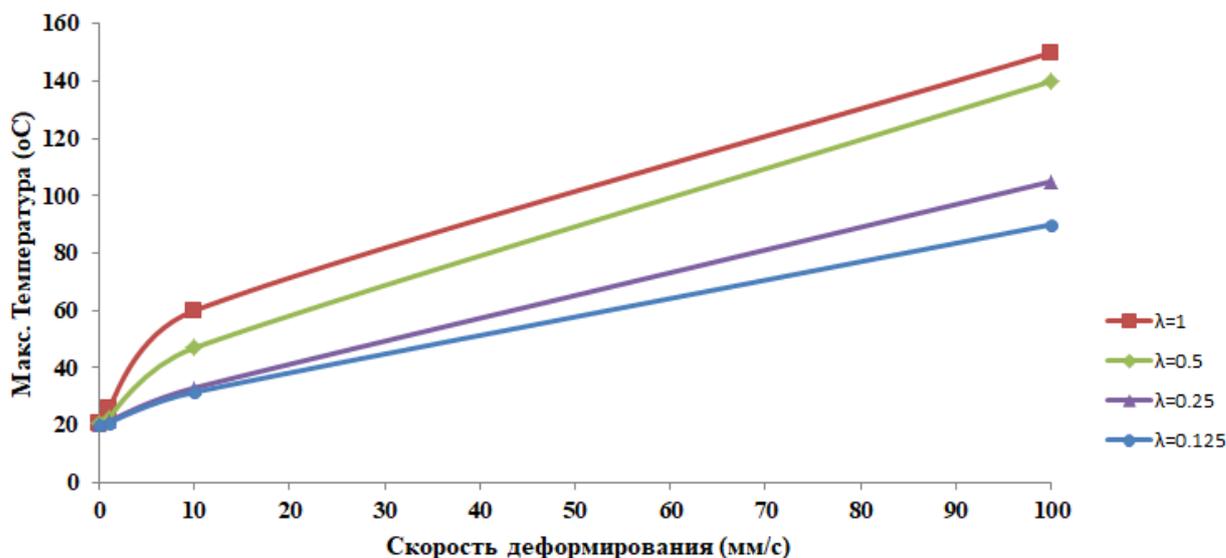


Рисунок 3.13 Взаимосвязь между максимальной температурой в заготовке и скоростью деформирования

Результаты моделирования вытяжки стаканчика из латуни Л80 показали влияние геометрического размера исходной заготовки и инструментов на технологические параметры. К основным определённым закономерностям можно отнести следующие:

- с уменьшением  $\lambda$  снижается и сила деформирования;
- увеличение  $V$  соответствует увеличению  $F_{\text{макс.}}$ , причём разности значений  $\Delta F$  неодинаковы;
- при низкой скорости деформирования  $V = 0,1$  мм/с температура процесса вытяжки не сильно изменяется в течение всего процесса, а с увеличением  $V$  и  $\lambda$  наблюдается увеличение температуры процесса микроштамповки.

### 3.3.3 Влияние коэффициента вытяжки на утонение стенки

**Задача V.** Коэффициент трения в этой задаче определяется законом Кулона. Процесс моделирования выполняется для трёх различных  $\lambda$ , а величина  $F_{\text{тр.}}$  и  $h_{\text{п}}$  совпадают с данными табл. 2.4.

Рассматривалась обратная коэффициенту вытяжки величина, степень вытяжки, определяемая согласно уравнению (3.2), для которой был выбран следующий размерный ряд, изменяющийся с шагом 0,1: 1,7; 1,8; 1,9; 2,0 и 2,1. Для оценки степени утонения стенки стаканчика толщина стенки стаканчика после моделирования сравнивалась с толщиной исходной заготовки. Степень утонения ( $\Delta$ ) стенки стаканчика рассчитывалась по уравнению (3.3), а для выявления влияния размерного эффекта использовалось уравнение (3.4).

$$B = \frac{D_3}{D_1} = \frac{1}{m}, \quad (3.2)$$

$$\Delta = \frac{t_0 - t_{\text{мин}}}{t_0} * 100\%, \quad (3.3)$$

$$t_{\text{мин}}^\lambda = \frac{t_{\text{мин}}}{\lambda}, \quad (3.4)$$

По результатам моделирования получены данные для построения графика влияния степени вытяжки на утонение стенки стаканчика при различных коэффициентах подобия (рис. 3.14). Результаты показывают, что по мере увеличения значения  $B$  минимальное значение толщины стенки стаканчика уменьшается нелинейно. В случае  $\lambda = 1$  минимальная толщина стенки стаканчика составляет 0,182 мм при  $B = 1,7$  и уменьшается до 0,151 мм при  $B = 2,1$ . В случае  $\lambda = 0,5$  минимальная толщина стенки стаканчика составляет 0,0896 мм при  $B = 1,7$  и уменьшается до 0,0731 мм при  $B = 2,1$ . И, наконец, в случае  $\lambda = 0,25$  минимальная толщина стенки стаканчика составляет 0,0443 мм при  $B = 1,7$  и уменьшается до 0,0362 мм при  $B = 2,1$ .

Оценка влияния степени вытяжки на степень утонения стенок стаканчика показана на рис. 3.15. Результаты показывают, что в случае  $\lambda = 1$  нелинейно увеличилось значение  $\Delta$  с 8,83% при  $B = 1,7$  до 24,62% при  $B = 2,1$ ; при  $\lambda = 0,5$  произошло нелинейное увеличение  $\Delta$  с 10,38% при  $B = 1,7$  до 26,87% при  $B = 2,1$ ; при  $\lambda = 0,25$  наблюдается нелинейное увеличение  $\Delta$  с 11,25% при  $B = 1,7$  до 27,51% при  $B = 2,1$ .

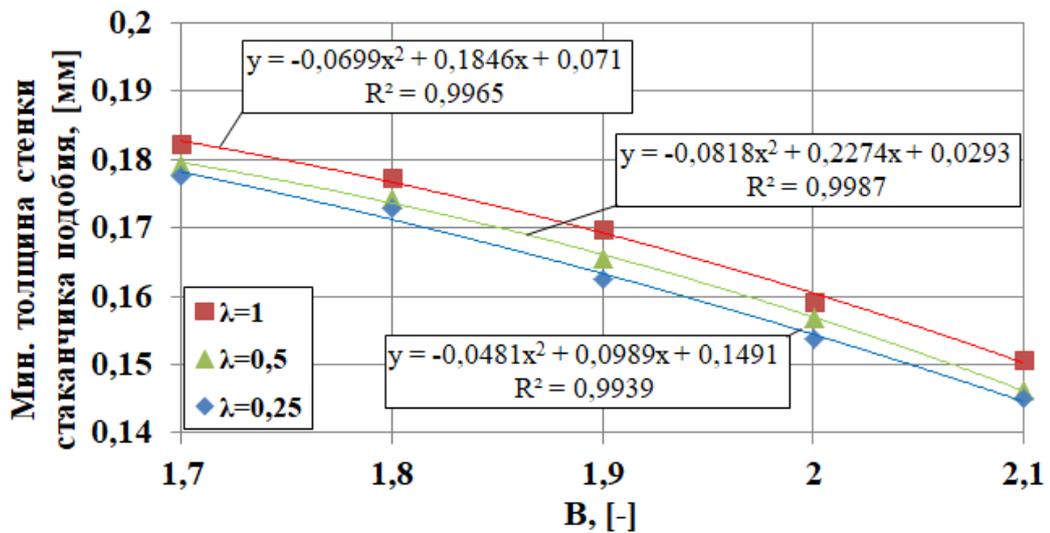


Рисунок 3.14. Влияние значения B на минимальное утонение стенки стаканчика для разных  $\lambda$

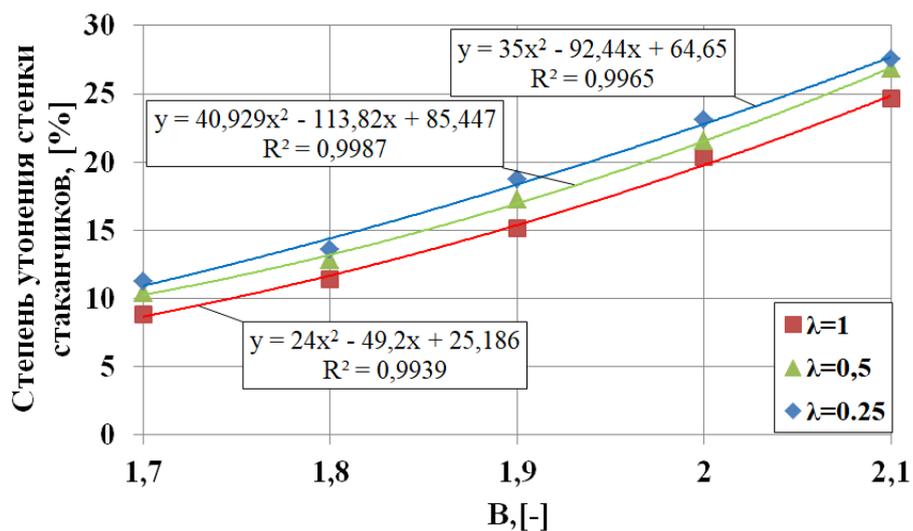


Рисунок.15. Влияние степени вытяжки на степень утонения стенки стаканчика для разных  $\lambda$

К основным установленным закономерностям относятся следующие:

- распределение толщины стенки стаканчика после микровытяжки неравномерное, а утончение стенки сосредоточено на входной кромке матрицы (у радиуса матрицы);
- с увеличением степени вытяжки увеличивается и степень утонения стенок стаканчика; при  $B = 2,1$  степень утонения

достигает величины  $\Delta \geq 25\%$ , что указывает на исчерпание запаса пластичности и на риск возникновения разрушения;

- коэффициент подобия также влияет на степень утонения стенок стаканчика: при уменьшении  $\lambda$  значение  $\Delta$  увеличивается.

### 3.3.4 Складкообразование в процессе микровытяжки

**Задача VI.** Определим основные уравнения, которые будут использованы в этой задаче. Соотношения между толщиной и зазором ( $K$ ) определится по уравнению (3.5), а степень складкообразования заготовки ( $M$ ) – по уравнению (3.6). Технологические параметры процесса микровытяжки совпадают с данными табл. 2.4. В табл. 3.12 приводятся результаты расчётов по начальным данным. Используется медная заготовка из М1.

$$K = \frac{c}{t_0}, \quad (3.5)$$

$$M = \frac{2(H_2' - H_1')}{D_2'} * 100\%, \quad H_1' = \frac{D_1' - D_2'}{2} \text{ и } H_2' = \frac{D_1' - D_3'}{2} \quad (3.6)$$

На рис. 3.16 показаны складки, образованные на стенке цилиндрической части стаканчика, без фланца. Принято, что расстояние между наружным ( $D1'$ ) и максимальным внутренним ( $D2'$ ) диаметрами определено как минимальное расстояние ( $H1'$ ), а расстояние между наружным ( $D1'$ ) и минимальным внутренним ( $D3'$ ) диаметрами определено как максимальное расстояние ( $H2'$ ).

Таблица 3.12 Значения соотношения между толщиной и зазором с различными значениями  $\lambda$ , размеры в [мм]

K, [-]	$\lambda$		
	1	0,5	0,25

	$D_M$	$C$	$t_0$	$D_M$	$C$	$t_0$	$D_M$	$C$	$t_0$
1	8,4	0,4	0,2	4,2	0,2	0,1	2,1	0,1	0,05
1,5	8,6	0,6	0,2	4,3	0,3	0,1	2,15	0,15	0,05
2	8,8	0,8	0,2	4,4	0,4	0,1	2,2	0,2	0,05
2,5	9,0	1,0	0,2	4,5	0,5	0,1	2,25	0,25	0,05

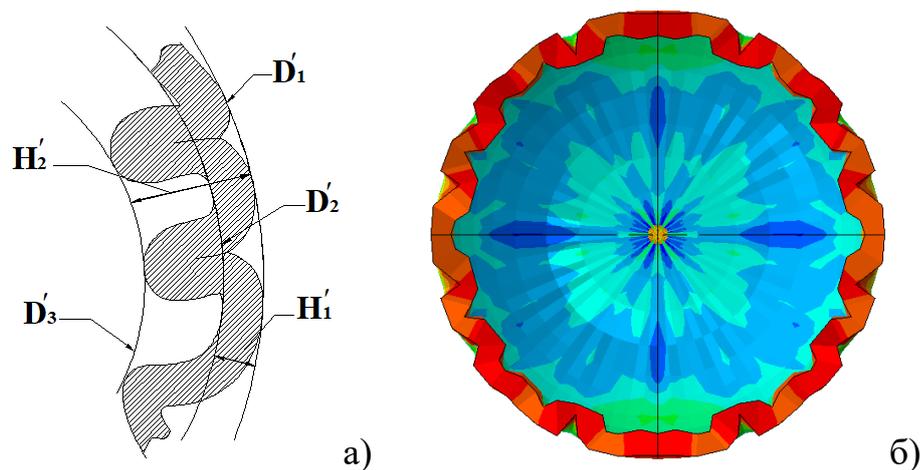


Рисунок 3.16. Определение параметров складкообразования стаканчиков  
(а), вид сверху при  $K = 2,5$  и  $t = 0,1$ (мм) (б)

Трение изменяется по закону трения Кулона, коэффициент трения принят одинаковым на всех контактных поверхностях  $\mu = 0,17$ . Материал моделируется как упругопластический материал с изотропной упругостью и с анизотропной пластичностью по критерию текучести Хилла, для учёта влияния неоднородности свойств в листовом материале после прокатки.

По полученным результатам построен график, показывающий влияние  $K$  на степень складкообразования при различных  $\lambda$  (рис. 3.16). Результаты показывают, что с ростом  $K$  повышается и  $M$  с 0,62% до 2,23% при  $\lambda = 1$  и с 1,09% до 3,25% при  $\lambda = 0,25$ . Степень складкообразования при  $\lambda = 0,25$  выше, чем при  $\lambda = 0,5$ , а при  $\lambda = 0,5$  выше, чем при  $\lambda = 1$ .

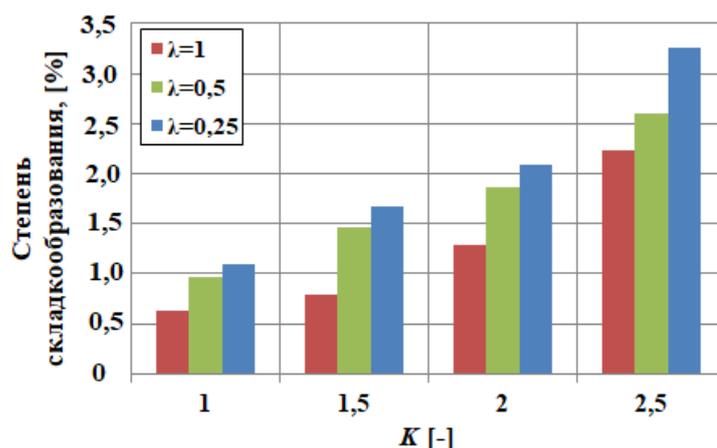


Рисунок 3.16. Сравнительные диаграммы M с разными K и  $\lambda$

Сначала складки появляются сконцентрировано в месте перехода от фланца к стенке, а затем постепенно распространяются по стенке. Уменьшение размеров изделия приводит к увеличению тенденции складкообразования: при уменьшении  $\lambda$  увеличивается складкообразование. Распределение толщины материала в продольном сечении стаканчика диаметральной плоскостью для различных K представлено на рис. 3.16. Толстой горизонтальной сплошной линией показана исходная толщина материала. Наименьшее значение K приводит к наибольшему уменьшению толщины стенки детали и в то же время увеличивает образование складок в месте перехода от донной части к стенке стаканчика (область (б)). Наоборот, увеличение значения K приводит к наименьшему утонению стенки (область (а)). Утонение материала заготовки в донной части для всех случаев одинаково. Материал получает наибольшее утолщение стенки при  $K = 2,5$ .

В табл. 3.13 приведены минимальные значения полученных толщин, на основании которых были построены графики степени утонения заготовки (рис. 3.17). Результаты моделирования показывают, что степень утонения в процессе микровытяжки снижается с увеличением K и  $\lambda$ . Аппроксимирующее уравнение может быть представлено линейной функцией вида  $y=Ax+B$ . Коэффициенты аппроксимации и наибольшее/наименьшее значения  $\Delta$  представлены в табл. 3.14.

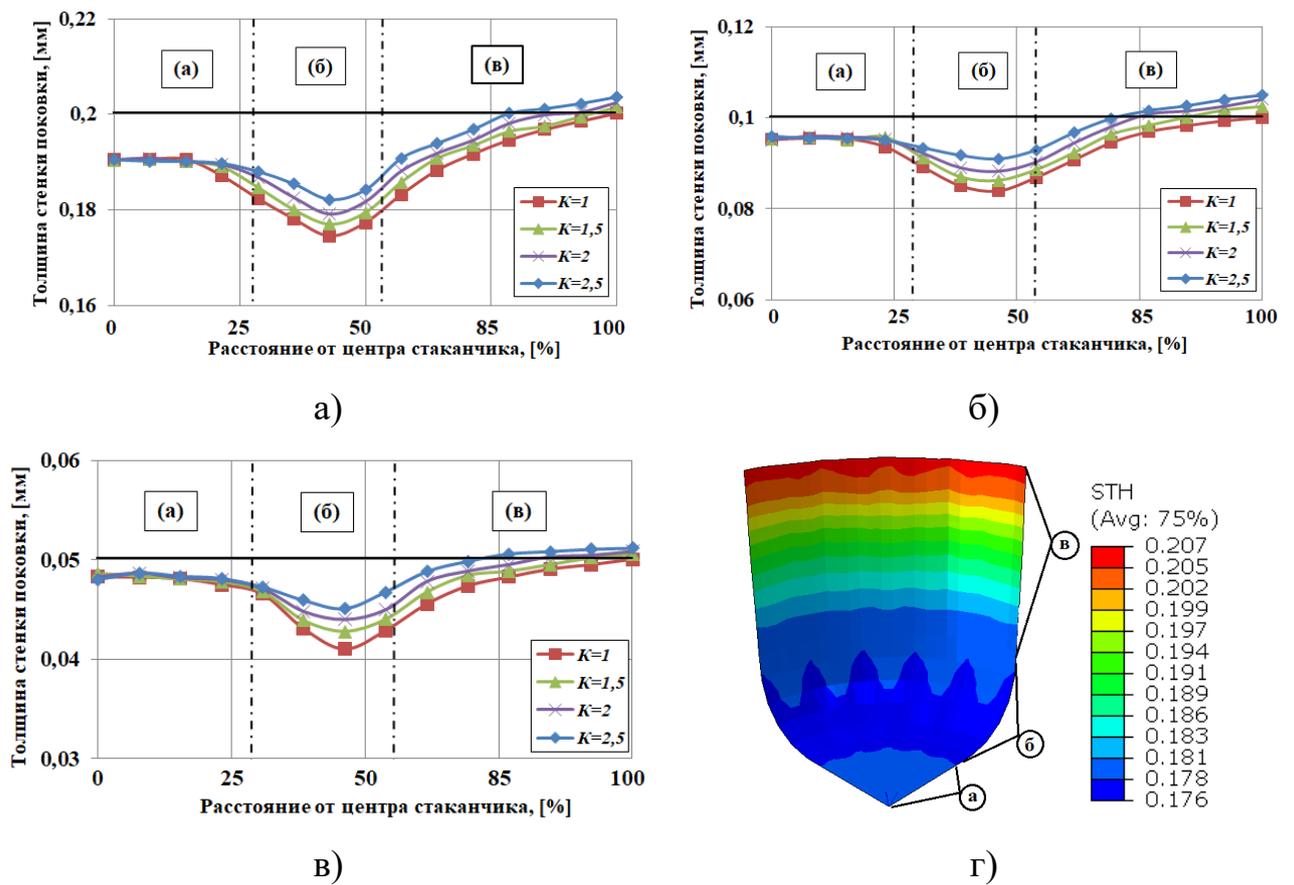


Рисунок 3.16. Сравнение распределения толщины стенок стаканчика:  $\lambda = 1$  (а),  $\lambda = 0,5$  (б),  $\lambda = 0,25$  (в); области: дно стаканчика (а), переходная область от донной части к стенке (б), стенка стаканчика (в); результат моделирования приведён для случая  $\lambda = 1$  и  $K = 1,5$ , показано поле распределения толщины стенок в [мм] (г).

Таблица 3.13 Минимальная толщина стенки стаканчика

$\lambda = 1$			$\lambda = 0,5$			$\lambda = 0,25$		
K [-]	S0	Sмин	K [-]	S0	Sмин	K [-]	S0	Sмин
1	0,2	0,174568	1	0,1	0,083894	1	0,05	0,041008
1,5	0,2	0,177017	1,5	0,1	0,086237	1,5	0,05	0,042806
2	0,2	0,179148	2	0,1	0,088266	2	0,05	0,043989
2,5	0,2	0,182188	2,5	0,1	0,090937	2,5	0,05	0,045081

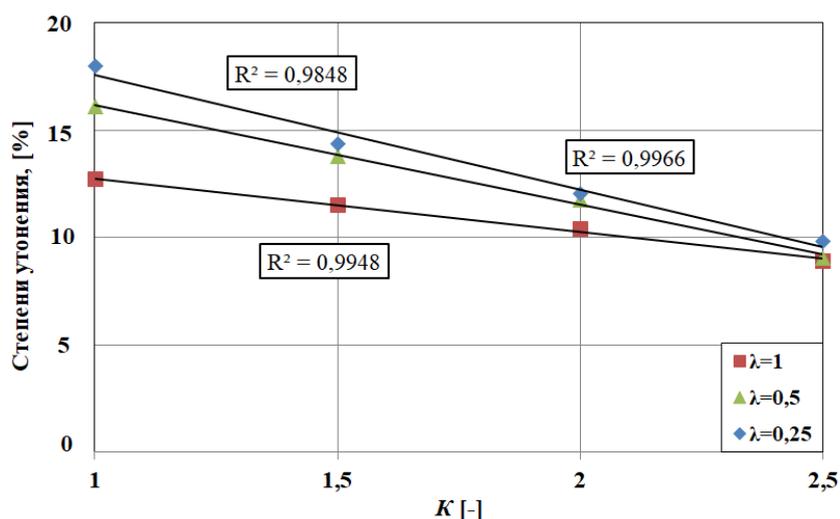


Рисунок 3.17. Графики изменения степени утонения стенки стаканчиков

Таблица 3.14 Значение коэффициентов аппроксимации для линейной функции  $\Delta$

$\lambda$	A	B	$\Delta_{\text{макс.}}$	$\Delta_{\text{мин.}}$
1	-0,0536	0,2294	12,72	8,91
0,5	-0,0462	0,2077	16,11	9,06
0,25	-0,025	0,1526	19,98	9,84

Максимальная сила деформирования определяется, как максимальная сила, действующая на заготовку в процессе вытяжки (рис. 3.18). Результаты моделирования показали, что сила деформирования уменьшается при повышении K. Силы трения, действующие на фланец, а также силы трения, действующие на заготовку при ее скольжении по радиусу матрицы, увеличивают значение максимального растягивающего напряжения  $\sigma_p$  (рис. 2.6), возникающего на границе между фланцем и образующейся стенкой стаканчика. Этот факт также приводит к увеличению значений максимального растягивающего напряжения. Максимальные силы деформирования немного отличаются при  $\lambda = 0,5$  и  $\lambda = 0,25$  для разных K. Это объясняется тем, что  $\lambda$  приводит к пропорциональному уменьшению диаметра пуансона ( $D_p$ ). Данные могут быть аппроксимированы также

линейной функцией, коэффициенты аппроксимации которой представлены в табл. 3.15.

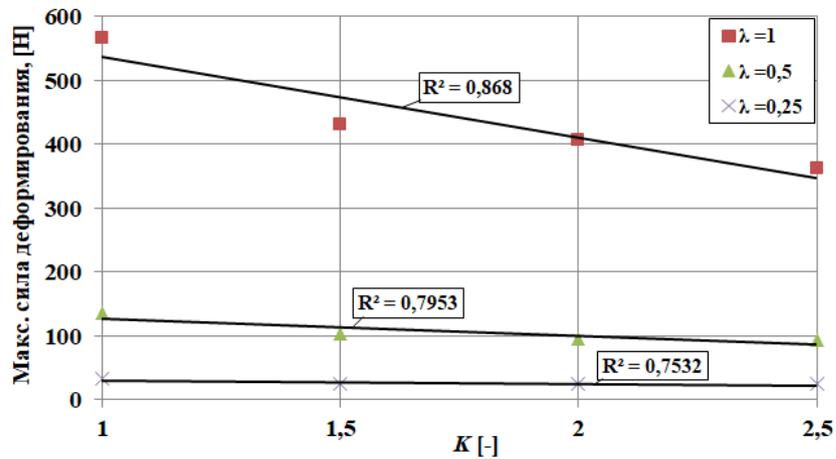


Рисунок 3.18. Графики изменения максимальной силы деформирования

Таблица 3.15 Значение коэффициентов аппроксимации для линейной функции  $F_{\text{макс}}$ .

$\lambda$	A	B	$\Delta_{\text{макс}}$	$\Delta_{\text{мин}}$
1	-127,22	664,69	567,555	363,556
0,5	-27,061	154,93	136,025	94,225
0,25	-5,1818	36,001	32,636	24,267

На рис. 3.19 показаны получаемые моделированием варианты складкообразования для разных К и  $\lambda$ . Получены как варианты, при которых складки присутствуют на ярко выраженных фестонах (при  $K = 1$  и  $\lambda = 1$ , а также  $K = 2,5$  и  $\lambda = 0,25$ ), а также варианты складок, постепенно распространяющихся сверху вниз по стенке. Максимальному складкообразованию соответствует ярко красный цвет поля, а минимальному – тёмно-синий.

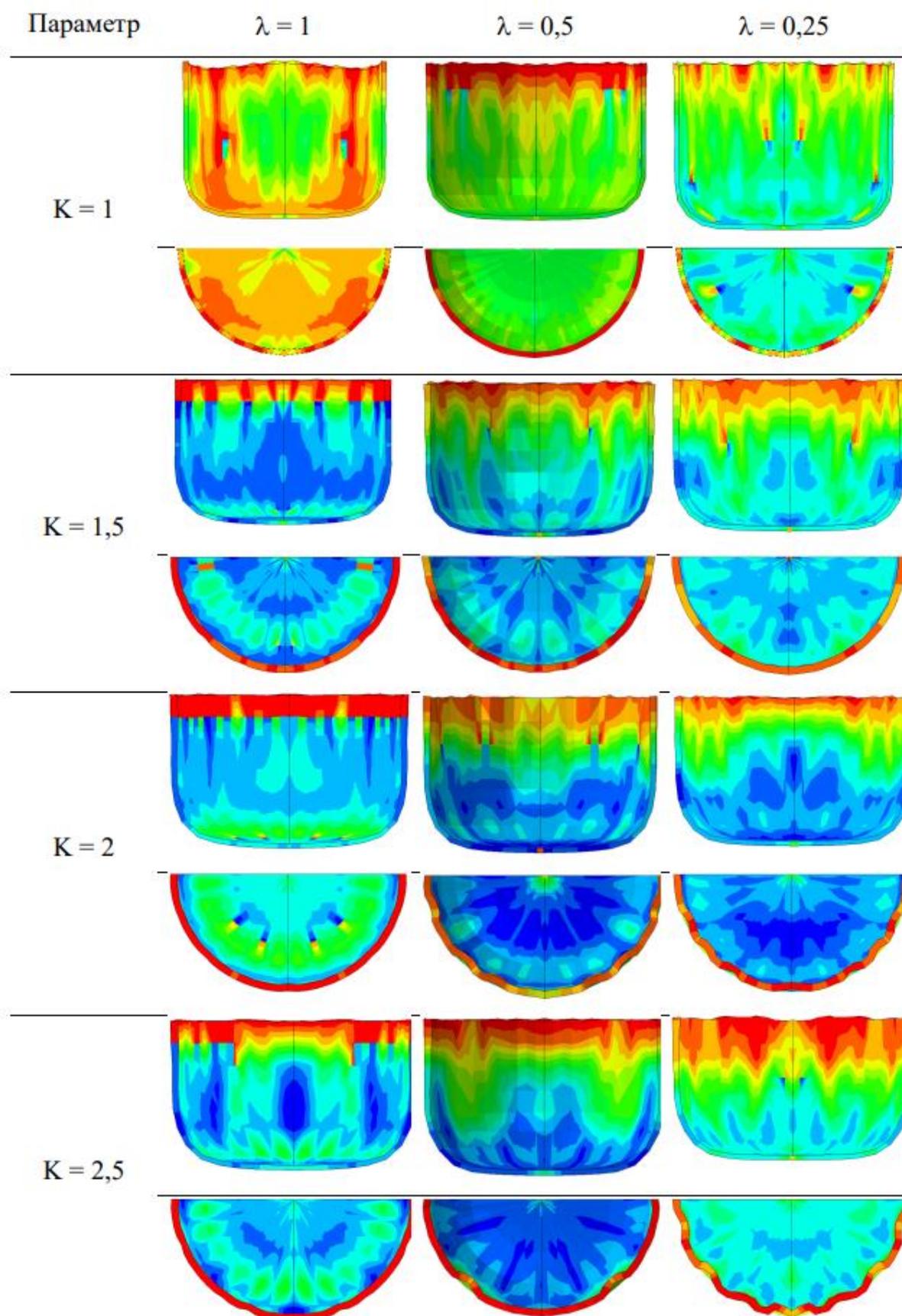


Рисунок 3.19. Результаты моделирования процесса микровытяжки и образование дефектов в виде складок и фестонов

### 3.4 Влияние несоосности инструмента на результат микровытяжки

**Задача VII.** На рис. 3.20 показаны места разрушения заготовки для двух разных ИРП и двух вариантов несоосности пуансона и матрицы при деформировании заготовки из меди М1, моделирование в программе QForm. В случае нарушения соосности инструмента или сдвига заготовки от идеального исходного положения на матрице в одном (по оси OX) или в двух (по осям OX и OY) направлениях на расстояние всего 0,05 мм, наблюдается резкий рост интенсивности напряжений и образование мест потенциального разрушения уже при величине перемещения пуансона 2,7...3 мм.

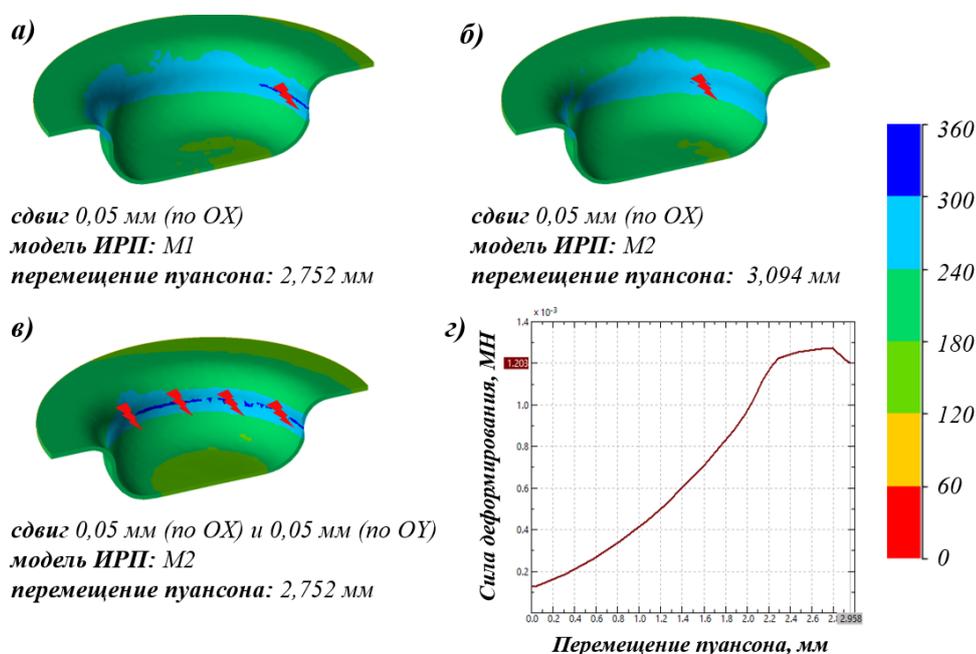


Рисунок 3.20. Поля интенсивности напряжений (операция 2), с учётом сдвига заготовки (молниями показаны места разрушения материала)

### 3.5 Взаимосвязь технологических параметров процесса микровытяжки

Взаимосвязи рассмотрены на основании математических моделей, полученных в виде уравнений регрессии, для результатов виртуального моделирования.

### 3.5.1 Построение линейного уравнения регрессии

В рамках задачи VIII будем искать уравнение зависимости между максимальной силой деформирования, коэффициентом трения и степенью вытяжки в виде линейного уравнения регрессии (3.7).

$$F_{\text{макс.}} = a_0 + a_1^{\text{cp}} \mu; a_1^{\text{cp}} = \sum_n \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}; a_0 = b_0 + b_1 m \quad (3.7)$$

Для выполнения численного моделирования была применена программа Abaqus CAE, в которой реализован алгоритм расчёта по методу конечных элементов (МКЭ) [108].

Задача решалась в осесимметричной трёхмерной (3D-) постановке. Геометрия инструментов (матрица, пуансон и прижим) моделируется, как аналитическая жёсткая поверхность (analytical rigid surface). Заготовка моделируется, как элемент оболочки (shell element), для которого назначены КЭ типа S4R/S3R. В начале этапа анализа пуансон, матрица и прижим располагаются на расстоянии половины толщины оболочки, относительно средней плоскости толщины заготовки. Задаются степени свободы (DoF) для исходной геометрии. Для аналитически жёстких поверхностей применены: заделка матрицы (DoF=0), перемещение прижима в противоположном движению пуансона направлении (DoF=1), перемещение пуансона вертикально вниз (DoF=1). Параметры, используемые в процессе исследования, включают 3 основных параметра: коэффициент трения ( $\mu$ ), степени вытяжки (B) и сила прижима ( $F_{\text{пр}}$ ).

Коэффициенты трения между заготовкой, прижимом ( $\mu_{\text{прижим}}$ ), поверхностью матрицы ( $\mu_{\text{матрица}}$ ), а также между заготовкой и пуансоном ( $\mu_{\text{пуансон}}$ ) имеют одинаковое значение в эксперименте, так как используется одно и то же смазочное вещество. Это было отражено и при задании граничных условий перед моделированием ( $\mu_{\text{прижим}} = \mu_{\text{матрица}} =$

$\mu_{\text{Пуансон}}$ ). Коэффициент трения определяется законом трения Кулона-Амонтона. Реологические свойства материала заготовки описывались выражение Людвига-Холломона, согласно уравнению (3.8).

$$\sigma_T = K\varepsilon^n \quad (3.8)$$

Рассматриваются следующие ряды варьируемых переменных степени вытяжки (В), коэффициента трения ( $\mu$ ) и силы прижима ( $F_{\text{пр}}$ ), согласно табл. 3.16:

$$\begin{aligned}
 &B = 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,1 \text{ и } 2,2; \\
 &\mu = 0,04; 0,06; 0,08; 0,12; 0,13 \text{ и } 0,14; \\
 &t=0,2 \text{ [мм]} \text{ для } \lambda=1; t=0,1 \text{ [мм]} \text{ для } \lambda=0,5; t=0,05 \text{ [мм]} \text{ для } \lambda=0,25.
 \end{aligned}$$

Таблица 3.16. Значения  $F_{\text{пр}}$  в зависимости от  $\lambda$

$\lambda$	x	2x	4x	8x	16x
1	50	100	200	400	800
0,5	25	50	100	200	400
0,25	12,5	25	50	100	200

По полученным результатам построена серия графиков, показывающая зависимости искомых технологических параметров. Графики имеют линейный характер изменения, а угол наклона к оси абсцисс отражает взаимный характер влияния параметров (рис. 3.21). Так, с ростом коэффициента трения и степени вытяжки увеличивается требуемая сила деформирования.

На рис. 3.22 представлены зависимости максимальной силы деформирования подобия ( $F_{\text{макс}}^\lambda$ ) от коэффициента трения и коэффициента подобия. Тенденция для разных коэффициентов вытяжки сохраняется,

растёт сила деформирования. Однако, с уменьшением размеров образцов сила деформирования также увеличивается.

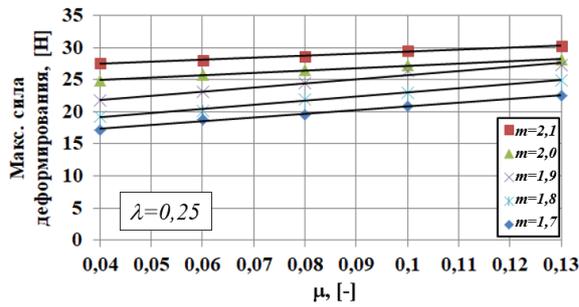
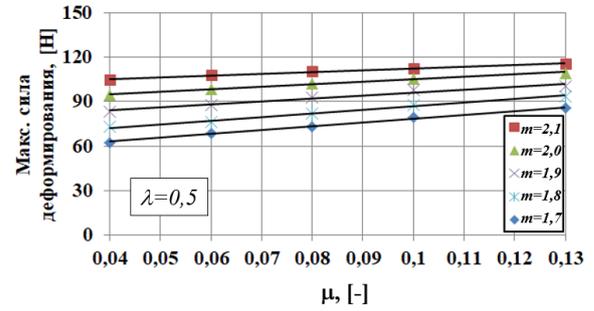
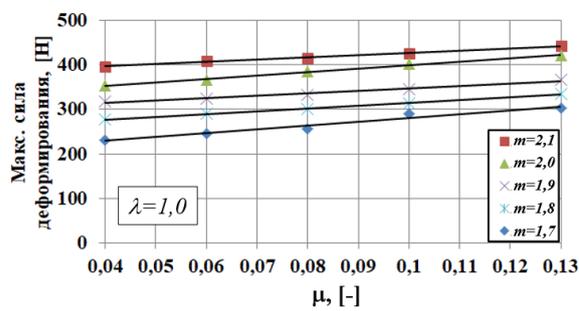
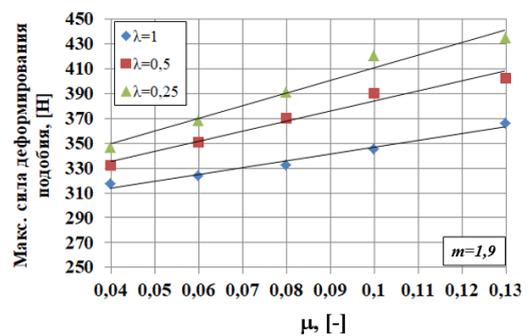
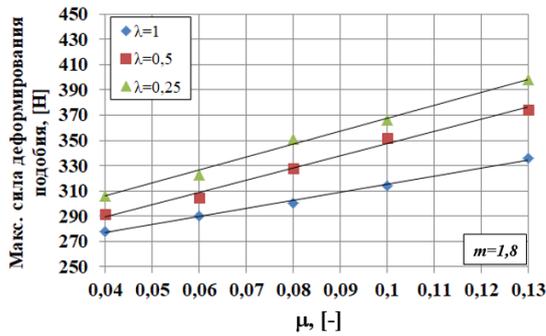
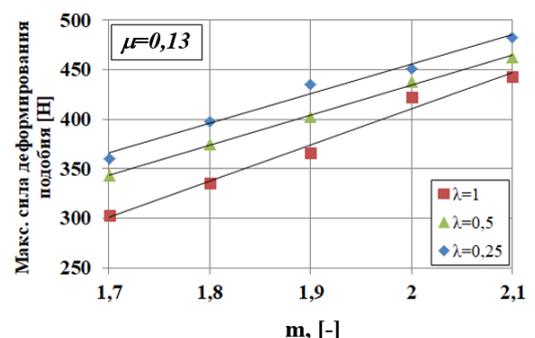
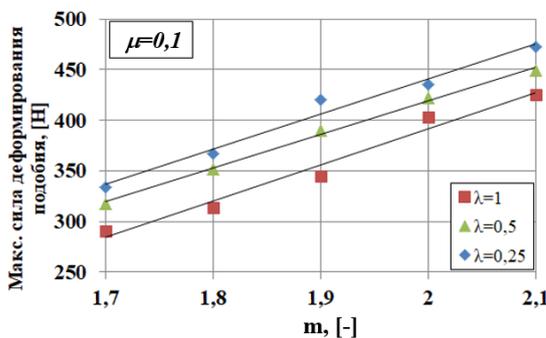


Рисунок 3.21. Влияние коэффициента трения на максимальную силу деформирования



а) влияние коэффициента трения



б) влияние степени вытяжки

Рисунок 3.22. Зависимости  $F_{\max}^{\lambda}$  от коэффициента трения и степени

ВЫТЯЖКИ

Подобный характер свойственен для микроштамповки, так как отношение толщины заготовки к среднему размеру зерна уменьшается, то есть прочностные характеристики растут [27]. Результаты хорошо согласуются и с теорией образования смазочных карманов, возникновение которых приводит к резкому росту требуемой силы деформирования [135]. Для двух случаев получены почти идентичные результаты. В таблицах 4 и 5 представлены коэффициенты уравнения регрессии и сами уравнения, точность получения которых достаточно высока, так как квадратичное отклонение превышает значение  $R^2=0,95$ . Установлено, что значение ( $a_0^{cp}$ ) имеет почти линейную связь с коэффициентом вытяжки, как показано на рис. 3.23.

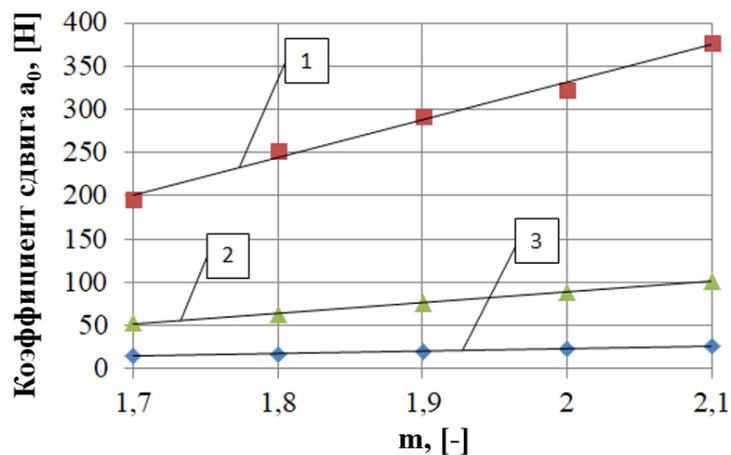


Рисунок 3.23. Влияние степени вытяжки на коэффициент сдвига для различных значений  $\lambda$ : (1)  $\lambda=1$ ; (2)  $\lambda=0,5$  и (3)  $\lambda=0,25$ .

Таблица 3.17. Коэффициенты линейного уравнения регрессии

$\lambda$	B	$a_0$	$a_1$	$R^2$	$a_1^{cp}$
1	1,7	195,21	856,26	0,961	663,0
	1,8	251,54	637,19	0,996	
	1,9	292,07	550,39	0,977	
	2,0	322,56	777,71	0,992	
	2,1	377,24	493,41	0,993	

0,5	1,7	52,83	258,36	0,094	196,18
	1,8	62,77	241,36	0,991	
	1,9	75,89	201,11	0,973	
	2,0	88,77	163,41	0,993	
	2,1	100,79	116,67	0,991	
0,25	1,7	14,99	58,25	0,992	50,88
	1,8	16,55	64,31	0,994	
	1,9	19,32	63,76	0,971	
	2,0	23,52	36,72	0,991	
	2,1	26,19	31,35	0,981	

Таблица 3.18. Линейные уравнения регрессии для осреднённых значений коэффициентов

$\lambda$	$a_0^{cp}$	$a_1^{cp}$
1	-538,93+435,08m	663,0
0,5	-155,44+121,92m	196,18
0,25	-35,689+29,37m	50,88
Уравнение линейной регрессии		$R^2$
$F_{\text{макс}} = -538,93+435,08m+663\mu$		0,9904
$F_{\text{макс}} = -155,44+121,92m+196,18\mu$		0,9981
$F_{\text{макс}} = -35,689+29,37m+50,88\mu$		0,9789

Таким образом, линейная функция может быть выбрана для описания отношения между коэффициентом вытяжки и точками сдвига и пересечения.

На рис 3.24 получены графики, показывающие влияние коэффициента трения и степени вытяжки на минимальную толщину стенки детали «Стаканчик» для различных коэффициентов трения. При увеличении

коэффициента трения процесс втягивания заготовки в матрицу затрудняется, что приводит к утонению стенки стаканчика.

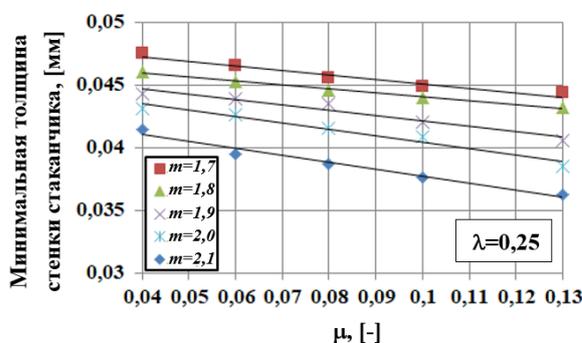
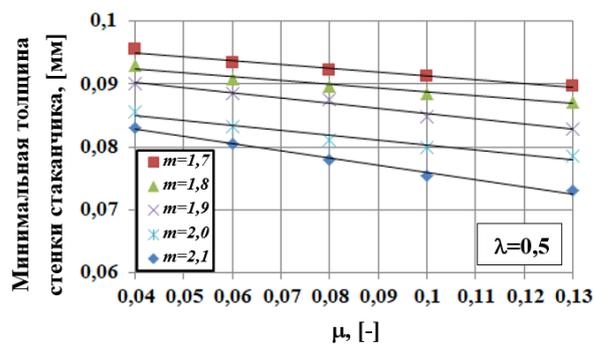
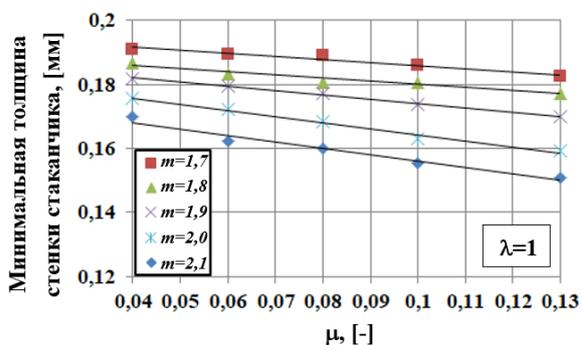


Рисунок 3.24. Влияние коэффициента трения на минимальную толщину стенки детали с разными коэффициентом ВЫТЯЖКИ

Результаты показывают, что коэффициент трения ( $\mu$ ) повышается степень утонения стенки стаканчика следующим образом (рис. 3.25):

- с 6,71% до 11,38% при  $\lambda=1$ ,  $V=1,8$  и с 9,13% до 15,13% при  $\lambda=1$ ,  $V=1,9$ ;
- с 7,02% до 12,81% при  $\lambda=0,5$ ,  $V=1,8$  и с 9,98% до 17,21% при  $\lambda=1$ ,  $V=1,9$ ;
- с 7,82% до 13,56% при  $\lambda=1$ ,  $V=1,8$  и с 11,33% до 18,76% при  $\lambda=1$ ,  $V=1,9$ .

Степень утонения стенки при  $\lambda=0,25$  выше, чем при  $\lambda=0,5$ , а при  $\lambda=0,5$  выше, чем  $\lambda=1$ .

Построен график, показывающий влияние силы прижима на максимальную силу деформирования при различных коэффициентах трения и вытяжки (рис. 3.26). Результаты показывают, что основные

технологические факторы тесно связаны с максимальной силой деформирования.

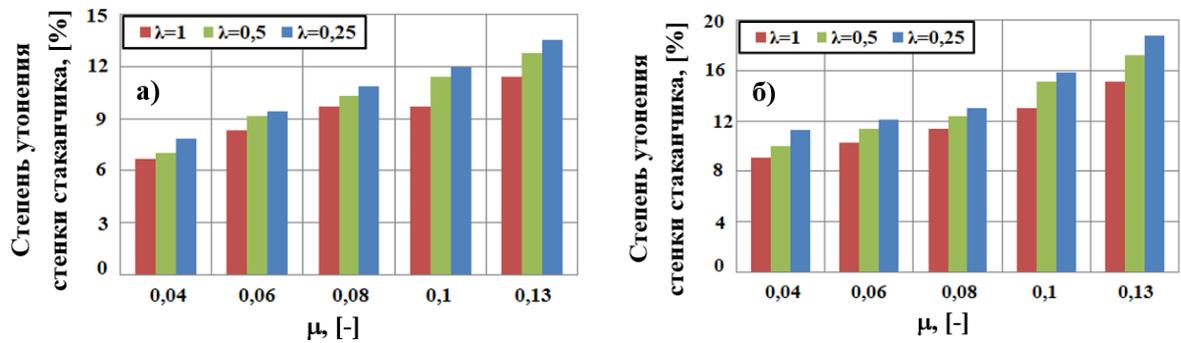


Рисунок 3.25. Сравнение степени утонения стенки стаканчиков с разными коэффициентами подобия  $\lambda$  и для: (а)  $V=1,8$  и (б)  $V=1,9$

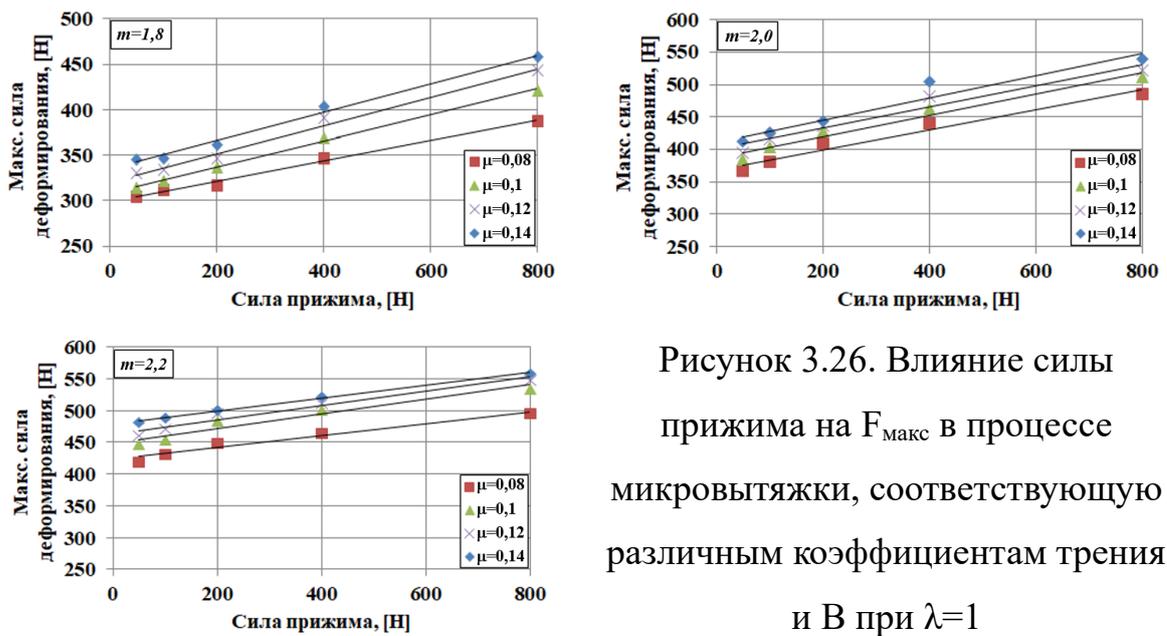


Рисунок 3.26. Влияние силы прижима на  $F_{\max}$  в процессе микровытяжки, соответствующую различным коэффициентам трения и  $V$  при  $\lambda=1$

Сила деформирования пропорциональна радиальному напряжению во фланце. При увеличении силы прижима увеличивается радиальное напряжение, что увеличивает требуемую силу деформирования следующим образом:

- с 314,64 [Н] при  $P_{\text{пр}} = 50$  [Н] до 421,68 [Н] при  $P_{\text{пр}} = 800$  [Н] для случая  $\lambda=1$ ,  $\mu=0,1$  и  $V=1,8$ ;

- с 383,89 [Н] при  $P_{пр} = 50$  [Н] до 512,01 [Н] при  $P_{пр} = 800$  [Н] для случая  $\lambda=1$ ,  $\mu=0,1$  и  $V=2,0$ ;
- с 446,42 [Н] при  $P_{пр} = 50$  [Н] до 535,12 [Н] при  $P_{пр} = 800$  [Н] для случая  $\lambda=1$ ,  $\mu=0,1$  и  $V=2,2$ .

При увеличении коэффициента вытяжки и коэффициента трения максимальная сила деформации также увеличивается. Это легко объясняется тем, что при увеличении коэффициента вытяжки и сохранении диаметра пуансона увеличивается диаметр заготовки. По этой причине значительно увеличивается площади контакта между поверхностью прижима и заготовкой, а также между поверхностью матрицы и заготовкой, что в итоге увеличивает силу деформирования. Так, для  $P_{пр} = 100$  [Н] и  $\mu=0,1$  для случая  $\lambda=1$  получаем следующие значения:  $F_{\max} = 322,33$  [Н] при  $V=1,8$ ;  $F_{\max} = 402,35$  [Н] при  $V=2,0$  и  $F_{\max} = 454,56$  [Н] при  $V=2,2$  (рис. 3.26). С увеличением коэффициента трения ( $\mu$ ) с 0,08 до 0,14 повышается сила деформирования:

- с 312,31 [Н] до 347,21 [Н] при  $\lambda=1$ ,  $V=1,8$ ;
- с 381,43 [Н] до 425,81 [Н] при  $\lambda=1$ ,  $V=2,0$ ;
- с 431,95 [Н] до 489,54 [Н] при  $\lambda=1$ ,  $V=2,2$ .

Результаты показывают, что по мере увеличения силы прижима утонение стенки стаканчика увеличивается и становится максимальным в месте перехода от стенки к донной части. При превышении значения относительного удлинения материала появляются трещины, которые увеличиваются, что приводит к отрыву донной части стаканчика. С увеличением сила прижима с 50 до 800 [Н] при  $\lambda=1$ ,  $\mu=0,1$  повышается сила деформирования с 7,47% до 16,62% при  $V=1,8$ . при дальнейшем увеличении коэффициента трения с 0,08 до 0,14 утонение стаканчика превысило относительное удлинение материала 30% и привело к разрушению стаканчика (области разрушения обозначены буквой «а», рис. 3.27). Увеличение силы прижима приводит к увеличению количества разрушаемых стаканчиков: 2 – при  $V=1,8$ ; 7 – при  $V=2,0$  и 16 – при  $V=2,2$ .

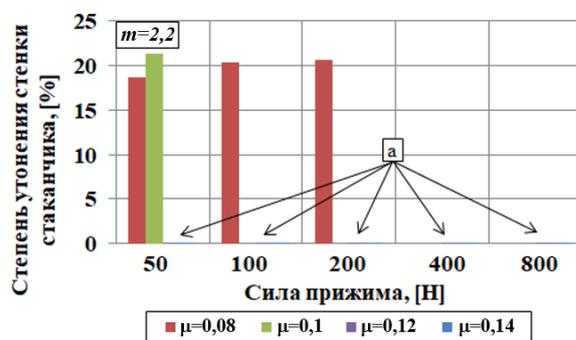
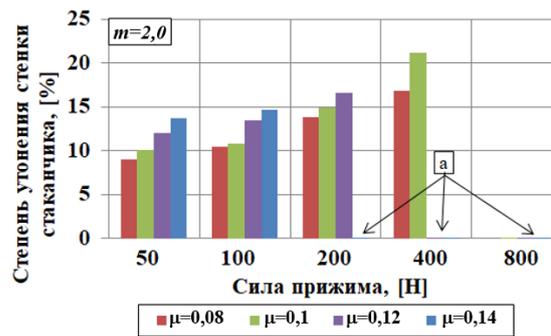
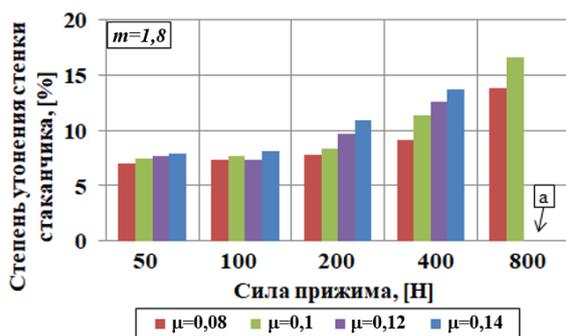


Рисунок 3.27. Влияние  $F_{пр}$  на степень утонения стенки стаканчика в процессе микровытяжки, соответствующую различным коэффициентам трения и вытяжки при  $\lambda=1$ ; случаи критического значения степени утонения «Стаканчика» (деформация свыше 30%) и разрушения («а»)

В процессе деформирования складки сначала появляются сконцентрировано в месте перехода от фланца к стенке, а затем постепенно переходят на стенки. Увеличение силы прижима приводит к увеличению тенденции складкообразования: при увеличении коэффициент трения ( $\mu$ ) и вытяжки ( $V$ ) складкообразование уменьшается (рис. 3.28). С ростом  $F_{пр}$  наблюдается уменьшение степени складкообразования с 3,13% до 1,88% при  $\lambda=1$ ,  $\mu=0,1$  и  $V=1,8$ . Степень складкообразования при  $V=1,8$  выше, чем при  $m=2,0$ , а при  $V=2,0$  выше, чем при  $m=2,2$ .

С целью поиска наиболее благоприятного сочетания технологических параметров процесса и изучения изменения процесса микровытяжки на основе теории подобия было промоделировано 180 случаев. Результаты моделирования представлены в табл. 3.19. Буквой «О» отмечены варианты,

при которых не наблюдается разрушения детали, а буквой «X» – случаи разрушения штампуемых деталей.

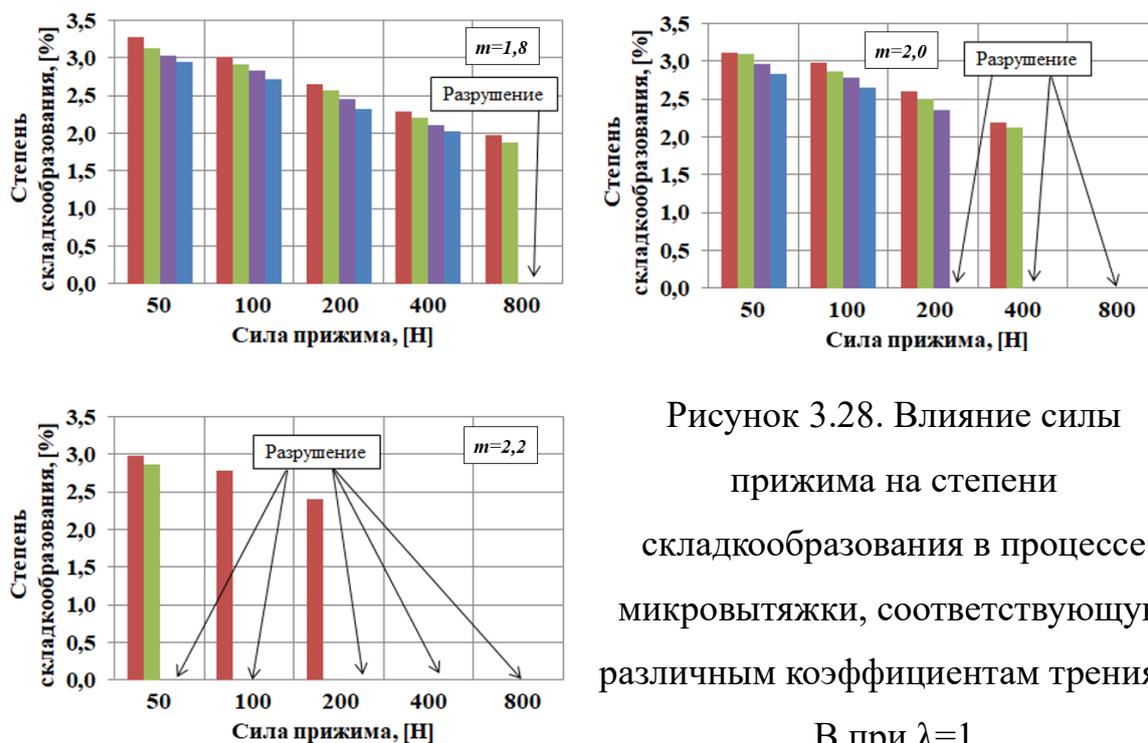


Рисунок 3.28. Влияние силы прижима на степени складкообразования в процессе микровытяжки, соответствующую различным коэффициентам трения и В при  $\lambda=1$

По полученным результатам видно, что при  $V=2,2$  будут всегда получаться наихудшие результаты, а при  $V=1,8$  – наилучшие. Хотя технологические параметры также уменьшаются пропорционально коэффициенту подобия, полученные результаты не одинаковы, что показывает особенности в работе с микродеталью и отличием от благоприятных условий, характерным для макроуровня.

Из результатов табл. 3.19 видно, что чтобы ограничить количество дефектов, процесс следует проводить при степени вытяжки от 1,8 до 1,9. Наилучший коэффициент трения находится в диапазоне 0,1...0,12. Наилучшая сила прижима лежит в диапазонах: 50...100 [Н] при  $\lambda=1$ , 25; 25...50 [Н] при  $\lambda=0,5$  и 12,5...25 [Н] при  $\lambda=0,25$ .

Таблица 3.19. Окно предпочтительных технологических параметров

$\mu$ , [-]	$F_{пр}$ , [H]	$\lambda$ , [-]								
		1			0,5			0,25		
		B, [-]								
		1,8	2,0	2,2	1,8	2,0	2,2	1,8	2,0	2,2
0,08	x	O	O	O	O	O	O	O	O	X
	2x	O	O	O	O	O	X	O	X	X
	4x	O	O	O	O	X	X	X	X	X
	8x	O	O	X	O	X	X	X	X	X
	16x	O	X	X	X	X	X	X	X	X
0,1	x	O	O	O	O	O	X	O	X	X
	2x	O	O	X	O	X	X	X	X	X
	4x	O	O	X	O	X	X	X	X	X
	8x	O	O	X	X	X	X	X	X	X
	16x	O	X	X	X	X	X	X	X	X
0,12	x	O	O	X	O	O	X	X	X	X
	2x	O	O	X	O	X	X	X	X	X
	4x	O	O	X	O	X	X	X	X	X
	8x	O	X	X	X	X	X	X	X	X
	16x	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0,14	x	O	O	X	O	X	X	X	X	X
	2x	O	O	X	O	X	X	X	X	X
	4x	O	X	X	X	X	X	X	X	X
	8x	O	X	X	X	X	X	X	X	X
	16x	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Таким образом можно сформулировать следующий вывод по задаче VIII. Процесс микровытяжки зависит от многих параметров и моделирование методом конечных элементов (МКЭ) является мощным

инструментом при проектировании штампов для листовой штамповки металла, также сокращает время и усилия, является действенной альтернативой методу проб и ошибок.

Результаты моделирования микровытяжки стаканчика из меди М1 выявили, что полученные результаты хорошо согласуются с известными фундаментальными результатами исследований. К основным установленным закономерностям можно отнести следующие:

Увеличение коэффициент трения ( $\mu$ ) с 0,04 до 0,13 приводит к увеличению максимальной силы деформирования, которая при  $\lambda=1$  меньше, чем при  $\lambda=0,5$ , а при  $\lambda=0,5$  меньше, чем при  $\lambda=0,25$ .

Увеличение степени вытяжки ( $m$ ) с 1,7 до 2,1 приводит к увеличению максимальной силы деформирования, которая при  $\lambda=1$  меньше, чем при  $\lambda=0,5$ , а при  $\lambda=0,5$  меньше, чем при  $\lambda=0,25$ . Увеличение коэффициент трения и вытяжки приводит к увеличению утонения стенки стаканчиков.

Составлена карта технологического окна процесса, позволяющая получать бездефектные детали при помощи моделирования. Для её валидации необходимо проведение серии натуральных экспериментов.

Установлено влияние толщины заготовки и зазора на механизм складкообразования. К основным установленным закономерностям можно отнести следующие.

- Сила деформирования пропорциональна радиальному напряжению во фланце: при увеличении силы прижима увеличивается радиальное напряжение, что приводит к росту силы деформирования.
- С ростом силы прижима утонение стенки стаканчика увеличивается и сосредотачивается в месте перехода от стенки к донной части стаканчика.
- Увеличение силы прижима приводит к увеличению склонности к складкообразованию, а при увеличении коэффициента трения ( $\mu$ ) и степени вытяжки ( $B$ ) складкообразование уменьшается.

Чтобы ограничить количество дефектов, процесс следует проводить при степени вытяжки ( $B$ ) от 1,8 до 1,9. Наилучшая сила прижима составляет диапазон 50...100 [Н] при  $\lambda=1$ ; 25...50 [Н] при  $\lambda=0,5$  и 12,5...25 [Н] при  $\lambda=0,25$  при коэффициенте трения  $\mu=0,1...0,12$ .

### 3.5.2 Построение пятифакторной модели максимальной силы деформирования

Рассмотрим мотивацию постановки заключительной задачи IX. Технологические процессы обработки давлением представляют сложную систему «заготовка-инструмент-оборудование» в связи с чем требуется системное изучение параметров процесса друг на друга. Для оценки степени влияния нескольких технологических параметров друг на друга и построения математической зависимости, в общемировой практике применяют методы многофакторного планирования эксперимента [113-117], для которого целевая функция определяется в виде полиномиальной зависимости на основании реальных экспериментов. В последние два десятилетия всё больше и больше в практику листовой штамповки поиска целевой функции вводятся результаты виртуальных испытаний или численного моделирования, например, при помощи моделирования методом конечных элементов (МКЭ) [118-120]. Общая схема реализации предлагаемой методики показана на рис. 3.29.

Целью выполнения задачи является построение пятифакторного полиномиального уравнения регрессии для определения степени влияния трёх геометрических и двух технологических параметров или факторов на максимальную силу деформирования ( $F_{\text{макс.}}$ ), определяемую по результатам МКЭ. Выбранная целевая функция отражает верхнюю возможную границу силы деформирования, которую можно рассматривать, как номинальную силу оборудования, технологически определённого для выполнения процесса микровытяжки [121].

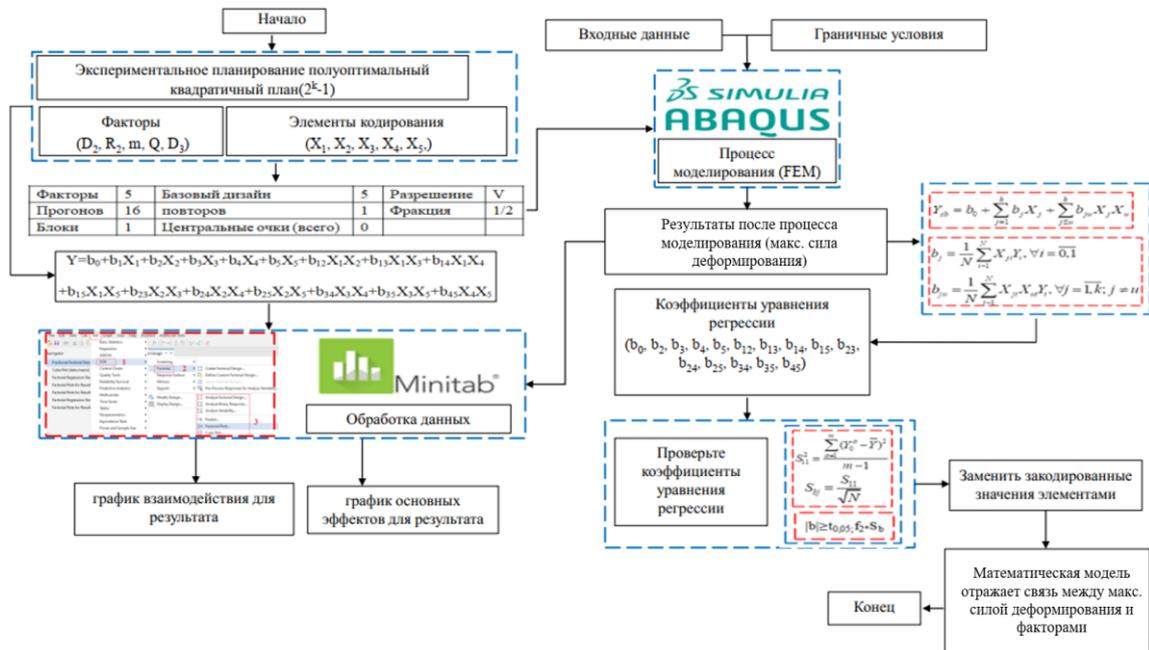


Рисунок 3.29. Блок-схема построения полиномиальной модели, показывающая связь максимальной силы деформации с технологическими факторами процесса микроштамповки

Исходные данные для построения плана виртуального эксперимента и решения задачи IX. Деформирующий инструмент состоит из матрицы ( $D_M=8,4 \dots 9$  мм,  $R_M=1,2 \dots 1,8$  мм), пуансона ( $D_{II}=8$  мм,  $R_{II}=1,5$  мм) и прижима. Рассматривается заготовка толщиной 200 мкм. Зазор между пуансоном и матрицей составляет  $C=0,2 \dots 0,5$  мм. Построение 3D-моделей инструмента выполнялось в САД-программе Autodesk Inventor, а технологическое моделирование – в САЕ-программе междисциплинарных расчётов Abaqus CAE.

Для выбора значимых факторов используются критерии, согласно которым избираемые факторы не связаны и не зависят от внешних факторов. Внешние факторы не являются значимыми для процесса микровытяжки. Значения значимых факторов должны быть измеримы в процессе микровытяжки. Для процесса микровытяжки выбираются пять значимых фактора, а именно: диаметр матрицы  $D_M$ , определяющий зазор между

пуансоном и матрицей ( $C = (D_m - D_n)/2$ ), радиус заходного ребра матрицы или ЗРМ  $R_m$ , коэффициент трения  $\mu$ , сила прижима  $F_{пр}$  и диаметр заготовки, который влияет на коэффициент вытяжки ( $D_3/D_n$ ). Изменения значений факторов по уровням показано в таблице 3.20. Процесс моделирования проводился с вариациями коэффициентов на двух уровнях.

Таблица 3.20 Факторы, влияющие на силу деформации в процессе микровытяжки

Факторы	Размерность	Кодирование	Диапазон изменения	Уровень значения		
				Макс. (+1)	Центр (0)	Мин. (-1)
$D_m$	[мм]	X1	0,3	9	8,7	8,4
$R_m$	[мм]	X2	0,3	1,8	1,5	1,2
$\mu$	[-]	X3	0,03	0,14	0,11	0,08
$F_{пр}$	[Н]	X4	75	200	125	50
$D_3$	[мм]	X5	0,8	16	15,2	14,4

В качестве материала рассматривается листовая заготовка из меди М1, с пределом прочности  $\sigma_b=260$  МПа, модулем упругости  $E=128$  ГПа и коэффициентом Пуассона  $\nu=0,34$ . Материал инструмента – инструментальная штамповая сталь 4Х5МФ1С с пределом прочности  $\sigma_b=1670$  МПа, модулем упругости  $E=207$  ГПа и коэффициентом Пуассона  $\nu=0,33$ . Коэффициент трения при моделировании является постоянной величиной и определяется по закону трения Кулона-Амонтона. Пластические свойства меди описывались уравнением Людвики-Холломона, согласно уравнению (3.8).

План эксперимента составлен случайным образом на основе программного обеспечения Minitab в соответствии с методом планирования эксперимента (Design of Experiment или сокр. DoE). При решении задачи в программе выбирался базовый дизайн плана на основе пяти факторов,

предусматривалось 16 прогонов по 1 блоку, с долей 0,5. Целевая функция максимальная сила деформирования ( $F_{\text{макс.}}$ ) определялась по результатам численного моделирования с набором факторов, согласно табл. 3.21.

Таблица 3.21. Результаты моделирования

№	Реальная переменная					Переменная кодирования						$F_{\text{макс}}$ [Н]
	$D_m$	$R_m$	$\mu$	$F_{\text{пр}}$	$D_3$	X0	X1	X2	X3	X4	X5	Y
1	8,4	1,8	0,14	200	14,4	1	-1	1	1	1	-1	538,665
2	8,4	1,2	0,08	50	16	1	-1	-1	-1	-1	1	508,744
3	8,4	1,2	0,14	200	16	1	-1	-1	1	1	1	720,521
4	8,4	1,8	0,08	200	16	1	-1	1	-1	1	1	615,461
5	9,0	1,8	0,14	50	14,4	1	1	1	1	-1	-1	346,348
6	9,0	1,2	0,08	50	14,4	1	1	-1	-1	-1	-1	320,556
7	9,0	1,2	0,14	200	14,4	1	1	-1	1	1	-1	407,442
8	8,4	1,2	0,08	200	14,4	1	-1	-1	-1	1	-1	496,724
9	9,0	1,2	0,14	50	16	1	1	-1	1	-1	1	342,026
10	9,0	1,8	0,14	200	16	1	1	1	1	1	1	620,732
11	9,0	1,8	0,08	50	16	1	1	1	-1	-1	1	380,445
12	8,4	1,2	0,14	50	14,4	1	-1	-1	1	-1	-1	564,073
13	8,4	1,8	0,08	50	14,4	1	-1	1	-1	-1	-1	492,603
14	8,4	1,8	0,14	200	16	1	-1	1	1	-1	1	588,976
15	9,0	1,8	0,08	50	14,4	1	1	1	-1	1	-1	302,556
16	9,0	1,2	0,08	200	16	1	1	-1	-1	1	1	605,842

Для определения параметров модели использовалась линейная статистическая модель, с полуоптимальным квадратичным планом, дробный факторный эксперимент, что возможно при количестве варьируемых факторов свыше 3. Требуемое количество виртуальных экспериментов в этом случае определялось по уравнению (3.9). Так как взаимодействия факторов выше второго уровня являются, как правило,

незначимыми, не вносят существенного вклада в уравнение регрессии, то соответствующие коэффициенты при произведениях можно принять за ноль. Закон изменения пятого фактора заменён порождающим соотношением вида  $X_5 = X_1 X_2 X_3 X_4$ , что позволяет варьировать  $X_5$  по закону изменения произведений  $X_1 X_2 X_3 X_4$ . После проверки однородности экспериментальных результатов для искомого уравнения, в общем виде форма записи уравнения регрессии представлена уравнением (3.10), рассчитываются коэффициенты регрессии, согласно уравнениям (3.11).

$$N = k^{q-1} \quad (3.9)$$

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j X_j + \sum_{j \pm u}^k b_{ju} X_j X_u \quad (3.10)$$

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{ji} Y_i, \forall i = \overline{0, z}, b_{ju} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{ji} X_{ui} Y_i, \forall j = \overline{1, k}; j \neq u \quad (3.11)$$

где  $Y_i$  – значение в  $i$ -м эксперименте, представленное в табл. 2 и 3;  $b_j$  и  $b_{ju}$  – коэффициенты уравнения регрессии для соответствующего фактора и их взаимодействий;  $N$  – количество экспериментов;  $k$  – количество уровней;  $q$  – количество факторов.

Для корректного построения математической модели процесса обработки очень важным является выбор правильной приближенной математической модели. Если этот шаг выполнен некорректно, то необходимо повторить все шаги для построения новой модели регрессии.

Таким образом целевая функция  $F_{\text{макс.}}$  определялась на основании уравнения регрессии (3.12). Результаты определения коэффициентов уравнения регрессии представлены в табл. 3.22.

$$\begin{aligned} \hat{Y} = & b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + \\ & b_{14} X_1 X_4 + b_{15} X_1 X_5 + b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{25} X_2 X_5 + b_{34} X_3 X_4 + \\ & b_{35} X_3 X_5 + b_{45} X_4 X_5 \quad (3.12) \end{aligned}$$

Таблица 3.22. Значения значимых коэффициентов уравнения регрессии

b0	490,732	b4	47,761	b14	20,639	b25	8,569
b1	-74,989	b5	57,111	b15	14,407	b34	7,981
b2	-5,009	b12	1,786	b23	12,591	b35	-5,145
b3	25,366	b13	-11,972	b24	-14,131	b45	45,035

Далее следует проверка значимости коэффициентов регрессии. Средняя арифметическая величина целевой функции в центре плана определяется по уравнению (3.13), итеративная дисперсия – по критерию Фишера, уравнение (3.14), стандартное отклонение или ошибка коэффициентов уравнения – по уравнению (3.15).

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^5 Y_i^0}{q} \quad (3.13)$$

$$S_{11}^2 = \frac{\sum_{a=1}^q (Y_0^a - \bar{Y})^2}{q-1} \quad (3.14)$$

$$S_{bj} = \frac{S_{11}}{\sqrt{N}} \quad (3.15)$$

где  $Y_i^0$  – значение силы деформации в центре плана;  $Y_0^a$  – экспериментальное значение в а-ой позиции эксперимента;  $q$  – количество повторных экспериментов (так как при численном моделировании при одном наборе факторов результаты расчётов равны, то среднее арифметическое можно не вычислять);  $\bar{Y}$  – среднее значение повторных экспериментов в центре плана.

Таким образом приходим к следующему результату:  $S_{112}=44,345$  и  $S_b=1,665$ . Согласно таблице [113], стандартное значение числа Стьюдента при повторяющихся степенях свободы  $d.f^2=4$  и уровне значимости  $\alpha=0,05$  составляет 2,776. Таким образом, коэффициент  $b$  будет иметь смысл, при  $|b| \geq t_{0,05}$ ;  $d.f^2 \times S_b = 4,622$ . По табл. 3.22 видно, что значение  $b_{12}$  не удовлетворяет этому условию. Таким образом, в уравнении регрессии произведение  $b_{12} \times X_1 \times X_2$  может быть исключено.

Для получения итоговой математической модели с реальными коэффициентами необходимо закончить расшифровку модели с помощью уравнения преобразования, т.е. раскодировать значения факторов. Для перевода в натуральный вид используем уравнения (3.16).

$$D_M = \frac{X_1 - 8,7}{0,3}; \quad R_M = \frac{X_2 - 1,5}{0,3}; \quad \mu = \frac{X_3 - 0,11}{0,03}; \quad F_{\text{пр}} = \frac{X_4 - 125}{75}; \quad D_3 = \frac{X_5 - 15,2}{0,8}. \quad (3.16)$$

В результате приходим к пятифакторному уравнению регрессии (3.17), определяющему зависимость между  $F_{\text{макс.}}$  и пятью значимыми факторами, определёнными в табл. 3.20.

$$\hat{Y} = 114169 + 817,2D_M - 491R_M + 32,25\mu + 5252F_{\text{пр}} + 4656,6D_3 + 0,108\mu D_M + 464,4D_M F_{\text{пр}} + 3,45D_M D_3 + 0,114\mu R_M - 0,114R_M F_{\text{пр}} + 2,064R_M D_3 + 18\mu F_{\text{пр}} - 0,12\mu D_3 + 2700F_{\text{пр}} D_3 \quad (3.17)$$

По результатам исследования была построена диаграмма Парето, показывающая влияние технологических факторов на  $F_{\text{макс.}}$  в процессе микроштамповки (рис. 3.30).

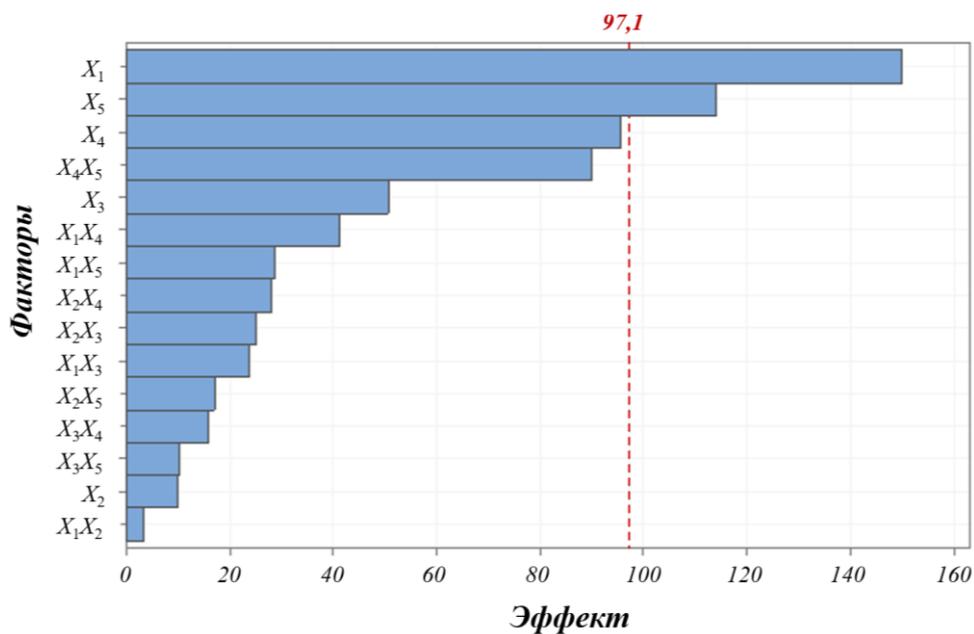


Рисунок 3.30. Диаграмма Парето, отражающая влияния факторов на целевую функцию

Из результатов на графике видно, что сильное влияние на целевую функцию оказывают переменные  $X_1$  и  $X_5$ , за которыми следуют  $X_3$  и  $X_4$ , оказывающие более слабое влияние, самое слабое влияние оказывает фактор  $X_2$ . Чтобы более конкретно изучить характер влияния каждого фактора в отдельности построим графики влияния по каждому из факторов (рис. 3.31) и по их взаимодействиям для ВУ и НУ (рис. 3.32).

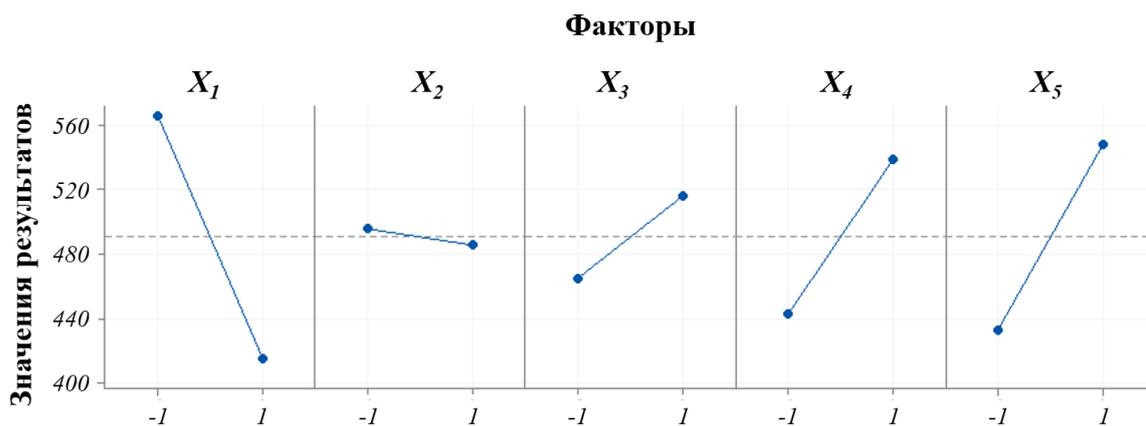


Рисунок 3.31. Характер влияния факторов на целевую функцию

Чем больше угол наклона, создаваемый графиком и горизонтальной осью, тем сильнее влияние этого фактора или взаимодействия факторов на целевую функцию. Качественное сравнение показывает, что угол, создаваемый графиком, изображающим фактор  $X_1$ , является самым большим, за ним следуют  $X_5$  и  $X_4$ , что совпадает с результатами на рис. 3.30. Видно, что большое взаимодействие наблюдается у  $X_1X_3$ ,  $X_1X_4$ ,  $X_1X_5$  и  $X_4X_5$ ; а остальные взаимодействия малы и ими можно пренебречь.

Численное моделирование процесса микроштамповки методом конечных элементов (виртуальное испытание) был проведен в сочетании с методом многофакторного планирования эксперимента, по полученным результатам можно сделать следующие выводы:

- полученное полиномиальное, регрессионное уравнение (математическая модель) достаточно для описания процесса

микровытяжки, а адекватность уравнения подтверждена критерием Фишера;

- полученная математическая модель показывает, что влияние технологических факторов на силу деформации различно; влияние производных параметров, как зазор между пуансоном и матрицей ( $C$ ) и коэффициент вытяжки ( $m$ ), является наиболее сильным взаимодействием на макс. силу деформирования.

Кроме того, сила прижима ( $F_{пр}$ ) заготовки также сильно оказывает влияние на  $F_{макс}$ ;

- ✓ на основании оценки взаимодействия технологических факторов и целевой функции мы можем заранее отбросить те факторы, которые в наименьшей степени оказывают влияние на целевую функцию, что позволит сэкономить время и затраты на дальнейшие исследования;
- ✓ аналогичным образом можно построить и математическую модель для минимальной силы деформирования ( $F_{мин}$ ).

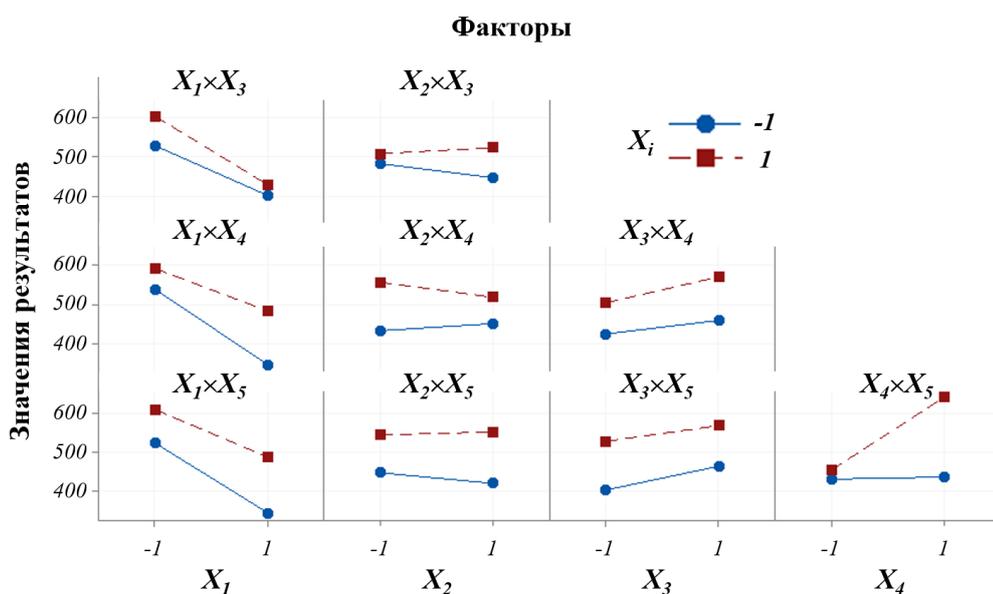


Рисунок 3.32. График взаимодействия исследуемых элементов в процессе микроштамповки

## ГЛАВА 4. ОБОРУДОВАНИЕ И ДЕФОРМИРУЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

### 4.1 Испытательное оборудование

Деформирование микрозаготовок может осуществляться на одном из трёх вариантов оборудования:

- традиционное оборудование, адаптированное под процессы микроштамповки, настольного или напольного исполнения;
- на специализированном оборудовании для микроштамповки настольного исполнения;
- высокоавтоматизированном оборудовании напольного исполнения.

Для первой группы характерной чертой является традиционная схема работы пресса, основанного на механическом или гидравлическом принципе; подходят для мелко и среднесерийного производства. Для второй группы характерно введение в конструкцию сервоприводов, а также небольшие габариты, достигаемые за счёт настольной конструкции исполнения рамы-станины; подходят для мелкосерийного производства. Третья группа ориентирована на большие программы выпуска.

Наиболее распространённая схема процесса штамповки – штамповка из ленты, которая состоит в последовательном выполнении операций листовой штамповки с отделением детали на заключительной операции. Такая схема позволяет достигать большой программы выпуска деталей, себестоимость единицы продукции которой весьма незначительна. Однако, за счёт больших объёмов выпуска в короткий период времени достигается рентабельность производства. На рис. 4.1 показаны примеры оборудования для выполнения операций микроштамповки.

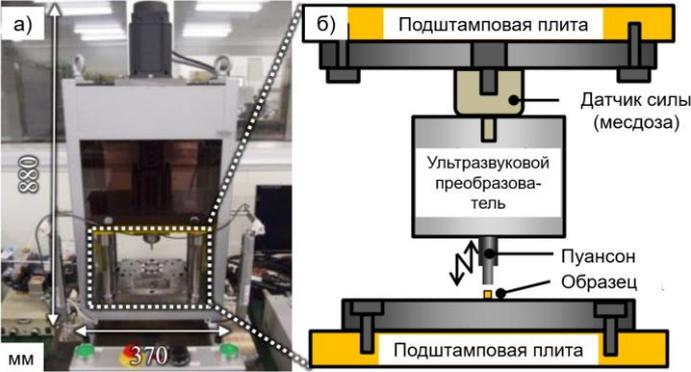
Изображение	Источник	Тип, марка, производитель
	[178]	настоельное, DT-C324
	[179]	настоельное, Micro Manufacturing LLC
	[102]	настоельное, MS-50
	[180]	напольное, Bruderer BSTA 50R-95

Рисунок 4.1. Производственное оборудование для выполнения операций микроштамповки

Прессы для такого производства должны сочетать в себе высокую скорость обработки материала ленты, разматываемой из рулона, точный контроль перемещений. Современное оборудование может совершать до 3000 ходов в минуту или 60 ходов в секунду. Поэтому отличительной особенностью станин такого оборудования является высокая жёсткость, достигаемая за счёт устранения инерционности системы, гашения вибраций.

Для выполнения вытяжных операций скорость деформирования, как правило, устанавливается на уровне 1200 ходов в минуту или 20 ходов в секунду. Для некоторых материалов, например, титановых сплавов, такая скорость обработки является высокой. Высокоскоростное деформирование подходит для меди и сплавов на её основе.

Отдельным способом изготовления деталей является процесс микровырубки, который подходит для плоских деталей, с постоянной площадью сечения в одном из направлений (преимущественно в направлении перемещения пуансона). Скорость деформирования на современных прессах для чистовой вырубки не превышает 200 ходов в минуту или 3,3 ходов в секунду.

Существуют и новые процессы, которые вовлекают нетрадиционные физические эффекты, способствующие появлению новых технологических процессов. Например, добавление ультразвука позволяет повысить производительность операции объёмного микродеформирования.

Работы по микровырубке и микровытяжке диссертационной работы выполнялись как на классическом, так и на специализированном оборудовании.

#### 4.1.1 Классическая испытательная машина

Испытательная машина ЦДМ-100ПУ (рис. 4.2) гидравлического типа позволяет выполнять испытания с силой, лежащих в диапазонах: до 10, до

40 и до 100 тонн. Максимальной скоростью траверсы составляет до 200 мм/мин или 3,3 мм/с, а максимальный ход траверсы составляет 250 мм.

При проведении испытаний по микровырубке и микровыдавливанию скорость перемещения траверсы была ограничена 1 мм/с, а диапазон силоизмерителя установлен до 10 тонн. Фактически, максимальная сила была зафиксирована при вытяжке заготовок из латуни и для  $\lambda=2$  составила порядка 200 кг. При  $\lambda=1$  и менее сила не превышала 100 кг для обеих операций.



Рисунок 4.2. Общий вид экспериментального оборудования

#### 4.1.2 Специализированное оборудование

Для проведения серии экспериментов был сконструирован и изготовлен стенд, предназначенный для реологических исследований материалов небольшого объёма (рис. 4.3). Стенд состоит из рамы, собранной на профилях 20x20 мм и сервопривода, технические характеристики которого представлены в табл. 4.2. Исполнительным механизмом является актюатор с сервоуправлением механического принципа действия.

Определение точного перемещения штока обеспечивалось двумя концевыми микровыключателями, а величина перемещения определялась по цифровому индикатору. Величина силы определялась по табло цифрового индикатора, данные на который поступали с миниатюрных датчиков силы, с разными диапазонами измерений, до 30 и до 100 кг, установленных в верхней части инструмента, между штоком актюатора и верхней плитой штампа. В табл. 4.1 дана техническая характеристика экспериментального испытательного стенда.

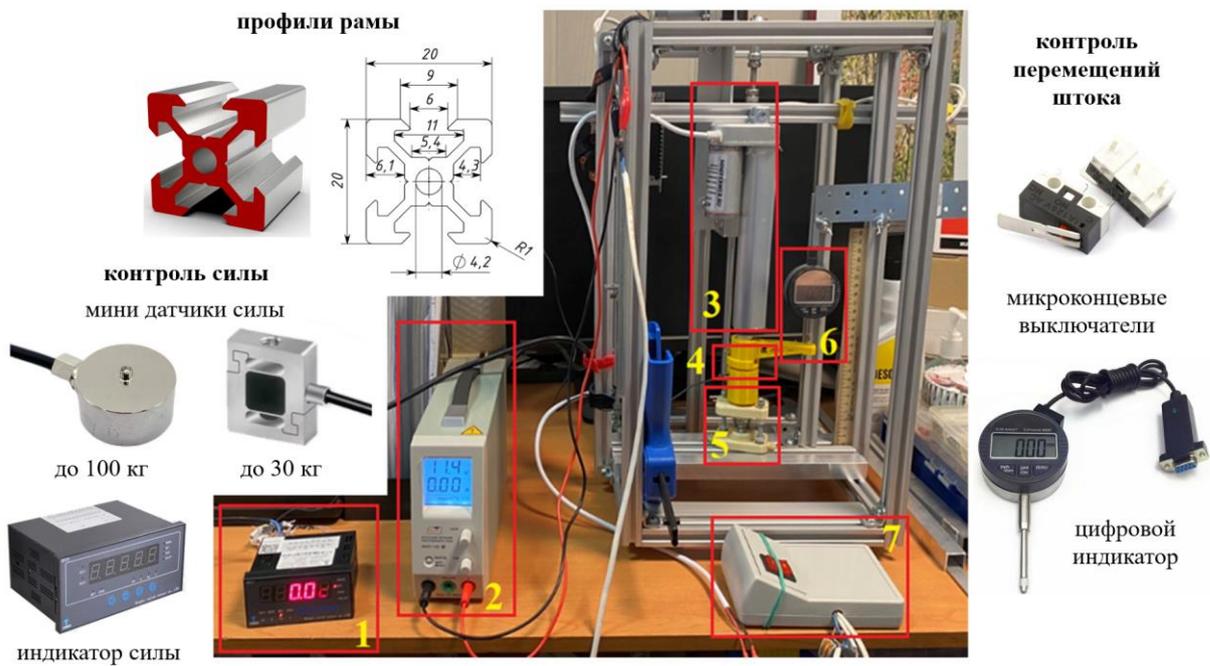


Рисунок 4.3. Общий вид экспериментального оборудования

Таблица 4.1. Характеристика экспериментального оборудования

Параметры	Ед. измерения	Значение
Номинальное напряжение	В	12
Скорость перемещения штока	мм/с	7
Длина штока	мм	150
Максимальная сила	Н	1 300

Также регистрация силы может осуществляться на основе показаний плёночного датчика давления, размещённого в верхней и нижней частях инструмента, рассчитывается затем, как среднее арифметическое двух показаний.

Максимальное заданное перемещение гарантируется конечными выключателями, один из которых установлен неподвижно в крайнем верхнем положении штока актюатора, а второй перемещается по шарико-винтовой паре при помощи шагового двигателя на заданное расстояние.

#### 4.2 Изготовление штамповой оснастки

Для реализации процесса микроштамповки требуется наличие исходной заготовки заданной толщины и диаметра, деформирующего инструмента, а также совокупности технологических параметров, определяющих граничные условия, например, температура окружающей среды, коэффициент трения на контактной поверхности и т.д. Инструмент является дорогостоящим компонентным звеном в этой цепи. Рабочая часть инструмента обладает сложным профилем и не всегда традиционным способом, механической обработкой (субтрактивные технологии), его изготовление экономически целесообразно. В XXI веке, благодаря развитию аппаратной и программной частей, стало возможным послойное создание прототипов изделий, что снижает расход материала и позволяет изготавливать сложные изделия. Эти технологии, получившие название аддитивные технологии или 3D-печать, работают как с металлическими, так и с полимерными материалами. На рис. 4.4 показан график, отражающий преимущество изготовления сложных прототипов методами аддитивного производства по сравнению с методами субтрактивного производства. Получаемые прототипы обязательно подвергаются пост-обработке, в большей или меньшей степени. Именно это обстоятельство позволяет

сделать выбор либо в пользу традиционных, либо в пользу аддитивных технологий.

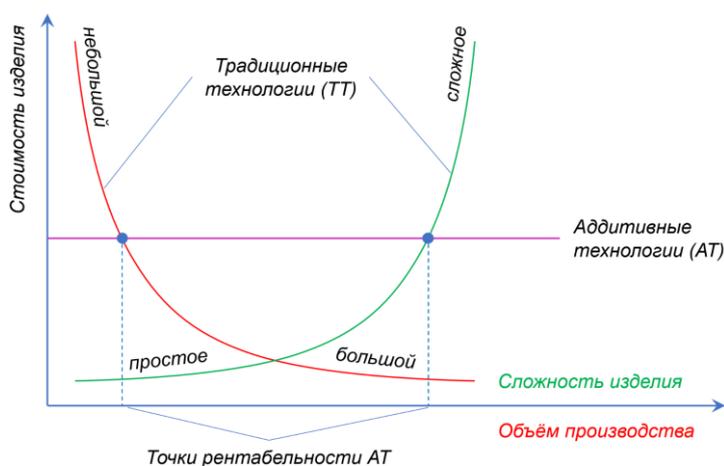


Рисунок 4.4. График сравнения АТ и ТТ

Вместе с преимуществом построения сложной геометрии прототипа возникает недостаток аддитивных технологий, заключающийся в том, что прототип получает текстурированную поверхность, обусловленную различным способом построения объекта, что зависит как от технологии 3D-печати, так и от параметров управляющей процессом печати программы, и не позволяет применять прототип сразу после печати, а требует пост-обработки. Текстурирование поверхности может как улучшить, так и ухудшить технологичность процесса микроштамповки [13,14]. Так, топография поверхности влияет на коэффициент контактного трения [29] и, соответственно, на минимальный и/или максимальный коэффициент микровытяжки листовой заготовки, силу прижима фланца и другое. Также, в зависимости от технологии 3D-печати имеет место отклонение геометрии от размеров исходного чертежа [17].

Были рассмотрены три технологии 3D-печати. Для изготовления металлического инструмента применялись технологии DMLS и SLM. Для изготовления полимерного инструмента применялись технологии FFF и LCD. В качестве материалов для металлической 3D-печати рассматривались титановый сплав (BT6), нержавеющая сталь (03X17H12M2, аналог AISI

316L) и алюминиевый сплав (AlSi10Mg). Для изготовления полимерных прототипов деталей инструмента методом экструзионной печати использовался полиэтилентерефталат-гликоль (ПЭТГ), а для метода масочной фотополимерной печати – базовый фотополимер (БФП), а также керамоподобный фотополимер (КПФП).

Далее исследование проходило по схеме, представленной на рис. 4.5. Технология 3D-печати экструзионного типа FFF (Fused Filament Fabrication) заключается в послойном добавлении полимерного материала, подающегося из катушки с полимерной проволокой  $\varnothing 1,75$  мм, проходящего через горячую зону и выдавливающегося через сопло экструдера, диаметр которого равен  $\varnothing 0,4$  мм, что на  $\sim 77\%$  меньше исходного диаметра проволоки.

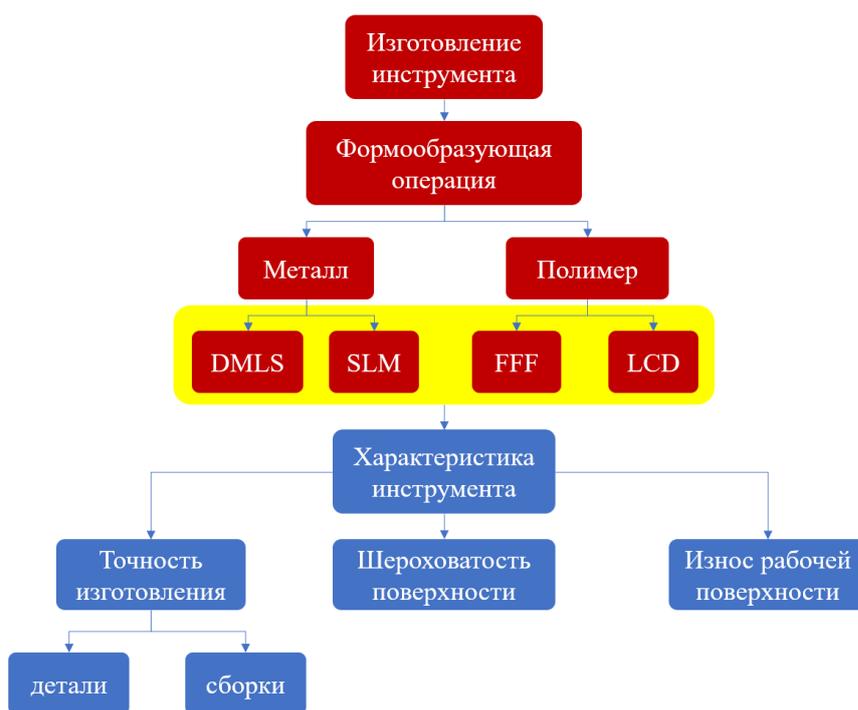


Рисунок 4.5. Схема проведения исследований напечатанных деталей штампа

Выращивание прототипа ведётся по направлению снизу-вверх. Фотополимерная 3D-печать по масочной технологии (Liquid-Crystal Display)

подразумевает вырост прототипа из вязкой фотополимерной композиции с отверждение УФ-излучением, проходящего через жидкокристаллическую матрицу, на которой генерируются сечения профиля, согласно управляющей программе 3D-принтера, работает по схеме сверху-вниз. Технологии лазерного сплавления металлических порошков SLM (Selective Laser Melting) и DMLS (Direct Metal Laser Sintering) позволяют получать металлические прототипы по схеме выроста снизу-вверх за счёт расплавления лучом лазера материала и его кристаллизации по сечениям, согласно управляющей программе.

По результатам любой 3D-печати выполнялась пост-обработка, заключающаяся в удалении поддержек, промывки (только LCD), снятии заусенцев и фасок, нарезании резьбы и/или установки резьбовых вставок и втулок, термообработки (только DMLS) и другое.

Можно сформулировать следующие требования к деформирующим инструментам. Штампы для микровырубки должны обеспечивать разделение материала, причём втягивание материала в матрицу не желательно. Штампы для микровытяжки должны обладать несколькими характерными особенностями. Прижим является подвижной частью и поддерживается пружиной сжатия, позволяющей регулировать требуемую удерживающую силу прижима, за счет варьирования жёсткости пружины. Сила прижима не должна быть настолько большой, чтобы вызвать отрыв дна стаканчика при вытяжке, но не настолько малой, чтобы образовать складки в зоне пластической деформации заготовки.

Сила прижима регулируется с помощью пружин сжатия, характеристики которых показаны на рис. 4.6. Для предотвращения образования складок требуется выбирать пружины с определённой жёсткостью ( $k_c$ ). Пружина №2 является достаточно мягкой. При установке трёх таких пружин и ходе прижима 6 мм совокупная сила  $F_{пр}$  будет недостаточной для удержания фланца. Предварительная оценка силы прижима при помощи компьютерного моделирования и теоретического

расчёта показала, что  $20 \text{ [Н]} < F_{\text{пр.}} < 160 \text{ [Н]}$ . Пружины №1 и №3 имеют почти одинаковую жёсткость и могут быть использованы для контроля за складкообразованием в области фланца.

Таблица 4.2 Значения силы микровырубки заготовки, [Н]

Размер заготовки	Материал		
	Л63	М1	А5
Ø4,5 (для $\lambda=0,25$ )	519,83	53,39	189,67
Ø9 (для $\lambda=0,5$ )	1063,82	109,26	388,15
Ø18 (для $\lambda=1$ )	2151,80	221,0	785,12

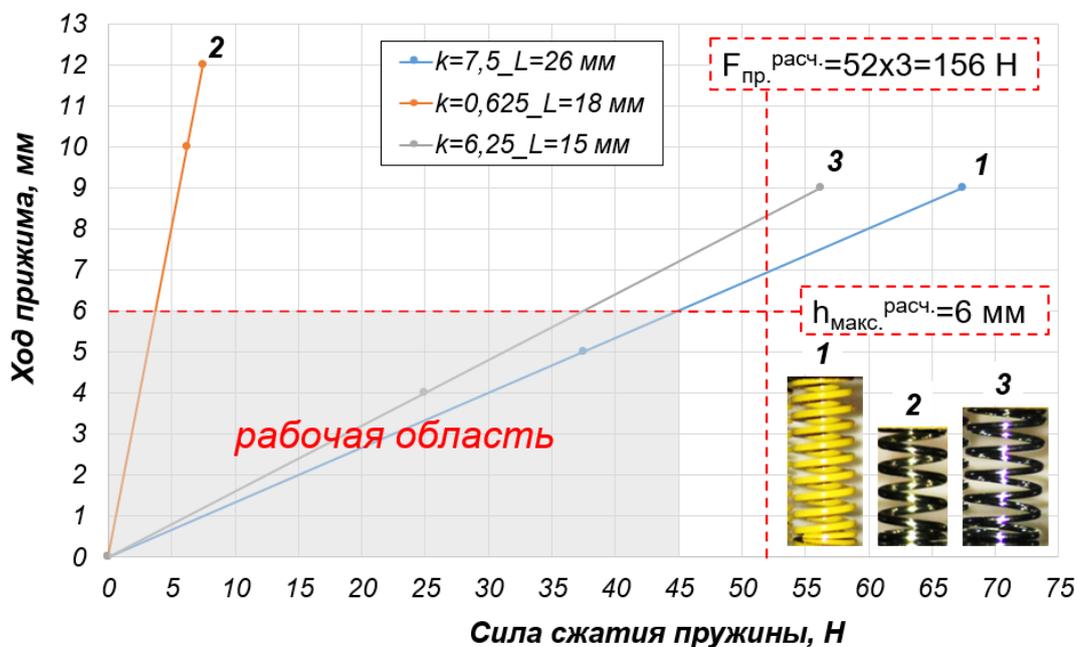
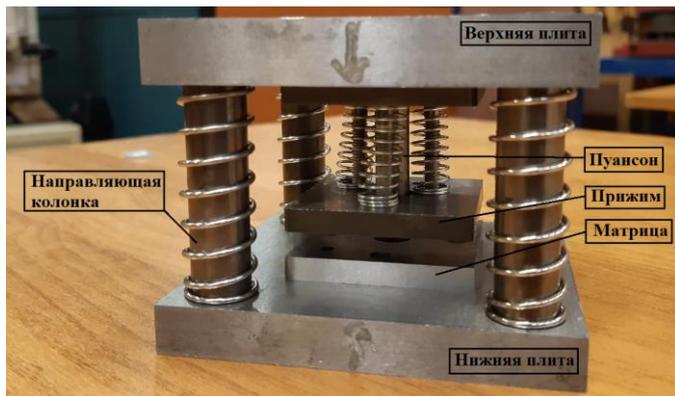
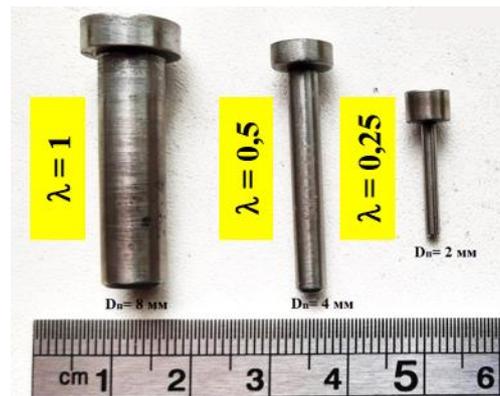


Рисунок 4.6. Графики усилий пружин прижима

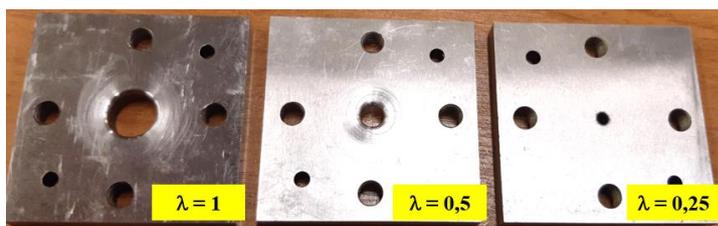
Для валидации результатов моделирования были проведены эксперименты на штампе, полученном механической обработкой, для задач II и III. На рис. 4.7 показан инструмент для проведения микровытяжки. Величина зазоров между пуансоном и матрицей соответствовала значению  $S = 1,5 \times t_0$  (для случая  $K = 1,5$ ). В качестве смазочного вещества была использована консистентная смазка типа «Солидол».



а)



б)



в)

Рисунок 4.7. Инструменты для микровытяжки: общий вид штампа (а), пуансоны (б) и матрицы (в)

#### 4.2.1 Подготовка 3D-моделей

Была применена стандартная методика проектирования твердотельных 3D-моделей деталей штампов для разделительной и формообразующей операций. Проектирование выполнялось в CAD-программах, обладающих современным инструментарием для реализации твердотельного моделирования. На разных стадиях применялись такие программы, как Autodesk Inventor, Т-Флекс CAD и Компас 3D.

#### 4.2.2 Подготовка фасетной модели и управляющей программы

После проектирования выполнялась подготовка управляющей программы 3D-принтера в слайсерах, при этом применялись следующие программы в зависимости от технологии 3D-печати: 3DXpert – для DMLS, 3DLAM Slicer – для SLM, Ultimate Cura – для FFF, Halot Box – для LCD и другие.

#### 4.2.3 Технологии 3D-печати

Применение технологии 3D-печати обусловлено возможностью изготовления деформирующих инструментов или штампов любой сложности, без использования специального инструмента или шаблона, а также в широком диапазоне размеров. Работа с мелкогабаритными деталями, максимальный размер которых находится в диапазоне 2...20 мм, требовала бы изготовление деформирующего инструмента с применением таких технологий, как электроэрозионная обработка, которая требует также специального электрода-инструмента для создания несквозного контура или проволоки для разделительной операции [69-71,79,82].

При изготовлении инструмента по технологии 3D-печати из металла или полимера сложность изделия не требует изменения в технологии печати и не является причиной увеличения себестоимости изготовления инструмента, другими словами, и деталь с простой геометрией, и деталь со сложной геометрией будут иметь одинаковую стоимость, так как за основу расчёта принимается затрачиваемое машинное время и стоимость исходного материала. По одной из моделей считается, что с ростом сложности детали и объёмом её производства её изготовление технологиями 3D-печати становится более экономически целесообразным. Однако по другим моделям ключевым может оказаться количество изготавливаемых деталей [83-85]. При изготовлении мелкой серии деталей, деформирующий инструмент может быть изготовлен из полимера, а не из металла, что снизит стоимость и сроки его изготовления, а также может устранить необходимость выполнения дорогостоящих работ по пост-обработке, а именно термообработку (отжиг), с целью снятия остаточных напряжений, шлифовальных работ, работ по уменьшению внутренней пористости с помощью изостатического прессования (сжатия). В ряде работ, посвящённых изготовлению деформирующего инструмента, показано, в каких операциях может быть применён напечатанный инструмент и из

какого материала он может быть изготовлен в этих случаях. Применение аддитивных технологий или 3D-печати для изготовления микроинструмента встречается редко. Авторы работ [17, 102] применили технологию селективного лазерного плавления (Selective Laser Melting или сокр. SLM) при изготовлении инструмента для реализации комбинированного процесса микродеформирования, а именно вырубки и последующей вытяжки стаканчика по схеме «дном вверх» (рис. 4.8).

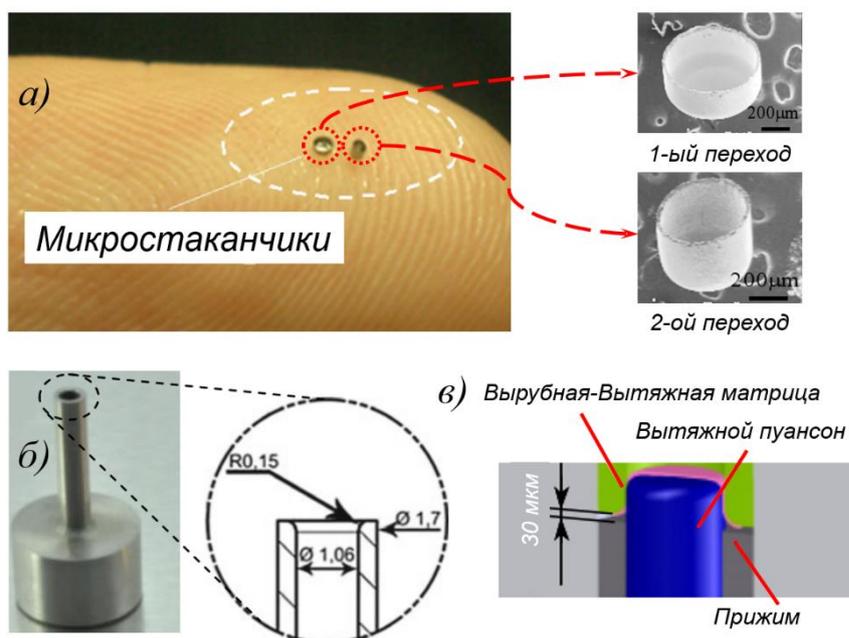


Рисунок 4.8. Пример реализации комбинированного процесса вырубki и вытяжки [17, 102]: полученные детали (а), верхний инструмент (б) и схема процесса (в)

Ограничением применения родственных технологии SLM процессов является то, что они требуют металлические порошки, фракционный состав которых варьируется от 20 до 60 мкм. Для микроинструмента это является большим размером, который существенно изменяет морфологию поверхности. Известен факт того, что с уменьшением размеров (габаритов) изделия увеличивается влияние размерных эффектов. Так, например, шероховатость поверхности или точность получения радиуса скругления заходного ребра матрицы для вытяжки изменит благоприятное окно

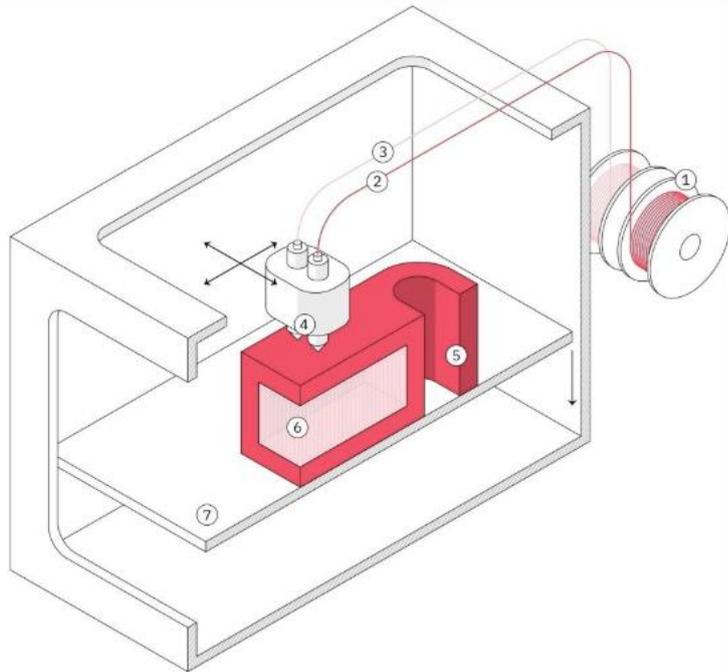
технологических параметров (силу прижима, коэффициент трения и т.д.). В табл. 4.3 показаны применяемые материалы и технологии печати, с добавлением информации о доделочных операциях (пост-обработка). Схемы использованных в работе технологий 3D-печати показаны на рис. 4.9.

Таблица 4.3. Оборудование, материалы и виды пост-обработки

Технология печати	Название 3D-принтера	Материал	Вид пост-обработки
DMLS	3D Systems ProX 320 DMP	BT6; AlSi10Mg (аналог АК9)	термообработка, удаление поддержек; снятие заусенцев;
SLM	3DLAM Mini	03X17H12M2	шлифование; точение;
SLM	LiM-X260E	316L (аналог 03X17H14M3)	калибровка отверстий; обработка бормашиной; нарезка резьбы; установка усилителей резьбы
FFF	Anycubic Kobra 2	ПЭТГ	удаление поддержек; снятие заусенцев; шлифование наждачной бумагой и/или бормашиной; калибровка отверстий; установка резьбовых штулок
LCD	Crealty Halot One	базовый фотополимер (БФП); керамоподобный	промывка в воде (БФП) или изопропиловом спирте (КПФП); отверждение в УФ-печи; удаление поддержек;

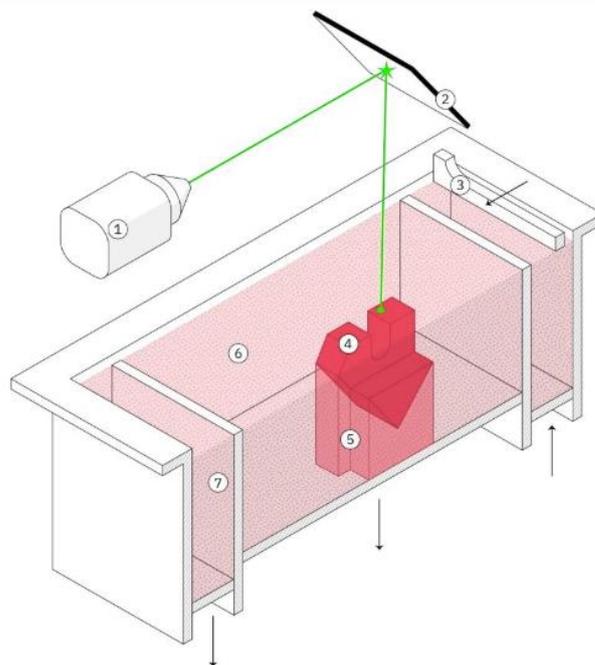
		<p>фотополимер (КПФП).</p>	<p>снятие заусенцев; шлифование наждачной бумагой и/или бормашинкой; калибровка отверстий; установка резьбовых штулок</p>
--	--	--------------------------------	---

- ① Катушка пластика
- ② Пластиковая нить
- ③ Пластиковая нить
- ④ Экструдер
- ⑤ 3D модель
- ⑥ Поддержки
- ⑦ Стол 3D принтера



а)

- ① Лазер
- ② XY зеркало
- ③ Элеватор
- ④ 3D модель
- ⑤ Поддержки
- ⑥ Металлический порошок
- ⑦ Резервуар для излишков порошка



б)

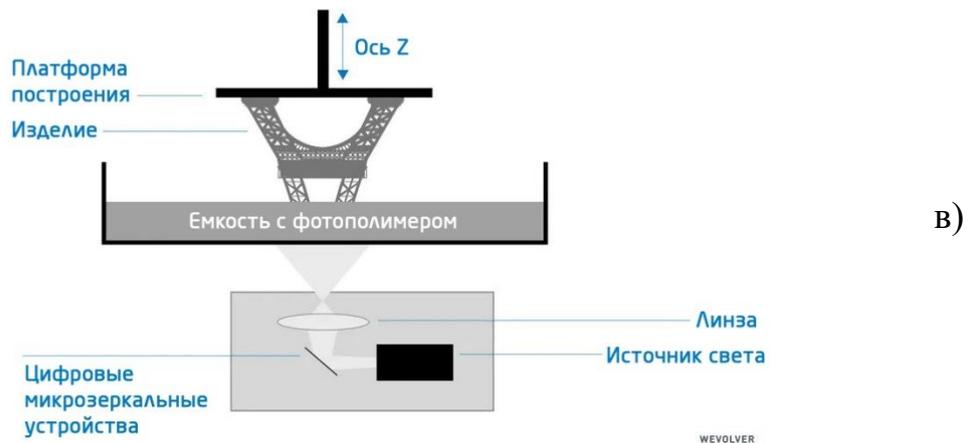


Рисунок 4.9. Схемы процессов 3D-печати [182, 183]

#### 4.2.3.1 Технология экструзионной печати

FDM (Fused Deposition Modeling – послойное нанесение расплавленной полимерной нити) – это технология 3D-печати, которая позволяет печатать прототипы с высокой производительностью, однако послойная текстура хорошо различима. FDM – коммерческое запатентованное компанией Stratasys название процесса. В открытом проекте развития экструзионной печати RepRap применяется термин FFF (Fused Filament Fabrication – формообразование плавящейся проволокой), который наиболее употребителен во всех остальных случаях. Материалами, применяемыми в технологии печати FFF, являются термопластичные полимеры, такие как АБС, ПЛА, ПЕТГ и т.д. Время печати изделия зависит от размера и толщины слоя объекта, а также от скоростной характеристики самого 3D-принтера. В настоящее время технология печати FDM широко используется в различных областях, таких как здравоохранение, архитектура, аэрокосмическая промышленность, обрабатывающая промышленность, однако доля применения технологий для печати штампового инструмента невелика [86-88,127,128].

Изготовленные детали деформирующего инструмента подвергали доводочным операциям (пост-обработке), согласно табл. 4.3, после чего

выполнялась сборка инструмента. На рис. 4.10 показаны результаты сборки полимерного и металлического инструментов. В штампах предусматривалась центральная съёмная часть для замены формообразующей и разделительной матриц, что позволяло работать с четырьмя значениями коэффициента подобия ( $\lambda$ ), определяемого, как отношение текущего диаметра пуансона к базовому. За базовый диаметр был принят диаметр пуансона, равный 8 мм. Рассматривался следующий ряд коэффициентов подобия: 1; 0,5; 0,25 и 0,125.

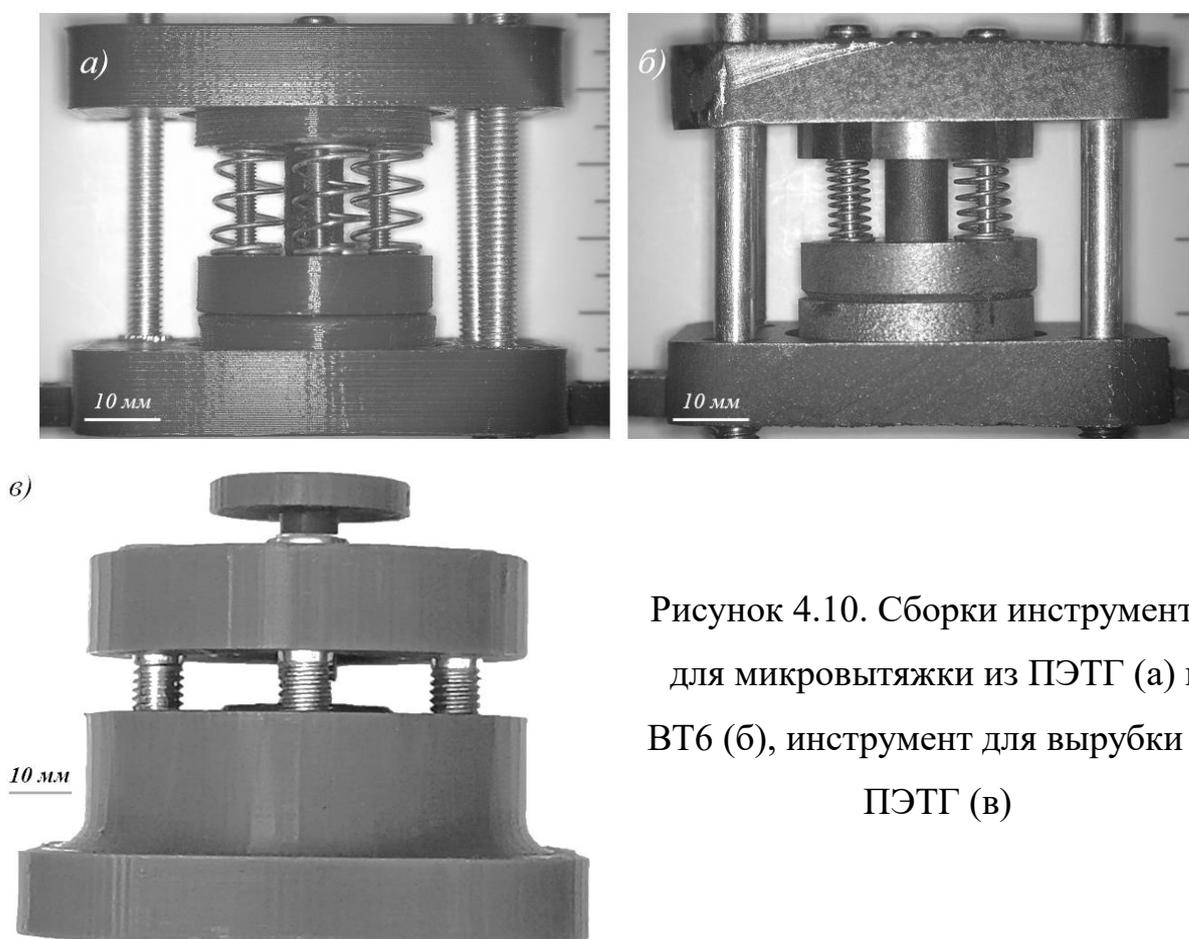


Рисунок 4.10. Сборки инструментов для микровытяжки из ПЭТГ (а) и ВТ6 (б), инструмент для вырубki из ПЭТГ (в)

#### 4.2.3.2 Технология печати порошковыми материалами

SLM (Selective Laser Melting) это технология 3D-печати, в которой порошковые металлические материалы под воздействием высокоэнергетического лазерного луча плавятся и сплавляются вместе

частицы металлического порошка (фракция 10...80 мкм), образуя трехмерный металлический объект. Применяются следующие материалы: нержавеющая сталь, титан, алюминий, сплавы на основе кобальт-хрома и т.д. [93-95]. Технология SLM применяется в аэрокосмической отрасли, в автомобильной промышленности, в медицине и других областях.

DMLS (Direct Metal Laser Sintering) – технология, аналогичная SLM, но являющаяся коммерческой, запатентованной собственностью компании 3D Systems. Преимущество технологии DMLS перед технологией SLS заключается в более высоком разрешении за счет использования более тонких слоев, состоящих из частиц меньшего диаметра (фракция до 20 мкм), что приводит к высокой плотности изделия до ~95%, по сравнению с технологией SLS, в которой плотность достигает всего лишь 70%. Эта возможность позволяет создавать детали более сложной формы [96-99].

Были изготовлены пакеты сменных матриц по трём технологиям 3D-печати (рис. 4.11). Геометрия матрицы состоит из базовой цилиндрической части и ребра (красный прерывистый сплайн), заходное ребро матрицы или ЗРМ, сглаживание которого определяло плавность затекания материала в полость матрицы.

Всего рассматривалось 24 варианта исполнения ЗРМ для четырёх значений коэффициента подобия ( $\lambda=1; 0,5; 0,25$  и  $0,125$ ): матрицы с №1 по №8 выполнялись по характеристике  $a=b$ , с №9 по №16 – по  $a<b$ , с №17 по №24 – по  $a>b$ . После отрезки матриц от поддержек, соединяющих опорную плиту с прототипами, нижняя грань матрицы торцевалась. На рис. 4.12 показана поверхность в области ЗРМ для четырёх первых номеров матриц. Видно, что контактная поверхность матрицы с заготовкой помимо регулярной шероховатости имеет локальную направленную полосчатость. Каналы у матрицы №3 и №4 – несквозные. Удаление несвязанного титанового порошка из небольших отверстий вытряхиванием и выдуванием недостаточно, требуется механическая обработка.

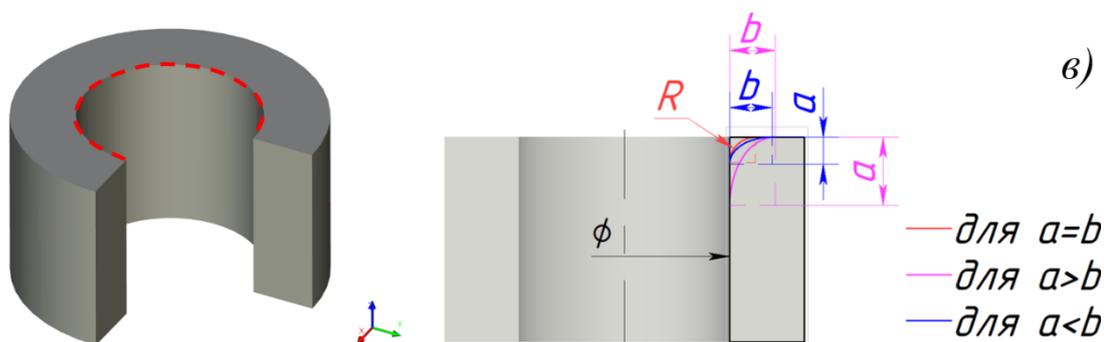
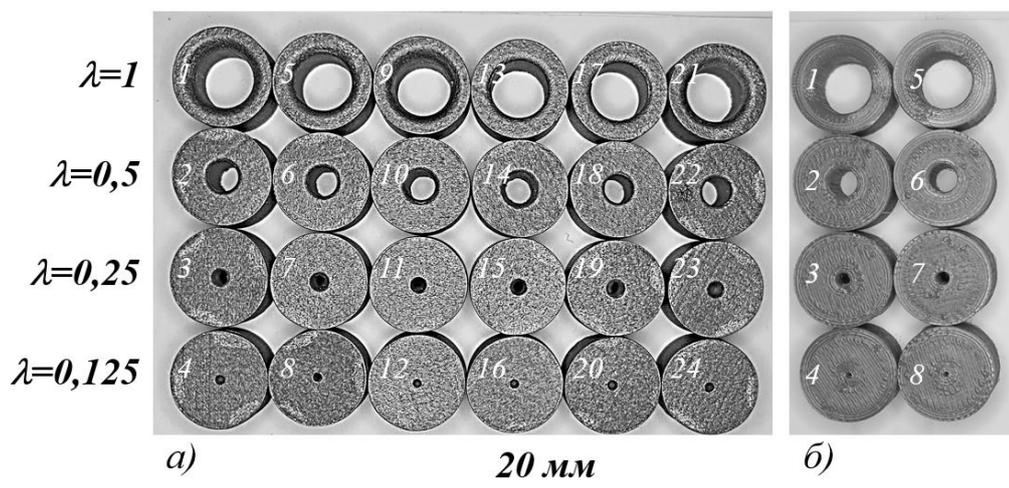


Рисунок 4.11. Вытяжные матрицы, изготовленные по технологиям DMLS из ВТ6 (а) и FFF из ПЭТГ (б), характеристика ЗРМ (в).

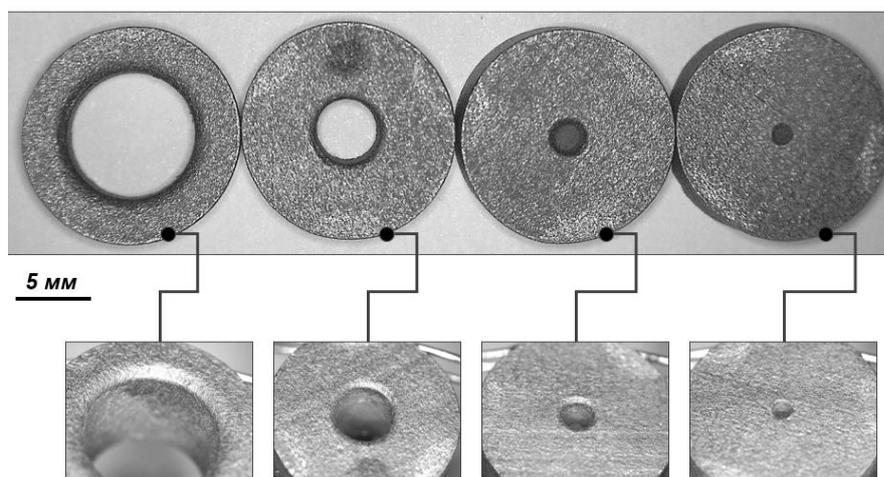


Рисунок 4.12. Вытяжные матрицы, изготовленные по технологии DMLS

Для матриц из ПЭТГ возможно получить сквозные отверстия диаметром менее 2 мм, однако точность изготовления ЗРМ и диаметр отверстия сильно отличаются от заданных чертежом. Кроме этого,

поверхность имеет топографию, отличную от той, которая наблюдается на поверхности металлических матриц.

На рис. 4.13а и 4.13б показаны вытяжные пуансоны. Поверхность инструментов отличаются друг от друга, причём более равномерная топография наблюдается при  $\lambda=1$ . На рис. 4.13в и 4.13г показаны вырубные пуансоны, после 20 циклов нагружения. Видны износ и смятие поверхностей в области рабочих кромок.

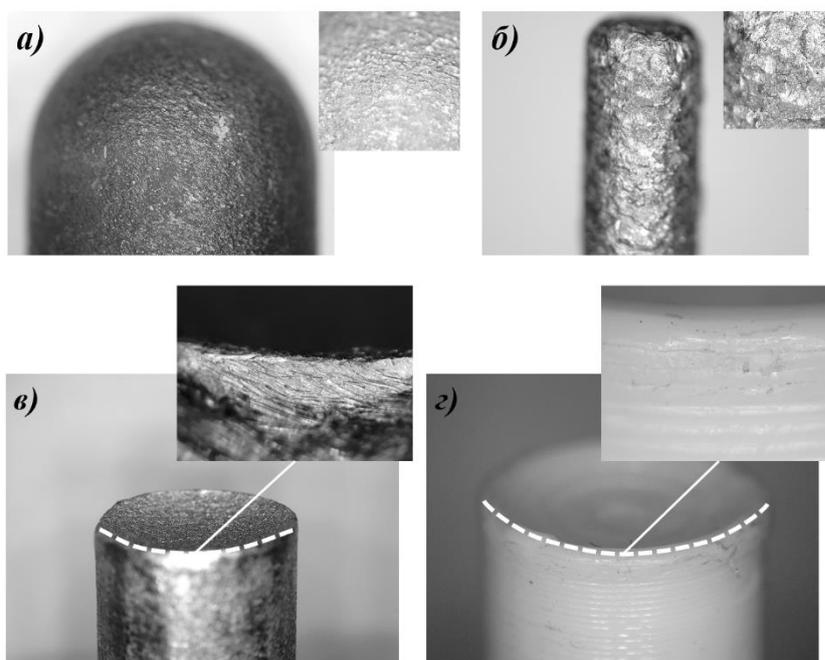


Рисунок 4.13. Рабочие части: вытяжных пуансонов из ВТ6 при  $\lambda=1$  (а) и  $\lambda=0,125$  (б), вырубных пуансонов из 316L (в) и ПЭТГ (г).

#### 4.2.3.3 3D-печать деталей оснастки и пост-обработка

Инструменты изготавливались двумя способами: при помощи механообработки и 3D-печати. На рис. 4.14 показаны результаты изготовления инструментов для разделительной и формообразующей операций. Под позицией 1 показан инструмент, полученный механообработкой. Под позициями 2 и 3 показаны инструменты, полученные экструзионным методом 3D-печати FFF. Под позициями 3(а, б,

в) показаны элементы инструментов (матрицы и пуансоны), изготовленные 3D-печатью по технологии SLM и DMLS. Изучение поверхности позволяет сделать вывод о том, что рельеф поверхности весьма различен (рис. 3). Это обстоятельство будет указывать на разные условия взаимодействия поверхностей в областях их контакта друг с другом. Проведённые исследования показали, что для инструмента с точёной поверхностью применение небольшого количества смазки может как улучшить, так и ухудшить вытяжку стаканчика. На это влияет размер исходной заготовки и точное, осесимметричное расположение заготовки перед вытяжкой.

Необходимость выполнения той или иной доделочной операции (пост-обработки) определяется способом изготовления инструментов. Так, значительным отличием пост-обработки изделий после 3D-печати является удаление поддерживающих структур и работа над исправлением короблений, которые нарушают параллельность поверхностей и соосность отверстий. Также, в силу малости отдельно взятых элементов геометрии наблюдаются наплывы и нечёткие внешние и внутренние контуры отверстий. Для повышения прочности резьбового соединения устанавливаются резьбовые вставки. Это обусловлено повышенной пористостью прототипов, полученных по технологии 3D-печати и не подвергнутых горячему изостатическому сжатию (прессованию). Резьбовые вставки требуют подготовки диаметра отверстия и нарезания резьбы под резьбу вставки.

Для пробной обработки отверстий использовалась бесщёточная микродрель ( $n = 13\ 000$  об./мин;  $W = 6...24$  Вт) и свёрла с  $\varnothing\{0,4; 0,5; 1,0\}$  мм. Свёрла с  $\varnothing < 1$  мм могут быть применены для варианта исполнения инструмента с  $\lambda < 1/8$ . Тестовое сверление осуществлялось на алюминиевой пластине из АМг2, толщиной 1,2 мм. Было установлено, что свёрло с  $\varnothing 0,4$  мм теряет устойчивость на холостых ходах на макс. оборотах и при надавливании в процессе сверления, что не позволяет просверлить сквозного отверстия. Свёрло с  $\varnothing 0,5$  мм в меньшей степени теряет

устойчивость и может быть использовано для получения сквозных отверстий. Сверло с  $\varnothing 1$  мм почти не теряет устойчивости и позволяет просверлить отверстие номинального диаметра.

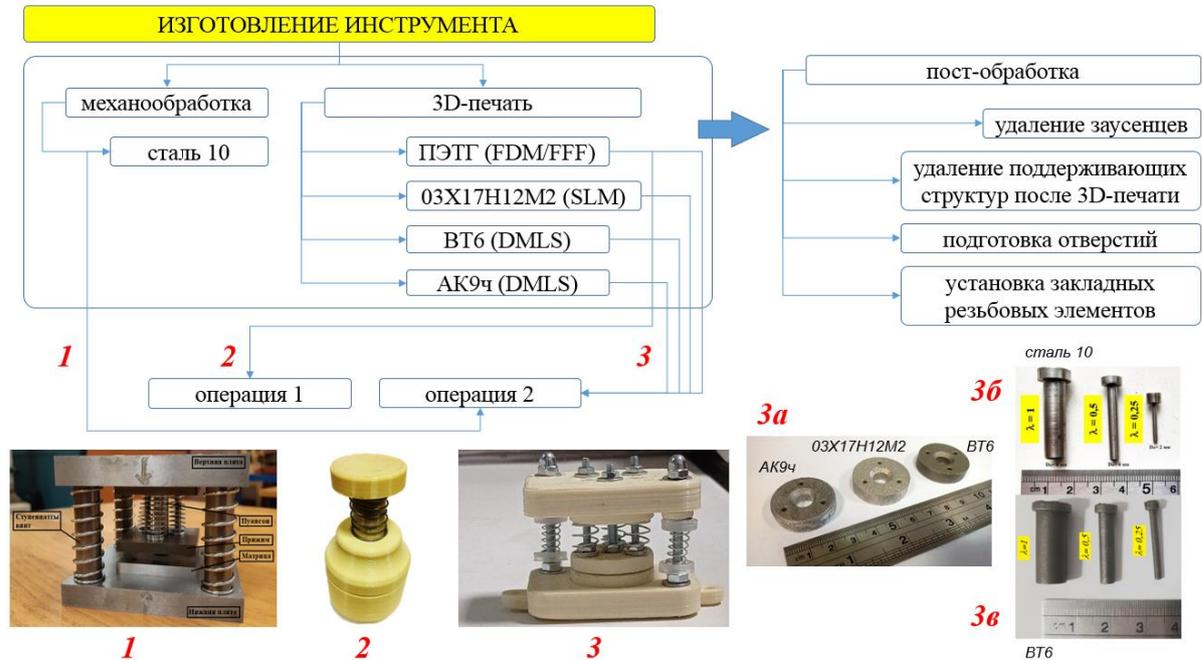


Рисунок 4.14. Общая схема изготовления штамповых инструментов для микроштамповки

Так как одной из уже описанных выше проблем является работа с весьма малыми заготовками, то либо необходимо при помощи специальных инструментов укладывать заготовки в рабочую область вручную (единичное производство), либо необходимо устанавливать систему автоматической подачи заготовки на позицию (серийное производство).

Так как работа выполнялась в условиях единичного производства, то размещение заготовки и удаление детали выполнялись в ручном режиме. При этом применялись дополнительные инструменты, такие как пинцеты и специальные позиционеры. Осесимметричное расположение заготовки на матрице гарантировалось шаблонами-позиционерами, изготовленными по технологиям FFF и LCD (рис. 4.15). Они устанавливаются сверху на матрицедержатель и центрируются по нему. Затем через центральное

отверстие происходит укладка заготовки нужного диаметра, совпадающего с диаметром отверстия позиционера. После этого позиционер снимается с матрицедержателя. В дальнейшем предполагается заменить на проекционный способ нанесения контура заготовки на поверхность инструмента. В Приложении 4 представлены результаты 3D-печати деталей штампов для разделительных и формообразующих операций.

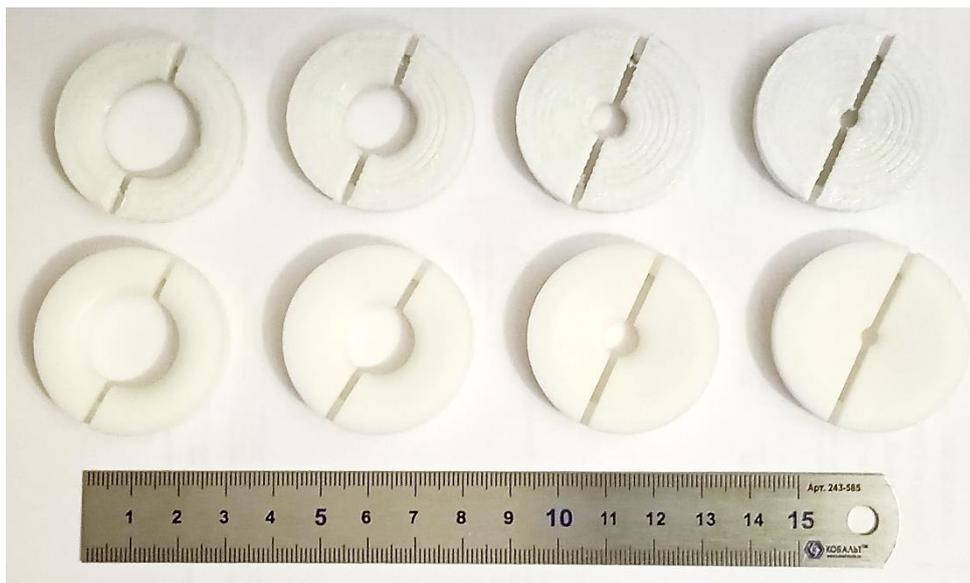


Рисунок 4.15. Позиционеры для центрирования заготовок для разных  $\lambda$ : из ПЕТГ (верхний ряд) и из КПФП (нижний ряд)

#### 4.3 Контроль точности изготовления деталей и сборки при помощи 3D-сканирования

С появлением технологий 3D-печати открылось направление аддитивного производства, формирующееся и по сей день. Согласно ГОСТ Р ИСО/АСТМ 52950-2022 исходным объектом, подходящим для 3D-печати, является цифровая фасеточная модель, получение которой возможно либо на основании прямого твердотельного (CAD-программы) или полигонального (CAGD-программы) моделирования, либо на основе результатов 3D-сканирования, по результатам которого получается облако точек, которые в дальнейшем проходят процедуру полигонизации, одной из

разновидностью которой является триангуляция или объединение точек в сетку с базовой ячейкой в виде треугольника. Следует отметить, что точность подготовки модели методами твердотельного моделирования гораздо выше, чем подготовка модели по результатам 3D-сканирования.

Технологии 3D-сканирования сопровождаются программной частью, которое позволяет обрабатывать облако точек до полигональной модели. Программное обеспечение может включать в себя и модуль оценки геометрических размеров полученной фасеточной модели, проводить сравнение исходной твердотельной геометрии, созданной по чертежу, с геометрией фактической полигональной модели, полученной при помощи 3D-сканирования. Как было показано авторами работы [104], точность соответствия размеров деталей со сложными геометрическими контурами, полученными по традиционным технологиям литья и штамповки, может изменяться в диапазоне 0,05...0,15 мм, зависит от качества полученных 3D-сканов (аппаратное ограничение) и полигонизации точек (умение оператора). И в том, и в другом случае может иметь место и человеческий фактор. Например, неточная калибровка 3D-сканера перед процедурой сканирования и невысокая полигонизация модели. Аппаратная часть 3D-сканеров весьма разнообразна. Существуют две большие группы 3D-сканеров: оптические и лазерные. В первых в качестве источника света выступает светодиодная подсветка, а во-вторых, – лазерная подсветка различного класса мощности. Существуют и другие классификационные признаки деления оборудования, которые более подробно рассматриваются в статье [105].

Технологии 3D-сканирования применяются как для крупных объектов, размерами в несколько десятков и сотен метров, так и для мелких объектов, микроэлектронные компоненты. Определяющим фактором является область интереса (field of interest или сокр. FOV), для которой необходимо провести оценку геометрии (размеры, отклонения). Поэтому не всегда при 3D-сканировании для проведения цифровой метрологии

преследуется цель получения полной геометрической информации об объекте.

В исследовании выполнялось 3D-сканирование деталей-представителей, а также подборка и сборка инструмента для микровытяжки. На основании полученной информации были сделаны выводы о качестве 3D-печати и сборки инструмента.

По результатам 3D-печати выполнялся контроль отдельных деталей и подборок штампа. Для этого применялся бесконтактный способ, 3D-сканирование на основе инфракрасного структурированного подсвета, с применением 3D-сканера RangeVision Neopoint. Были выделены три группы деталей: основные (опорные плиты, матрицедержатель, прижим), пуансоны и матрицы. На заключительном этапе, полученные полигональные (stl-) модели сравнивались в программе GOM Inspect с исходной САД-геометрией и определялась карта отклонений геометрических размеров (КОГР). Рассмотрим некоторые этапы проектирования инструмента для изготовления осесимметричной детали, типа «Стаканчик», с применением КЭМ.

После 3D-печати прототипов выполнялся контроль размеров отдельных деталей, а также сборочных узлов (рис. 4.16). Для получения информации о размерах изделий применялся бесконтактный метод 3D-сканирования на основании структурированного подсвета. Перед проведением сканирования все объекты покрывались матирующим самоисчезающим спреем Ateco Ghost для получения равномерного коэффициента отражающей способности.

После получения серии сканов 3D-сканером RangeVision Neopoint, их обработки, финального совмещения и экспорта полигональной (stl-) модели в программе RV 3D Studio, полученный результат сравнивался с исходной САД-геометрией в программе GOM Inspect. Точность финального совмещения для матрицы составила 0,036 мм, а для подборки нижней части инструмента составила 0,085 мм. Совмещение САД-модели и фактической

полигональной stl-модели выполнялось в два этапа. На первом этапе выравнивание осуществлялось либо по одной точке, либо по трём точкам соответствия, выбранных на каждой из 3D-моделей. На втором этапе выполнялось локальное наилучшее совпадение геометрии. Точность совмещения для матрицы на первом и втором этапах составила 0,0524 мм. Точность совмещения для подборки на первом этапе составила 0,61 мм, а на втором этапе составила 0,1618 мм.

Было установлено, что размеры по боковой внешней поверхности матричной вставки лежат вне симметричного допуска  $\pm 0,1$  мм, соответствующего точности 3D-печати, напоминает дефект типа овальности (рис. 4.14а).

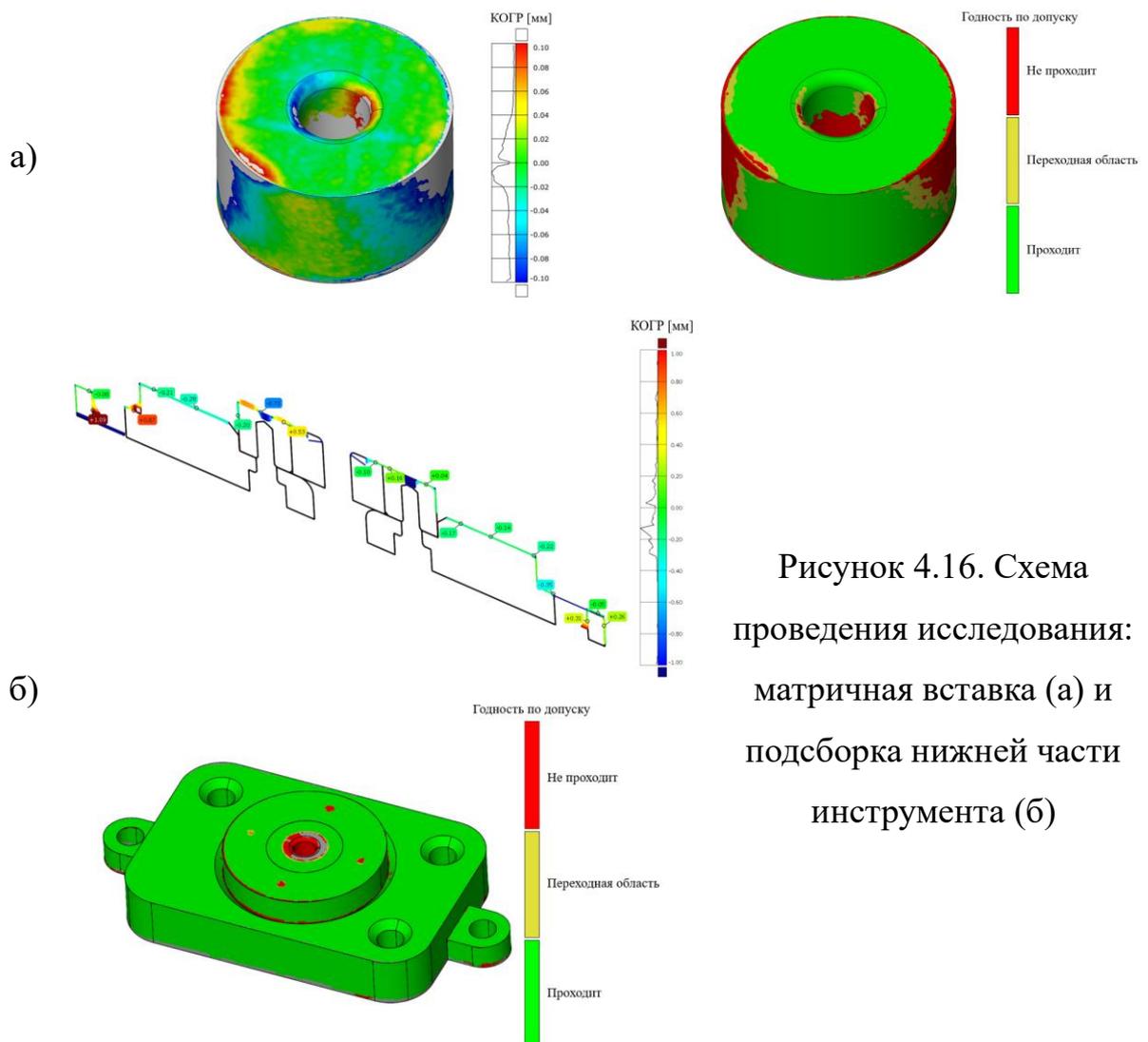


Рисунок 4.16. Схема проведения исследования: матричная вставка (а) и подборка нижней части инструмента (б)

В центральной части (заходная часть матрицы и цилиндрическая стенка) красная область указывает на отсутствие информации о геометрии по результатам 3D-сканирования. Подборка нижней части инструмента при установленном симметричном допуске  $\pm 1$  мм почти вся проходит по полю допуска. Однако, по гистограмме распределения размеров на карте отклонения геометрических размеров (КОГР), построенной для центрального сечения, видно, что разность размеров между исходной CAD-моделью и фактической полигональной stl-моделью лежит в интервале  $\pm 0,2$ , что превышает точность печати.

На рис. 4.17 показано изменение размеров рабочей кромки вырубного пуансона, износ которой составляет порядка 0,3 мм. На карте годности по полю допуска видно, что рабочая кромка и часть пуансона находятся вне поля допуска  $\pm 0,1$  мм.

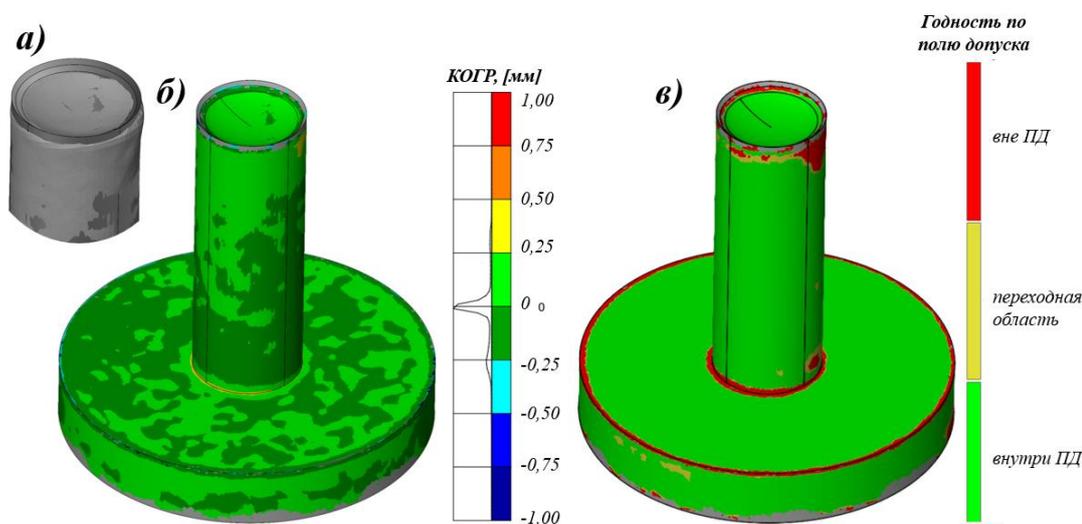


Рисунок 4.17. Карта отклонений геометрических размеров вырубного пуансона из 316L: совмещение кромок CAD- и stl-моделей (а), величины отклонений размеров (б) и карта годности по полю допуска  $\pm 0,1$  мм (в).

Процедура 3D-сканирования на основе инфракрасного структурированного подсвета (ИК-СП) выполнялась с применением аппаратного средства RangeVision Neopoint, а полигонизация облака точек –

с применением программного обеспечения RV 3D Studio. В табл. 4.4 представлены технические характеристики 3D-сканера.

Получение облака точек. Перед выполнением 3D-сканирования выполнялось нанесение белого беспигментного антибликового, матового покрытия Ateco Ghost аэрозольным способом, самоисчезающего через 2...3 часа. Основной процесс выполнялся в режиме 3D-сканирования на поворотном столе, который поворачивается по сегментам на один полный оборот во время процедуры с шагом, определяемым пользователем. Количество сегментов определяет итоговое количество точек. Согласно рекомендациям производителя, количество сегментов свыше 20 не влияет на увеличение количества точек, а лишь повышает затрачиваемое время на сканирование. Перед основным этапом выполняется калибровка сканера, в конце которой автоматически оценивается отклонение оси поворотного стола.

Таблица 4.4. Технические характеристики RangeVision Neopoint [106]

Параметр	Значение	 <p>Общий вид 3D-сканера (выпуск 2023 г., 1-ое поколение)</p>
Размер области сканирования, мм:	210×130	
Принцип работы:	ИК-СП	
Точность сканирования, мкм:	50	
Разрешение (3D), мкм:	150	
Рабочее расстояние, мм:	200...300	
Режим работы 3D-сканера:	статический и динамический	
Количество камер:		
- монохромная	2	
- цветная	1	

Подготовка полигональной модели. После выполнения 3D-сканирования появляются сканы, количество которых соответствует заданному количеству оборотов поворотного стола. При правильной калибровке выполняется автоматическая ориентация и совмещение сканов. Однако, было установлено, что совмещение сканов осесимметричных объектов размером 15 мм и менее даже при успешной начальной калибровке 3D-сканера в стационарном режиме сканирования не всегда успешно. Это приводит к необходимости ручного совмещения сканов. Чтобы повысить распознаваемость точек и упростить ручное совмещение сканов осесимметричных объектов, не имеющих отличительных особенностей на разных углах поворота столика, были добавлены маркеры на поверхность столика, по которым сопрягались сканы в режиме ручного выравнивания. На рис. 4.18 показан пример результата выполнения 3D-сканирования матричной вставки. Видно, что сканы были объединены программой, однако круговое расположение маркеров (рис. 4.18в) вместо их локализации (рис. 4.16б) указывает на некорректное автоматическое совмещение и требуется переход в ручной режим работы. Процедура получения полигональной модели включает в себя следующие шаги: обработка сканов, финальное совмещение сканов, создание полигональной модели и её экспорт в соответствующий формат (stl, obj, ply и другие).

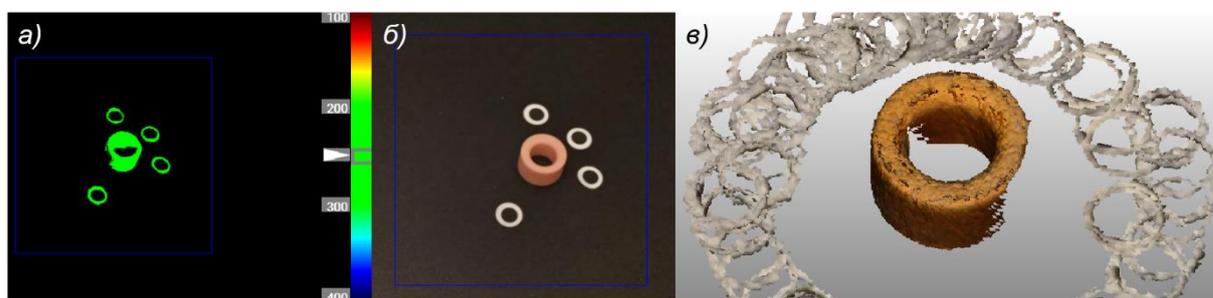


Рисунок 4.18. Сканирование матричной вставки из базового фотополимера (БФП)

Схема микровытяжки. Объекты исследования образуют инструмент для выполнения микровытяжки по схеме «дном вниз», то есть для выполнения операции вытяжки детали «Стаканчик» с размерами менее 10 мм или  $\varnothing 8$  мм и менее. Инструменты были получены при помощи нескольких технологий 3D-печати для разных материалов: прямого лазерного спекания (DMLS, материал: титановый сплав ВТ6), масочная стереолитография (LCD, материал: керамоподобный фотополимер или сокр. КПФП) и экструзионная печать (FFF, материал: ПЭТГ). Матричные вставки съёмные и отличаются друг от друга диаметром отверстия, а также оформлением геометрии заходного ребра матрицы (ЗРМ).

Цифровая метрология. Для выполнения оценки точности полигональной модели её противопоставляют исходной САD-модели. Для этого в программе GOM Inspect после загрузки обеих моделей проводят их взаимное выравнивание, по результатам которого определяется отклонение при совмещении. На первом этапе выравнивание осуществляется либо по одной точке, либо по трём точкам соответствия, выбранным на поверхностях каждой из 3D-моделей. На втором этапе выполняется локальное наилучшее совпадение геометрии.

После совмещения таким образом, чтобы отклонение составляло минимальное значение, строится карта отклонений геометрических размеров по заданной исходной САD-модели. В дальнейшем инструментами программы возможно определение размеров и отклонений, построение геометрии коррекции (fitting geometry) по методу Гаусса.

В этой статье рассматривались пять объектов: матричная вставка №1 из КПФП (объект I, ЗРМ скруглено постоянным радиусом  $R=1,5$  мм и имеет отверстие  $\varnothing 8,2$  мм), матричная вставка №5 из ПЭТГ (объект II, ЗРМ скруглено постоянным радиусом  $R=1,5$  мм и имеет отверстие  $\varnothing 8,1$  мм), нижняя опорная плита из ВТ6 (объект III), сборка верхней части металлического инструмента (объект IV), сборка нижней части металлического инструмента с матричной вставкой из КПФП №1 (объект

V). Для них, в зависимости от объекта и помимо карты отклонения геометрических размеров (КОГР) и карты годности по полю допуска, определялись следующие показатели: внешний  $\emptyset$  (внешний диаметр матричной вставки) – показатель I (ПКЗ I), внутренний  $\emptyset$  (диаметр отверстия матричной вставки) – показатель II (ПКЗ II), соосность отверстия и внешнего контура (матричной вставки) – показатель III (ПКЗ III), параллельность плоскости верхней плиты и плоскости прижима – показатель IV (ПКЗ IV), соосность цилиндрической поверхности матрицедержателя и отверстия матричной вставки – показатель V (ПКЗ V), соосность отверстия и внешнего контура прижима – показатель VI (ПКЗ VI), параллельность плоскости матрицедержателя и поверхности нижней плиты – показатель VII (ПКЗ VII), расстояние между отверстиями по большей стороне нижней плиты – показатель VIII (ПКЗ VIII).

Для оценки работоспособности программы на основании твердотельной CAD-модели была сгенерирована stl-модель объекта I и определены контролируемые показатели, указанные выше. Было установлено, что контрольные показатели ПКЗ, кроме ПКЗ II, имеют нулевое отклонение, лежат в поле допуска. Для ПКЗ II требовалось изменить метод вычисления пределов. По умолчанию установленный двухточечный метод приводил к неверному вычислению отклонения. После выбора метода наилучшего соответствия по Гауссу (GG, best fit) ПКЗ II изменился, пределы отклонения стали равны нулю. Таким образом, программа показывает хорошие результаты и может быть использована для проведения цифровой метрологии рассматриваемых объектов.

В случае метода наилучшей аппроксимации или Гауссовского наилучшего соответствия программа возводит в квадрат отклонения выбранных точек или полигонов на поверхности полигональной модели будущей поверхности аппроксимации. Программа суммирует квадратичные отклонения и меняет возможный поверхность аппроксимации до тех пор, пока эта сумма не станет наименьшей.

Результаты исследования. На рис. 4.19 показан результат сканирования объекта I, КОГР и годность по полю допуска  $\pm 0,1$  мм. Размеры по боковой внешней поверхности матричной вставки лежат в пределах симметричного допуска  $\pm 0,2$  мм, а внутренней поверхности –  $\pm 0,3$  мм. При этом стоит отметить несимметричность цветового поля, что говорит о небольшой овальности внутренней поверхности.

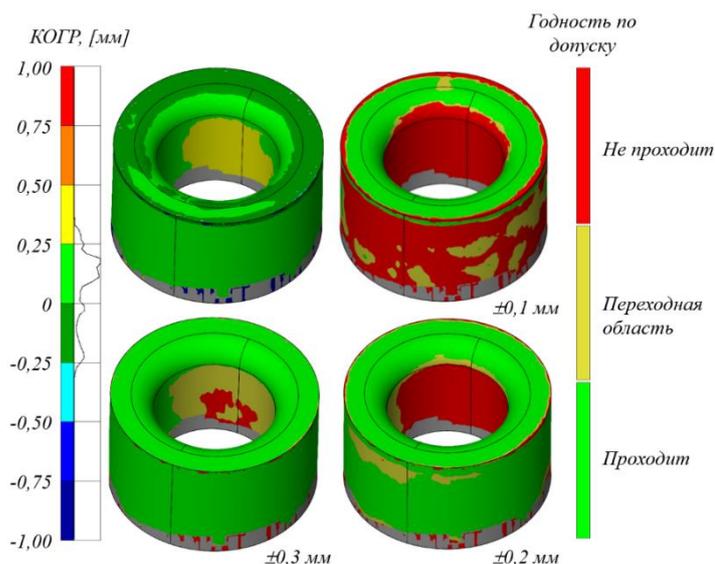


Рисунок 4.19. Результат сканирования объекта I

В табл. 4.5 показаны численные значения отклонений при финальном совмещении сканов. На рис. 4.20 представлен результат 3D-сканирования и финальное совмещение сканов объекта III.

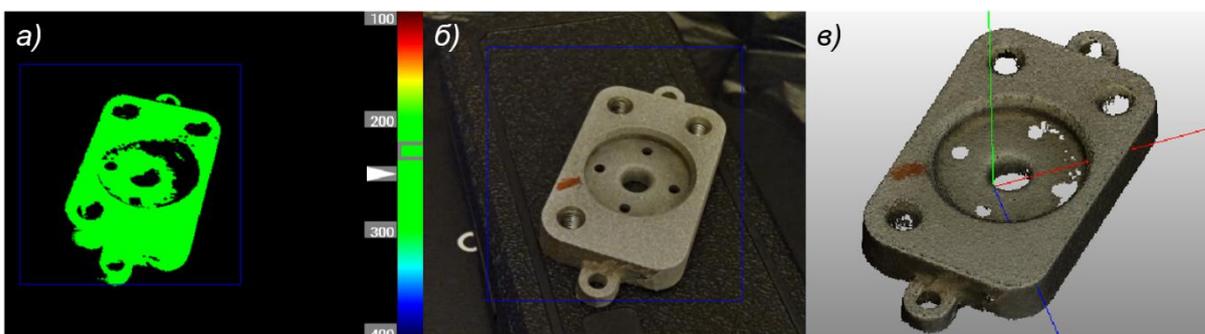


Рисунок 4.20. Сканирование нижней плиты штампа для выдавливания из ВТ6: вид через датчик глубины (а), общий вид с камеры (б) и результат автоматического совмещения сканов (в).

Таблица 4.5. Точность финального совмещения сканов

Объект	Среднее отклонение, мм
I	0,092
II	0,14
III	0,085
IV	0,079
V	0,079

Таблица 4.6. Результаты оценки точности изготовления и сборки деталей штампов по контрольным показателям

Объект	Контроль показателя	Номинальное значение/ отклонение	Фактическое значение размера/ отклонения	Попадание в поле допуска $\pm 0,1$ мм
I	ПКЗ I	14,0	13,66	нет
	ПКЗ II	8,2	8,3	да
	ПКЗ III	0	+0,31	нет
II	ПКЗ I	14,0	13,44	нет
	ПКЗ II	8,1	8,35	нет
	ПКЗ III	0	+0,23	нет
III	ПКЗ VIII	44,0	44,09	да
IV	ПКЗ IV	0	+0,99	нет
	ПКЗ VI	0	+0,12	нет
V	ПКЗ V	0	+0,32	нет
	ПКЗ VII	0	+0,56	нет

Согласно результатам измерений, ПКЗ II и VIII для объектов I и III проходят по полю допуска, соответствующему осреднённым значениям совокупности отклонений, связанных с 3D-сканированием (табл. 4.6).  
Результаты исследования. Выполненное исследование выявило неточности

на этапах 3D-печати и сборки. Значения отклонений показывают, что применение напечатанных деталей без выполнения доводочных операций и механообработки сопрягающихся поверхностей возможно, но для этого требуется учитывать особенности технологии 3D-печати, структурирование поверхности, усадку и т.д. В связи с этим наиболее рациональным способом будет являться традиционный подход, в рамках которого происходит увеличение или уменьшение размеров с целью последующей механообработки. Текстурирование поверхности, связанное с послойным синтезом объекта, приводит к тому, что на этапе цифровой метрологии строится поверхность аппроксимации с учётом текстуры поверхности и дефектов печати, так как точность сканирования составляет порядка 50 мкм, что в дальнейшем снижает точность попадания размеров в установленное поле допуска.

Результаты исследования показывают, что инструменты могут быть получены по наиболее распространённым технологиям 3D-печати. Каждая из рассмотренных технологий требует выполнения своих доводочных операций, необходимость в которых обусловлена технологическими ограничениями, не позволяющими изготавливать миниатюрные детали, сопоставимые по качеству с изделиями макроуровня.

Износ поверхности наглядно демонстрируется результатами КЭМ. Однако, результаты микроскопии показывают реальную картину износа, отличную от результатов КЭМ. Это обстоятельство указывает на необходимость введения поправочных коэффициентов в модель износа, используемую при КЭМ. Более точные результаты можно получить при помощи картирования поверхности по результатам элементного анализа возможно получить схожее представление износа поверхности, но данная работа является весьма кропотливой, так как снимок поверхности имеет небольшие габаритные размеры, что потребует необходимость панорамной съёмки на электронном микроскопе, перед проведением картирования.

По результатам измерений шероховатости поверхности определено изменение значений для поверхностей деталей из ВТ6 –  $Ra=1,43\dots6,63$  мкм и  $Rz=7,6\dots22,18$  мкм, а для полимерных деталей –  $Ra=0,286\dots6,7$  мкм и  $Rz=1,44\dots22,73$ , на длинах измерения  $0,25\dots2,5$  мм. Значение весьма велики и могут быть причиной царапин на поверхности изготавливаемых деталей. С другой стороны, за счёт такого технологического текстурирования поверхности площадь общей поверхности контакта снижена, что также значительно снижает коэффициент трения на контактной поверхности «заготовка-инструмент» и, соответственно, влияние трения на результат вытяжки также снижается.

Результаты моделирования разделительной операции показывают, что для латуни Л80 не требуется специальных условий. Однако, на практике оказалось, что отделение заготовки от отхода после вырубки происходит с трудом, с образованием небольшого мостика, удерживающего заготовку. Наоборот, заготовки из медных и алюминиевых сплавов отделяются от отхода хорошо.

При моделировании микровытяжки стаканчика на результат оказывает влияние как толщина материала, так и неравномерность зазора, которая может быть вызвана неточностью обработки деформирующего инструмента, его сборки или позиционирования заготовки. Места разрушений хорошо определяются как по полям интенсивности напряжений, так и по параметру Лоде-Надаи. Выводы. Технологии 3D-печати могут быть применены для изготовления инструмента для разделительной и формоизменяющей операций. При проектировании 3D-моделей необходимо учитывать технологические напуски с учётом точности изготовления, обусловленной технологией 3D-печати, и припуски под механическую обработку. Рассмотрение технологии с разных точек зрения (компьютерное моделирование, эксперименты, цифровая метрология и аналитические исследования) позволяют значительно продвинуться в изучении технологических особенностей процессов, в которых контроль над

технологией процесса в силу малости размеров деталей не доступен человеку в полном объёме.

#### 4.4 Определение шероховатости поверхности прототипов

Послойное построение объектов оставляет характерную для метода 3D-печати топографию или текстуру (рис. 4.21). Для её описания требуются специальные инструменты, определяющие шероховатость поверхности (ГОСТ 2789-73, ГОСТ Р ИСО 4287-2014). Так согласно ГОСТ Р 70117-2022 при плоском шлифовании, которое используется, как одна из итоговых операций при изготовлении деформирующих инструментов, шероховатость поверхности изменяется в диапазоне 6,3...0,05 мкм. Шероховатость напечатанных прототипов изменяется в другом диапазоне. Это обстоятельство позволяет думать о том, что и технологические параметры процесса обработки давлением будут не соответствовать тем, которые приняты при разработке традиционных технологий, т.е. с применением инструментов, полученных механообработкой.

Вид поверхности				
Материал	ВТ6	AlSi10Mg	ПЭТГ	БФП
Технология	DMLS		FFF	LCD

Рисунок 4.21. Фотографии поверхностей прототипов

При определении шероховатости применялись измеритель шероховатости TR210 (Time Group Inc., Китай), на длине измерения 0,25 и 0,8 мм, и профилометр MarSurf M400 (Mahr GmbH, Германия), на длине измерения 2,5 мм. Шероховатость измерялась на поверхностях прототипов

отдельных деталей-представителей инструмента из ВТ6, ПЭТГ, БФП и КПФП. По результатам измерений получены значения шероховатости, представлены на рис. 4.22.

Рельеф поверхности инструментов (рис. 4.23) не обрабатывался, так как данное обстоятельство является одной из потенциальных целей исследования, а именно – определение влияния рельефа поверхности на вытяжку стаканчика.

Материал	Ra			Rz		
	0,25	0,8	2,5	0,25	0,8	2,5
ВТ6	1,423	3,679	6,629	7,559	20,260	22,180
ПЭТГ	0,657	1,331	6,765	3,058	6,428	22,730
БФП	0,286	0,744	0,310	1,442	4,553	1,629
КПФП	1,095	1,267	0,641	5,054	9,244	3,017



TR210



MarSurf M400

Рисунок 4.22. Топология поверхности матриц, полученных: по технологии FFF

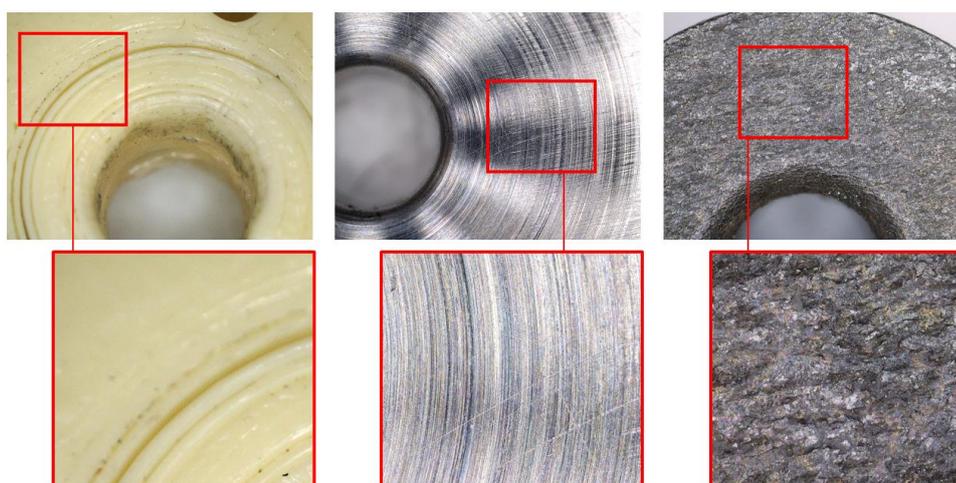


Рисунок 4.23. Топология поверхности матриц, полученных: по технологии FFF (слева), точением (по центру) и технологии DMLS (справа)

## ГЛАВА 5. ИЗНОС КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Исследования износа в области обработки давлением является важным вопросом, поскольку стоимость штампового инструмента, как для холодной, так и горячей объёмной или листовой штамповки является весьма высокой. Микроштамповка снижает стоимость инструмента, так как сами инструменты имеют небольшие габаритные размеры. Сложность их исполнения может быть компенсирована изготовлением методами аддитивных технологий. В процессе микровытяжки основной причиной износа является трение, возникающее при скольжении листовой заготовки по поверхности инструмента во время деформирования и втягивания в матрицу.

Поскольку с износом инструмента связано и качество изготавливаемых миниатюрных деталей, то вопрос о стойкости инструмента является весьма актуальным. При отсутствии информации об износе инструмента процент бракованных деталей будет расти, так как микроштамповка оперирует в диапазоне размеров 10...0,1 мм и доводочные работы практически исключаются.

Таким образом, на основе прогностических данных, основанных на расчётах, можно выбрать подходящие материалы, пары трения, и спланировать интервалы технического обслуживания инструмента.

Износ в обработке металлов давлением описывается с помощью моделей контактной механики, из которых модель износа Арчарда, представленного уравнением (1), является базовой [153-155].

$$W = K \frac{F_N}{HB} S_{\text{рск}} \quad (5.1)$$

где  $W$  – объём износа материала, [мм<sup>3</sup>];  $K$  – коэффициента износа, [-];  $F_N$  – нормальная сила реакции опоры, сила, создаваемая грузом, 1...5 [Н];  $HB$  – твёрдость более мягкого материала (по Бринеллю, HB), [МПа];  $S_{\text{рск}}$  – расстояние скольжения, [мм].

В большинстве случаев исследование износа проводилось с использованием эксперимента по вытягиванию полос различной геометрии. Недостатком этого метода является то, что ни деформация листового материала, ни силы в реальном формовочном инструменте не являются однородными. В процессе вытяжки изменяются такие факторы, как толщина листа, образуются складки, а также изменяются нормальные силы и, соответственно, контактные давления. В современной практике всё больше исследований сводится к виртуальному эксперименту [154-159].

На рис. 4.22 показаны возможные варианты результатов экспериментов на износ, обусловленные разным значением твёрдости изучаемых материалов. При единичном воздействии или создания продольного трека субстрат не подвергнется износу. Это будет соответствовать этапу втягиванию материала в матрицу. Но так как материал заготовки постоянно меняется, а материал инструмента остаётся прежним, то материал заготовки не будет деформироваться в процессе микровытяжки. Однако, при проведении эксперимента на износ субстрат будет постоянно контактировать с материалом инструмента (стержнем), что приведёт к обоюдному износу, или износу стержня и деформации субстрата, что будет соответствовать схеме на рис. 4.22в.

Задачей исследования является получение информации о контактном давлении (виртуальный эксперимент) и коэффициенте износа (натурный эксперимент) материала для дальнейшего использования полученной информации при определении стойкости деформирующего инструмента для микродеформирования. Во время натуральных экспериментов вся трибологическая система тщательно учитывалась, все граничные условия такие, как условия смазки и профили скорости, оставались постоянными.

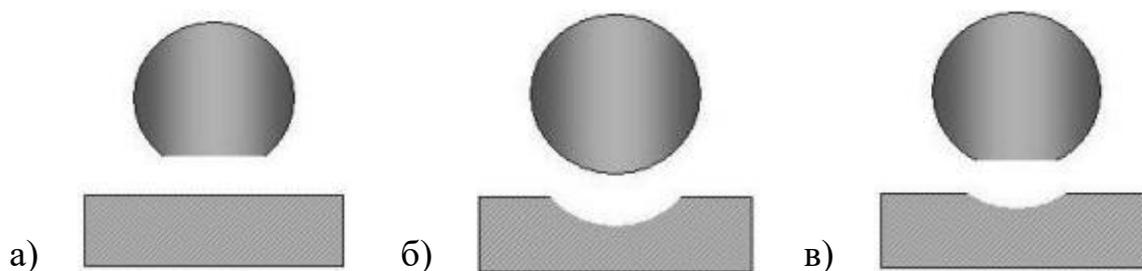


Рисунок 4.22. Возможные варианты износа материалов по схеме «стержень по пластине», вверху изнашиваемый стержень или шарик, внизу – субстрат: а) только стержень; б) только пластина; в) стержень и пластина.

### 5.1 Описание эксперимента по схеме «стержень по пластине»

Определение износа поверхности осуществлялось на основании результатов экспериментов по схеме «стержень по пластине» на трибометре CSM TRB (рис. 4.23). В процессе эксперимента субстрат получал трансляционное возвратно-поступательное перемещение для общей длины пути, равной 500 м.

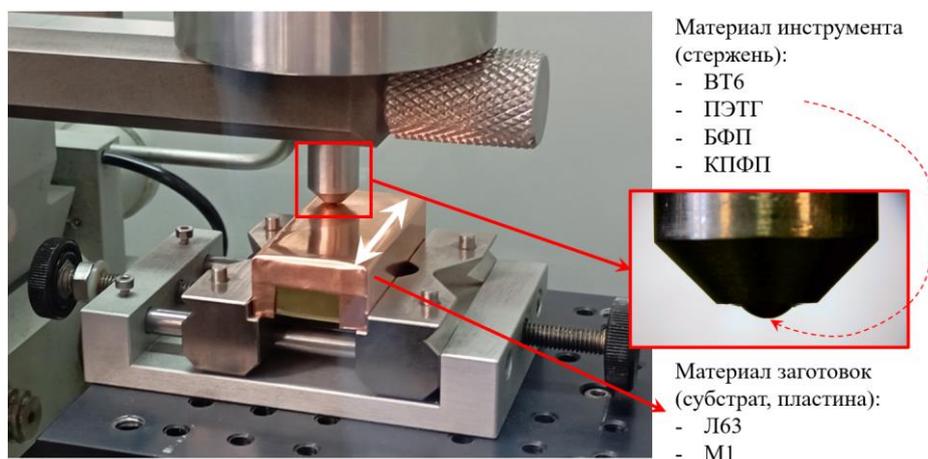


Рисунок 4.23. Испытания на износ по схеме «стержень по пластине»

После прохождения заданного пути материал субстрата и стержня был снят с испытательной машины. Определение износа проводилось по формуле Арчарда, уравнение (2), для которого требуется характеристика получившейся канавки по данным профилометра, а также

полусферического наконечника стержня, на основании измерений под оптическим микроскопом. На рис. 4.24 показан износ полусферической части стержня под электронным (а) и цифровым (б) микроскопами.

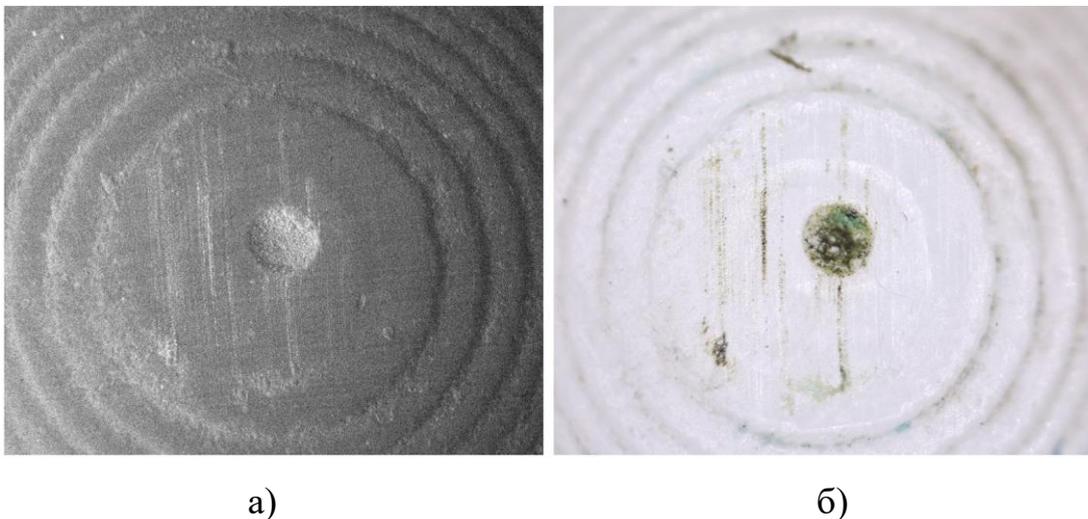


Рисунок 4.24 Визуальный контроль износа под микроскопом: электронным (а) и цифровым (б)

## 5.2 Проведение КЭ-моделирования износа инструмента при микровыдавливании

Для оценки контактного давления была применена программа Abaqus, в которой выполнялось вычисление поля контактного давления по поверхности инструмента. На рис. 4.24 показана схема процесса микровытяжки, а также даны значения некоторых параметров, которые были использованы для построения геометрии.

Описание физико-механических свойств выполнялось на основании имеющихся пар трения, которые образуют систему «деформируемый материал – поверхность матрицы». Матрицы были изготовлены из нескольких материалов, свойства которых приведены в табл. 4.6, а именно: керамоподобный фотополимер (КПФП, материал I), полиэтилентерефталат-гликоль (ПЭТГ, материал II), титановый сплав ВТ6 (материал III), нержавеющая сталь AISI 304, российский аналог 08X18H10, (материал IV).

Для оценки распределения контактного давления, возникающего при скольжении заготовки по поверхности места скругления матрицы во время микроштамповки, были рассмотрены и проанализированы пять этапов процесса, представленных на рис. 4.25. Процесс включает этапы от момента начала скольжения заготовки по радиусу скругления матрицы до её завершения. Область скругления можно представить, как сектор, образованный точками поверхности матрицы. Местоположение этих точек определяется угловой характеристикой сектора.

Таблица 4.6. Основные физико-механические свойства материалов

Параметры	Субстрат (заготовка)	Изнашиваемый наконечник (матрица)			
	М1	AISI 304	BT6	ПЭТГ	КПФП
$\rho$ , [кг/м <sup>3</sup> ]	8940	7853	4430	1270	1,15...1,36
E, [ГПа]	128	210	115	2,3	1,9...2,4
$\sigma_b$ , [МПа]	260	420	900	48	42...62
НВ, [МПа]	55	143	300	50,3	55,5

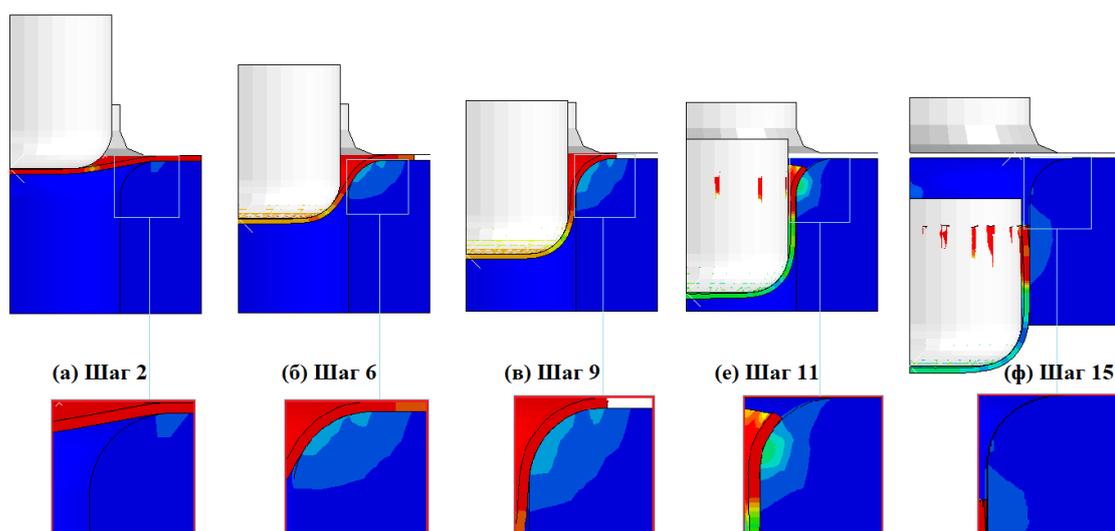


Рисунок 4.25. Процесс скольжения заготовки по поверхности места радиуса скругления матрицы

Задача моделировалась в трёхмерной, осесимметричной постановке, для  $\frac{1}{4}$  от полной геометрии осесимметричной матрицы. На рис. 4.26 показаны области с различным уровнем адаптации КЭ-сетки, что позволило получить точные данные по износу инструмента в области заходного ребра матрицы (ЗРМ). Такое решение позволило сократить время вычислений на 75%, получить решение с незначительным влиянием на прогнозируемые значения напряжения, деформации, силы и контактные давления.

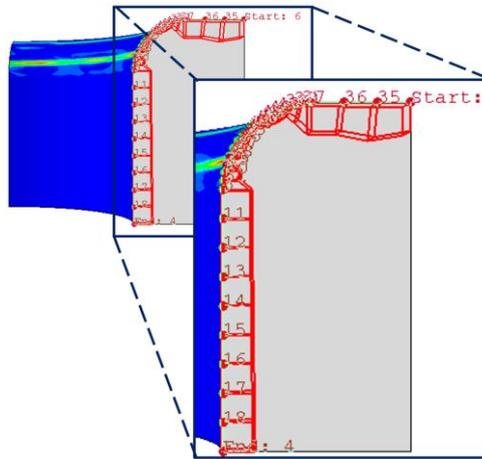
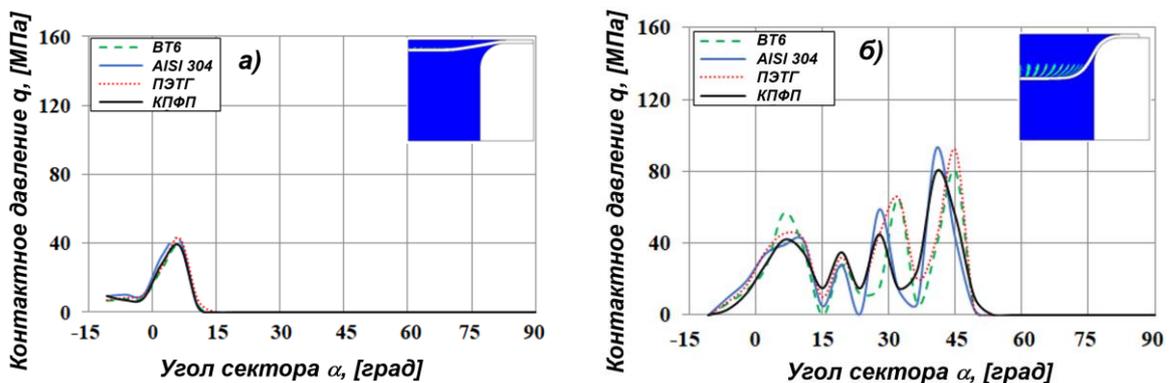


Рисунок 4.26. Определение области ЗРМ для адаптации КЭ-сеткой и построения графиков износа

По результатам КЭ-моделирования построены графики распределения поверхностного давления на основе этапов процесса микроштамповки (согласно рис. 4.25), на рис. 4.27 показано прогнозируемое распределение контактного давления по радиусу матрицы для этих случаев.



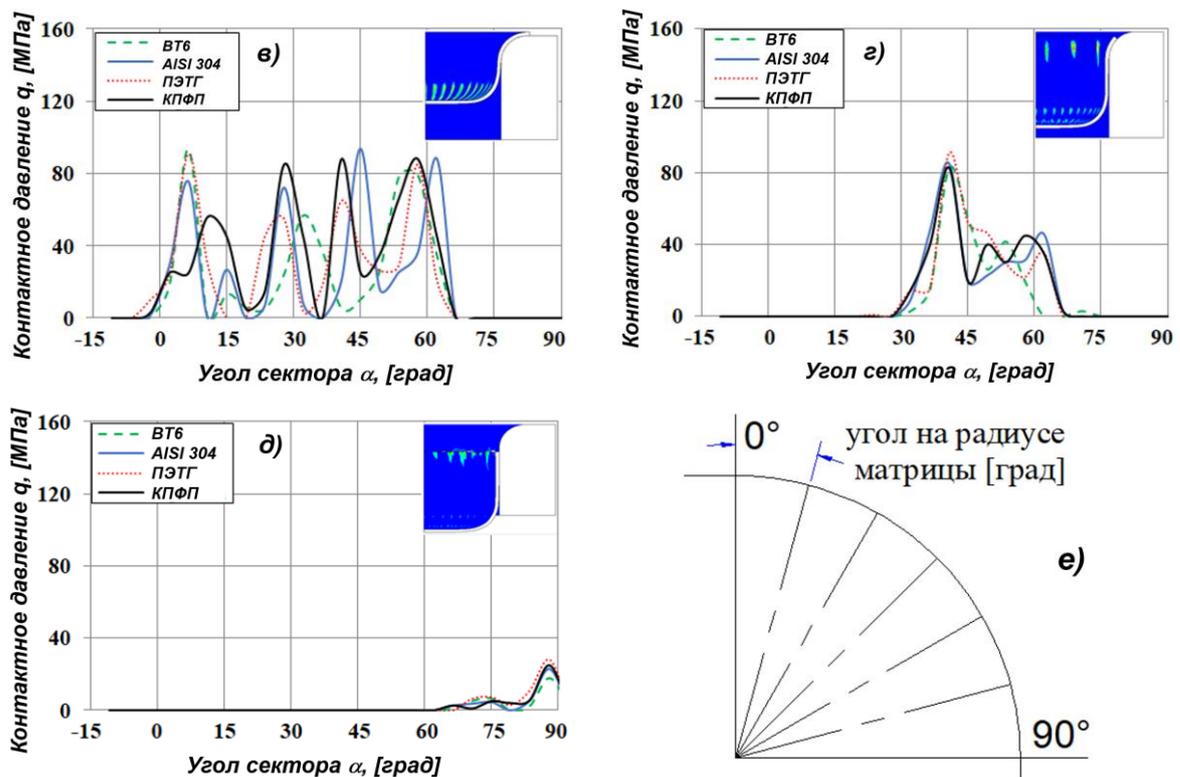


Рисунок 4.27 Прогнозируемое распределение контактного давления по радиусу матрицы в пяти различных случаях во время моделирования при КП  $\lambda=1$ : (а) шаг 2; (б) шаг 6; (в) шаг 9; (г) шаг 11; (д) шаг 15; (е) сектор, длина дуги совпадает с контуром матрицы

На каждом графике приводится вставка этапа деформирования и скольжения заготовки для наглядности совмещения данных процесса. Очевидно, что функция контактного давления нелинейна, значительно изменяется в зависимости от места на ЗРМ на протяжении всего процесса микровытяжки, и поэтому не может быть полностью отражена на пяти графиках.

На рис. 4.28 представлен обобщённый график, показывающий суммарное поверхностное давление на всю поверхность радиуса скругления матриц для каждого изучаемого материала. Распределение поверхностного давления по радиусу скругления матрицы неравномерно, максимальное давление в основном сосредоточено на двух участках  $8^\circ \dots 12^\circ$  и  $50^\circ \dots 58^\circ$ . Распределение давления почти одинаково для различных материалов. Максимальное значение давления достигается на угле сектора  $10^\circ$ .

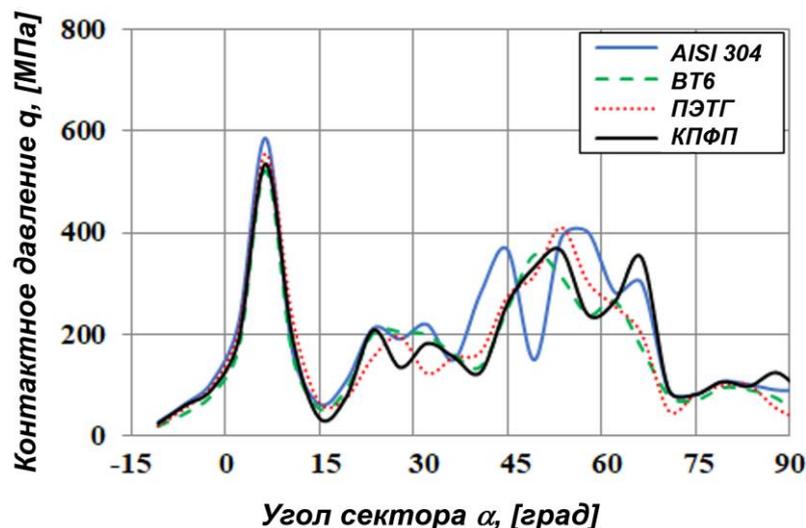


Рисунок 4.28. График распределения поверхностного давления по радиусу скругления матрицы для коэффициента подобия  $\lambda=1$

### 5.3 Определение коэффициента износа материала

Для определения коэффициента износа материала, из которого изготовлена матрица инструмента для микровытяжки был проведен эксперимент по изучению износа материала инструмента в условиях сухого трения при трансляционном движении. Исследования выполнялись по схеме «стержень по пластине» (pin-on-plate) на специальном стенде-трибометре CSM TRB [160], представленном на рис. 4.29а, по схеме трансляционного перемещения субстрата (рис. 4.29б). Стержень представляет собой полый цилиндр, внутри которого закрепляется изнашиваемый стержень, имеющий полусферическое закругление, или шарик  $\varnothing 3...5$  [мм] из материала инструмента (рис. 4.30). В качестве подложки или субстрата выбирается материал листовой заготовки. После соприкосновения стержня и пластины устанавливается груз, вес которого равен  $2...5$  [Н], выбирается в зависимости от пары трения. Устанавливались три контрольных расстояния скольжения ( $S_{\text{рск}}$ ) 100 [м], 250 [м] и 500 [м],

после прохождения которых определялись графики изменения коэффициента трения, определялся диаметр пятна износа.

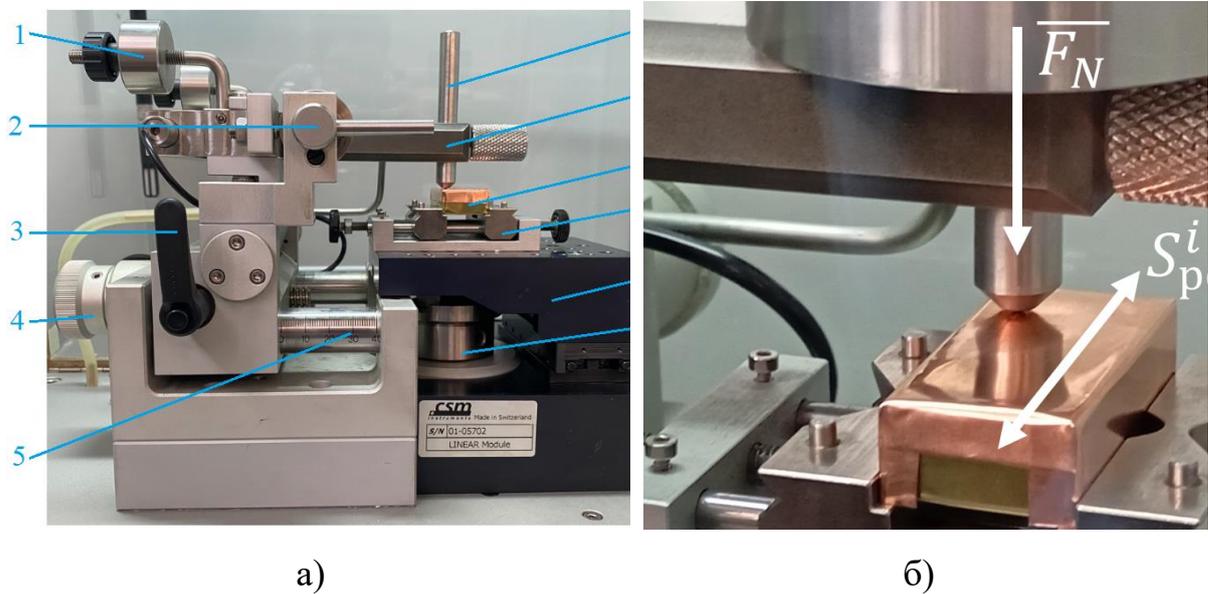


Рисунок 4.29 Трибометр CRS TRB (а) и схема испытаний (б): 1 – противовес; 2 – эксцентрическая защёлка; 3 – ручка фиксатора; 4 – ручка винтовой передачи каретки; 5 – шкала для контроля величины перемещения каретки; 6 – полый цилиндр со стержнем, 7 – кантеливер; 8 – брусок с закреплённым субстратом; 9 – тиски; 10 – оснастка для возвратно-поступательного движения субстрата; 11 – выходной вал электромотора.

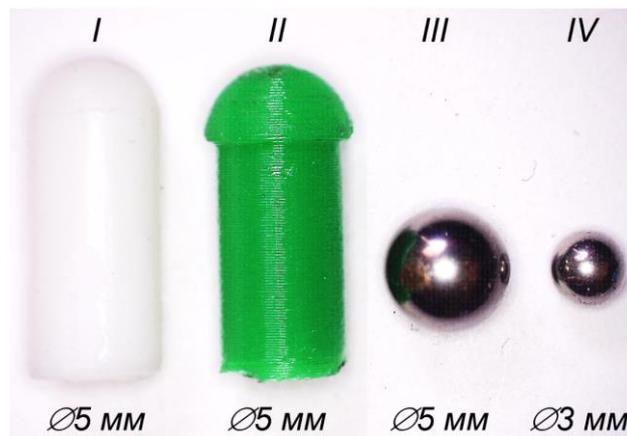


Рисунок 4.30 Общий вид изнашиваемых тел, с указанием номера материала

Зафиксированная скорость скольжения составила 0,09 [м/с]. Все перечисленные данные вводились в программном обеспечении TriboX перед началом испытаний. Также указывалась температура окружающей среды 20...25 [°C] и относительная влажность 17...18%.

Расчет и оценка износа материала после проведения экспериментов проводился по уравнениям (5.2) и (5.3), соответственно.

$$h = R - \sqrt{\left(R^2 - \frac{d_w^2}{4}\right)}, \quad (5.2)$$

$$W = \frac{\pi h}{6} \left(\frac{3d_w^2}{4} - h^2\right), \quad (5.3)$$

Определение высоты сегмента можно проводить несколькими способами. Во-первых, после прямого измерения отпечатка износа при помощи микроскопа (цифрового, электронного), определяется высота сегмента по уравнению (5.2) (методика А). Во-вторых, возможно выполнение вычислений в САD-программе, при помощи геометрических построений, на основании известного исходного радиуса полусферической части стержня и диаметра отпечатка (методика Б, рис. 4.31).

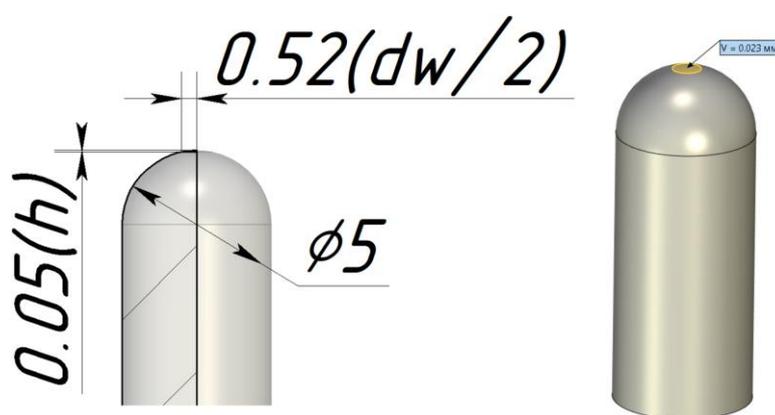


Рисунок 4.31. Реализация методики Б в САD-программе

На рис. 4.32 показано измерение отпечатка при помощи электронного и цифрового микроскопов. Так, для стержня из КПФП было определено, что

при  $d_w=1040$  [мкм] по методике А высота сегмента составила  $h=27$  [мкм], а по методике Б –  $h=50$  [мкм].

Следует отметить, что стержень имеет две области износа, отличающиеся размером диаметра ( $d_w$ ), отражено на рис. 8а. Можно говорить об образовании дополнительной области износа, которая образовалась из-за появившегося бурта на субстрате. В идеальном случае следует избегать образование бурта, появление которого связано с высокой нормальной силой, что указывает либо на необходимость снижения веса груза, либо на уменьшение длины общей дистанции скольжения ( $S_{рск}$ ). Образование второй области также может быть связано с выкрашиванием КПФП в процессе проведения эксперимента.

Помимо образования бурта и выкрашивания, возможно отклонение размеров от чертёжных на этапе изготовления. При изготовлении стержня из КПФП применяется технология 3D-печати LCD, точность которой составляет  $\pm 50...100$  [мкм]. Также КПФП обладает объёмной усадкой  $3,26...3,75\%$ . Поэтому, при номинальном задании размера полигональной, печатаемой 3D-модели без учёта точности печати и усадки итоговый диаметр сферической части стержня будет находиться в диапазоне  $4,713...4,763$  [мм]. При печати стержня была учтена усадка, а размер сферической части составил  $5,03$  [мм]. Резюмируя сказанное можно предположить, что боковое пятно образовалось либо из-за бурта, либо из-за выкрашивания материала.

Тем не менее, принимая во внимание оба значения для высоты шарового сегмента ( $h$ ) получаем следующие значения объёма потери материала после износа:  $W_{CAD}=0,023$  мм<sup>3</sup> (по САД, при  $h=50$  [мкм]),  $W_{h50}=0,021$  мм<sup>3</sup> (по уравнению (5.3) при  $h=50$  [мкм]) и  $W_{h27}=0,012$  мм<sup>3</sup> (по уравнению (5.3) при  $h=27$  [мкм]).

Тогда на основании уравнения (5.1) может быть определён коэффициент износа, согласно уравнению (5.4).

$$K = \frac{WH}{F_N S_{рск}}. \quad (5.4)$$

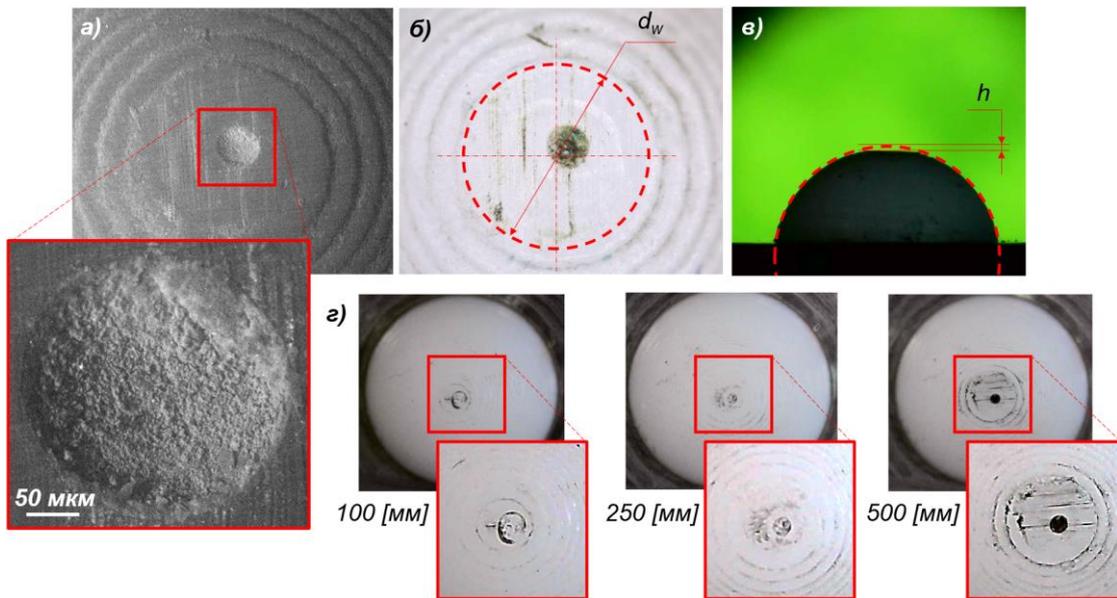


Рисунок 4.32. Изображение сферы из КПФП после эксперимента: (а) снимок на электронном микроскопе ZEM20 (ZerTools, КНР); (б) снимок на цифровой микроскоп ( $\times 300$ крат) сверху и (в) сбоку; (г) поэтапное определение пятна износа.

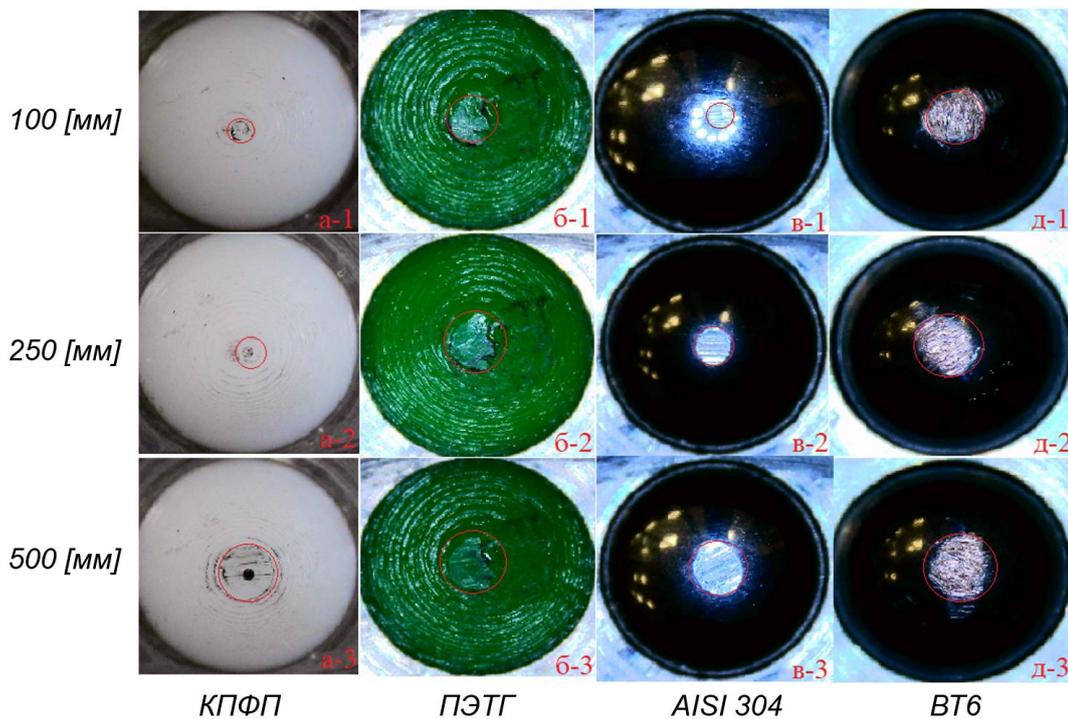


Рисунок 4.33. Анализ области износа шарик, измеренный с помощью оптического электронного микроскопа с разными материалами

Таблица 4.7. Объем износа материалов матрицы

$S_{рск}$ , [м]	Материал стержня	$D_{ст}$ , [мм]	$d_w$ , [мм]	$W$ , [мм <sup>3</sup> ]
100	ВТ6	5	0,5484	0,0018
	AISI 304	5	0,6451	0,0034
	КПФП	5	0,7507	0,0063
	ПЭТГ	5	0,8164	0,0088
250	ВТ6	5	0,6672	0,0039
	AISI 304	5	0,7887	0,0077
	КПФП	5	0,9373	0,0153
	ПЭТГ	5	1,0226	0,0218
500	ВТ6	5	0,8136	0,0087
	AISI 304	5	0,9663	0,0173
	КПФП	5	1,1743	0,0380
	ПЭТГ	5	1,2849	0,0547

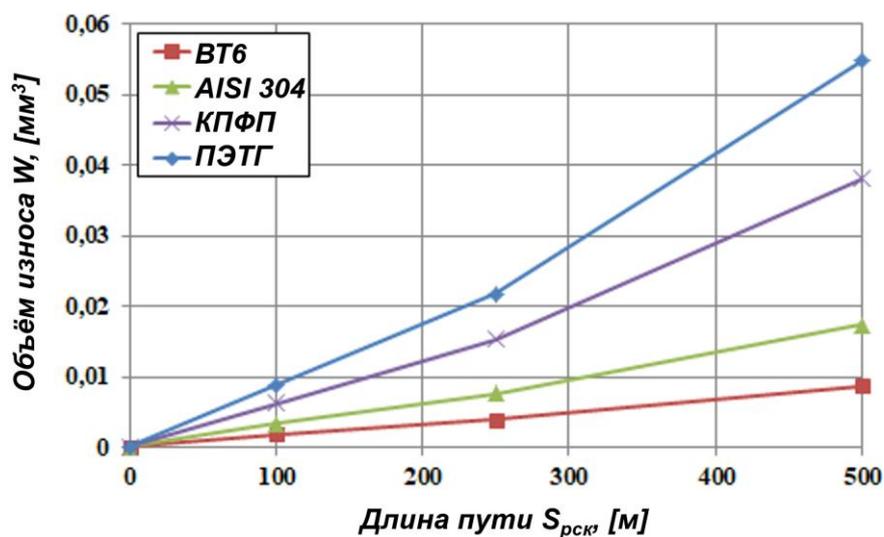


Рисунок 4.34. Графики объём износа материалов матрицы

В табл. 4.8 проводится сравнение объема материала, потерянного в процессе скольжения между стержнем и поверхностью субстрата из М1. Результаты показали, что наименьшее количество материала было потеряно материалом ВТ6, а наибольшее – материалом ПЭТГ, что хорошо объясняется

моделью износа Арчарда. Твёрдость материала ВТ6 выше, чем у медного субстрата М1, что приводит к большему истиранию последнего. И, наоборот, материал ПЭТГ имеет меньшую твёрдость по сравнению с субстратом, что приводит к большему истиранию сферической поверхности стержня из ПЭТГ.

Таблица 4.8. Процент объема материала, потерянного при скольжении шариков по поверхности медной пластины М1

Материал стержня	$S_{\text{рск}}, [\text{м}]$				
	100	250	[%]	500	[%]
ВТ6	0,00178	0,00391	119%	0,00868	122%
AISI 304	0,00342	0,00766	124%	0,01733	126%
КПФП,	0,00628	0,01533	144%	0,03803	148%
ПЭТГ	0,00880	0,02177	147%	0,05471	151%

При увеличении расстояния скольжения от 100 [м] до 250 [м] и 500 [м] объём износа материала матрицы увеличивается линейно, а наклон графика постепенно увеличивается в следующем порядке следования материалов: ВТ6, AISI 304, КПФП и ПЭТГ. При увеличении расстояния скольжения со 100 [м] до 250 [м] объём дополнительных потерь материала для ВТ6 составляет 119%, для AISI 304 – 124%, КПФП – 144% и для ПЭТГ – 147%. При увеличении расстояния скольжения с 250 [м] до 500 [м] объём дополнительных потерь материала для ВТ6 составляет 122%, для AISI 304 – 126%, для КПФП – 148% и для ПЭТГ – 151% (табл. 4.9).

На рис. 4.35 представлены графики, отражающие зависимость коэффициента износа в зависимости от твёрдости материала. Теоретическая модель износа Арчарда, определяющая соотношение между коэффициентом износа и твёрдостью материала, в сочетании с результатами, показанными на рисунке 4.35, показывает, что матрица, изготовленная из ВТ6, имеет лучшую износостойкость.

Таблица 4.9. Коэффициент износа инструментального материала

Материал стержня	W, [мм <sup>3</sup> ]	HB, [МПа]	F <sub>N</sub> , [Н]	S <sub>рск</sub> , [М]	K, ×10 <sup>-5</sup> [-]
ВТ6	0,0018	350	4	100	1,31
AISI 304	0,0034	143	4	100	1,20
КПФП,	0,0063	107	4	100	0,86
ПЭТГ	0,0088	125	4	100	1,09
ВТ6	0,0039	350	4	250	1,15
AISI 304	0,0082	143	4	250	1,07
КПФП,	0,0164	107	4	250	0,84
ПЭТГ	0,0205	125	4	250	1,07
ВТ6	0,0088	350	4	500	1,28
AISI 304	0,0189	143	4	500	1,22
КПФП,	0,0350	107	4	500	1,04
ПЭТГ	0,0499	125	4	500	1,35

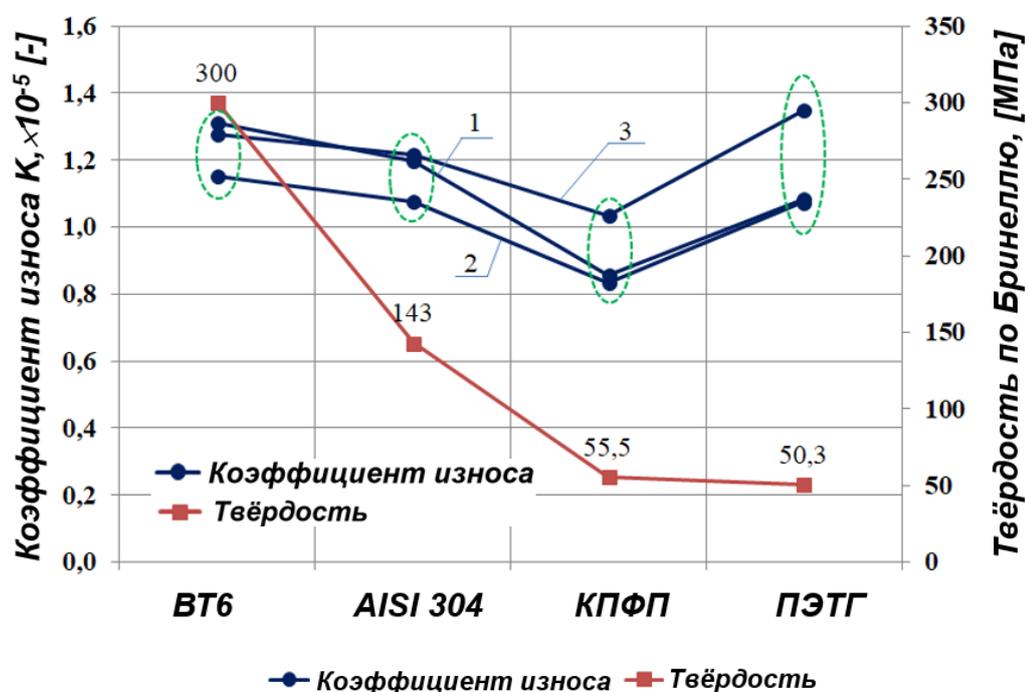


Рисунок 4.35. Графики изменения коэффициентов износа и твердости материалов

Далее следует материал AISI 304. Определив коэффициент износа инструмента, можно в дальнейшем спрогнозировать срок службы или стойкость инструмента. Исследования распределения контактного давления в области ЗРМ в процессе микроштамповки листовой заготовки толщиной 0,2 мм выполнены при помощи КЭ-моделирования. Показано, что на поверхности радиуса матрицы появляются две области с наибольшими значениями контактного давления: между  $8^\circ \dots 12^\circ$  и  $50^\circ \dots 70^\circ$ . Доминирующая зона, приводящая к максимальному контактному давлению и серьезности износа инструмента, зависит от геометрии профиля радиуса матрицы при одном и том же материале и условиях процесса. Геометрия радиуса матрицы оказывает существенное влияние на износ инструмента, а стандартные круговые и эллиптические кривые могут привести к достижению пониженного и равномерного распределения контактного давления (распределения износа) по большинству зон дуги радиуса матрицы. Были проведены эксперименты по определению коэффициента износа для материалов матрицы КПФП, ПЭТГ, ВТ6 и AISI 304 при контакте с листовой заготовкой из М1, получены графики изменения коэффициента износа. Применение технологии 3D-печати для производства и изготовления инструментов, используемых в процессе вытяжки, является новым направлением исследований. Новый подход с использованием метода конечных элементов программного обеспечения ABAQUS в сочетании с реальными экспериментами помогает повысить эффективность исследования износа инструмента. Процесс моделирования помогает определить место наибольшего поверхностного давления (опасная зона с наибольшей вероятностью износа). Эксперименты помогают определить коэффициент износа, который способствует прогнозированию срока службы инструмента, его стойкость. Результаты исследования позволяют использовать полученные данные в модели стойкости инструмента, так как найдены значения одних из ключевых факторов, контактного давления и коэффициента износа.

## ГЛАВА 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОДЕФОРМИРОВАНИЯ

В качестве материалов заготовок использовались следующие материалы: медь М1 (по ГОСТ 859-2014), латунь Л63 (мягкая, по ГОСТ 15527-2004) и алюминий технической чистоты А5 (ДПРНМ, по ГОСТ 618-2014). Толщина листовых заготовок составляла 100 мкм. Следует отметить, что в исследовании применялась также и фольга из алюминия, согласно ТУ 1811-005-53974937-2004 и ГОСТ 745-2014, сложенная в несколько раз, до получения номинальной толщины: при толщине фольги  $t_0 = 10$  мкм – 10 слоёв, а при  $t_0 = 25$  мкм – 4 слоя. Применение «слоёной» заготовки позволяло оценить точность изготовления инструмента по наличию или отсутствию повреждений на внешних слоях фольги. При моделировании использовался также латунный сплав Л80, для которого экспериментальных исследований не проводилось. В отличие от Л63, сплав Л80 имеет менее высокое значение предела прочности и более высокое значение относительной деформации при разрушении ( $\sigma_{вЛ80}=370$  МПа и  $\delta_{Л80}=40\%$  против  $\sigma_{вЛ63}=400$  МПа и  $\delta_{Л63}=38\%$ ). Кроме этого, при трении без смазки он показывает более высокий коэффициент трения, что будет снижать его способность к вытяжке без смазки на неполированной поверхности инструмента.

### 6.1 Микровытяжка детали «Стаканчик»

Сравнение результатов было выполнено визуально (рис. 6.1) и при помощи цифрового микроскопа с максимальным 300х-кратным увеличением (рис. 6.2). Результаты экспериментов и моделирования, выполненные для случаев  $K = 1,5$  и  $\lambda = 1$  (рис. 6.1, рис. 6.2а-в), и  $K = 1,5$  и  $\lambda = 0,5$  (рис. 6.1б, рис. 6.2г-е), имеют хорошее совпадение по месту появления и интенсивности складкообразования. Было установлено, что образующиеся складки могут выглаживаться, при этом образуются либо

фестоны с длинной или короткой длинной волны, либо волосины, как результат образования зажимов материала.

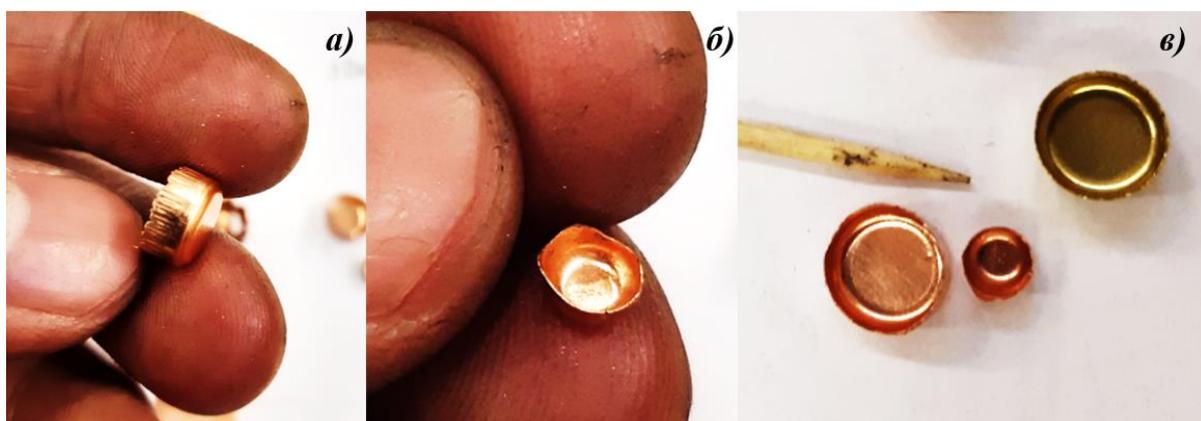


Рисунок 6.1. Результаты микрорастяжки:  $\lambda = 1$  (а),  $\lambda = 0,5$  (б), сравнение двух образцов из М1 (для  $\lambda = 1$  и  $\lambda = 0,5$ ) и одного из латуни Л63 (для  $\lambda = 1$ )

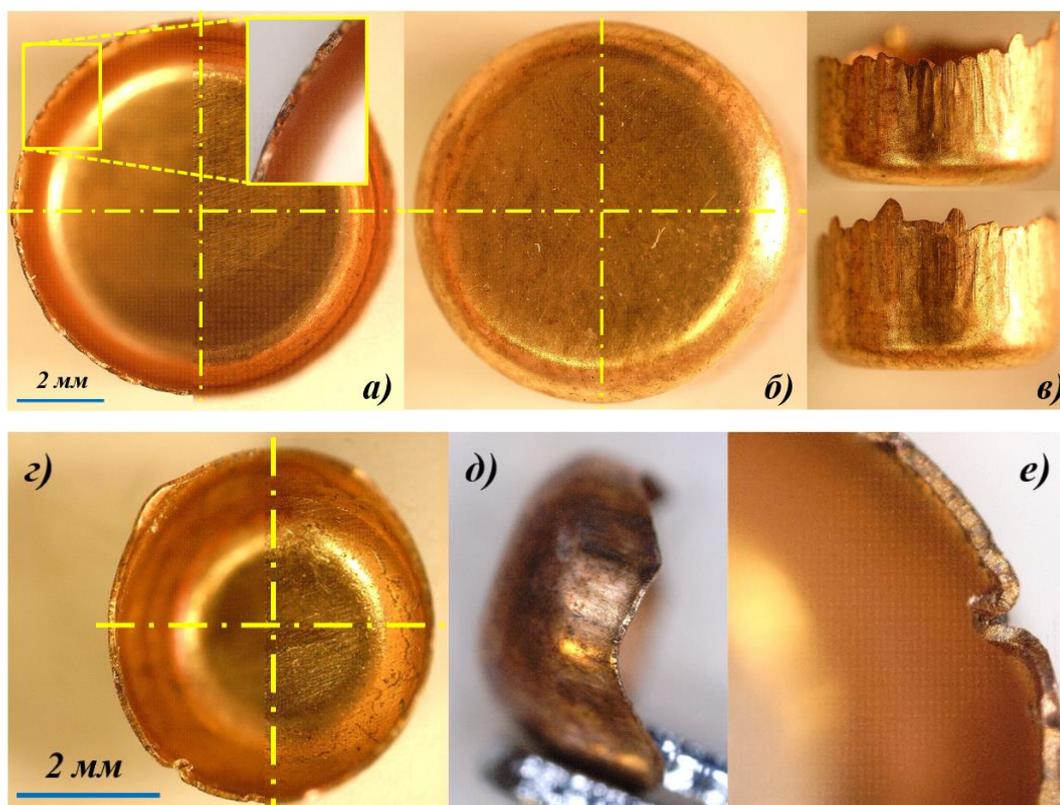


Рисунок 6.2. Результаты микрорастяжки образцов из М1 под цифровым микроскопом (увеличение до 300х-крат):  $\lambda = 1$  (а–в) и  $\lambda = 0,5$  (г–е)

Из-за неточного позиционирования высота стаканчика по линии впадин фестонов неодинакова (рис. 6.2б). Распространение складок по высоте стенки стаканчика не соответствует той, которая была получена при моделировании и превышает её в два раза.

На рис. 6.3 приведено сравнение результатов микровытяжки. На деталях с  $\lambda=0,5$  видны складки, указывающие на необходимость либо увеличения силы прижима, либо на увеличение коэффициента вытяжки.

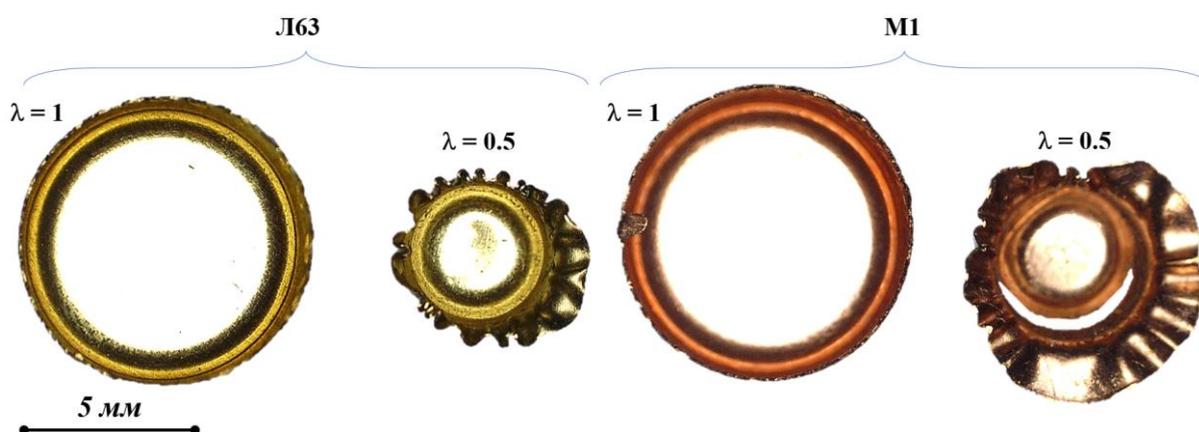
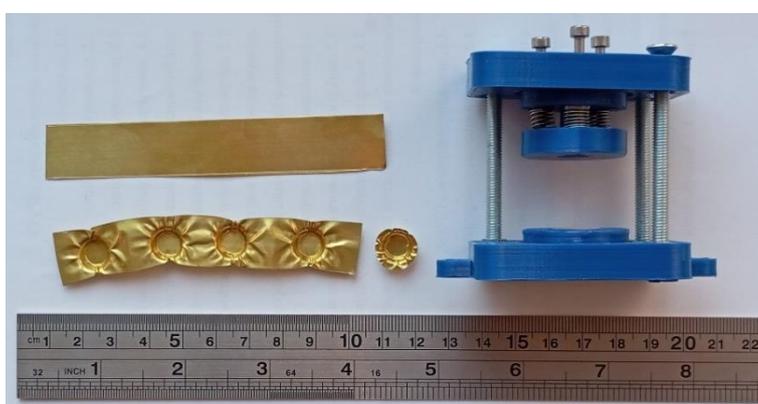


Рисунок 6.3. Детали «Стаканчик», вид сверху

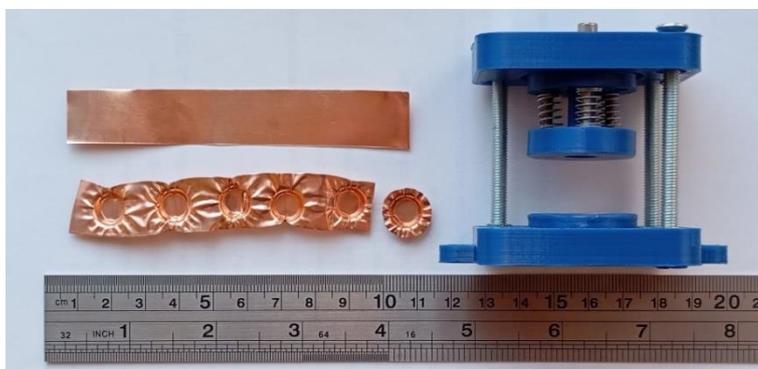
На рис. 6.4 представлены результаты микроштамповки стаканчиков из полосы, при ручной подаче заготовки. Несмотря на продольную подачу полосы из-за наложения складок (гофр) происходит её искажение, что может указывать либо на увеличение шага подачи, либо на создание предварительного натяжения в ленте. В большей или меньшей степени это наблюдается как на полимерном штампе (а, б), так и на металлическом штампе (в).

На рис. 6.5 показаны результаты микровытяжки, при котором использовались напечатанные пуансоны (осесимметричные детали, без прижима) и пуансоны, полученные точением (осесимметричные детали, с прижимом). В первом случае была применена квадратная заготовка с размером стороны, равной диаметру заготовки, соответствующей диаметру расчётной заготовки (табл. 3.1). Во втором случае применялась круглая

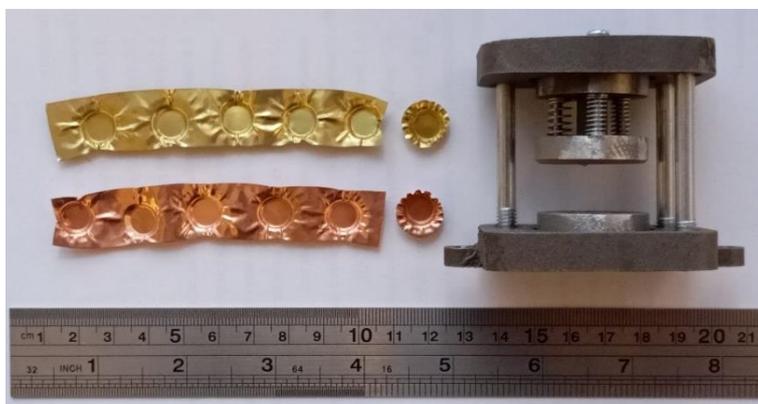
заготовка. Неровная поверхность пуансона и матрицы, выполненных из металла, оставляет на более мягких материалах царапины, что допустимо не во всех случаях по техническому заданию на деталь. Во втором случае стенки имеют неравномерную высоту, видно, что складки с фланца перешли на стенки деталей. Выполнить обреза верхней части стаканчика возможно лишь при наличии специализированного оборудования, например, EDM, лазерная резка. В обоих случаях микровытяжка выполнена, но и в обоих случаях наблюдаются дефекты разного характера.



а) полоса из латуни Л63



б) полоса из меди М1



в) полосы из меди М1 и латуни Л63

Рисунок 6.4. Штамповка из ленты: на полимерном штампе из Л63 (а) и М1 (б), на металлическом штампе из Л63 и М1 (в)

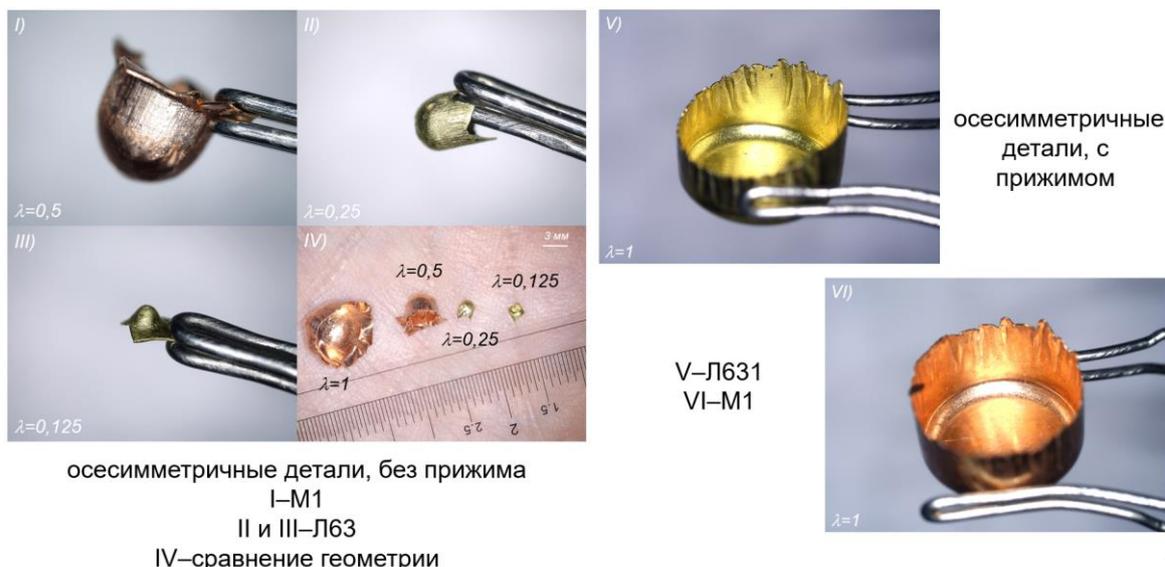


Рисунок 6.5. Примеры полученных микродеталей типа «Стаканчик» из Л63 и М1 на разных размерных уровнях

На рис. 6.6 выполнено изучение поверхности стаканчиков электронным микроскопом ZEM18 (ZerTools, КНР). На поверхности в разных местах различимы микротрещины, образованные дефектами при штамповке, и загрязнения. Очистка загрязнений для микродеталей осложняется поверхностным натяжением жидкостей и капиллярным эффектом. Поэтому в технологии изготовления она должна быть также предусмотрена и изучена. Дальнейшее развитие микротрещин и их раскрытие обуславливается условиями применения деталей и не является проблемой, а зависит в большей степени от требований технического задания на микродеформирование деталей.

В Приложении 5 представлены результаты микровырубки заготовок под последующую микровытяжку. Вырубка алюминиевой заготовки из А5 и меди М1 может быть успешно выполнена для  $\lambda=1$ ; 0,5 и 0,25. Вырубка из латуни Л63 выполняется не в полной мере: заготовка остаётся связанной с отходом небольшой перемычкой.

Микровытяжку можно выполнить на инструменте, полученным методами 3D-печати. Применение смазочных веществ, например, масло с

графитом, существенно не меняет результат микровытяжки. В гораздо большей степени на результат оказывает воздействие коэффициент вытяжки и сила прижима.

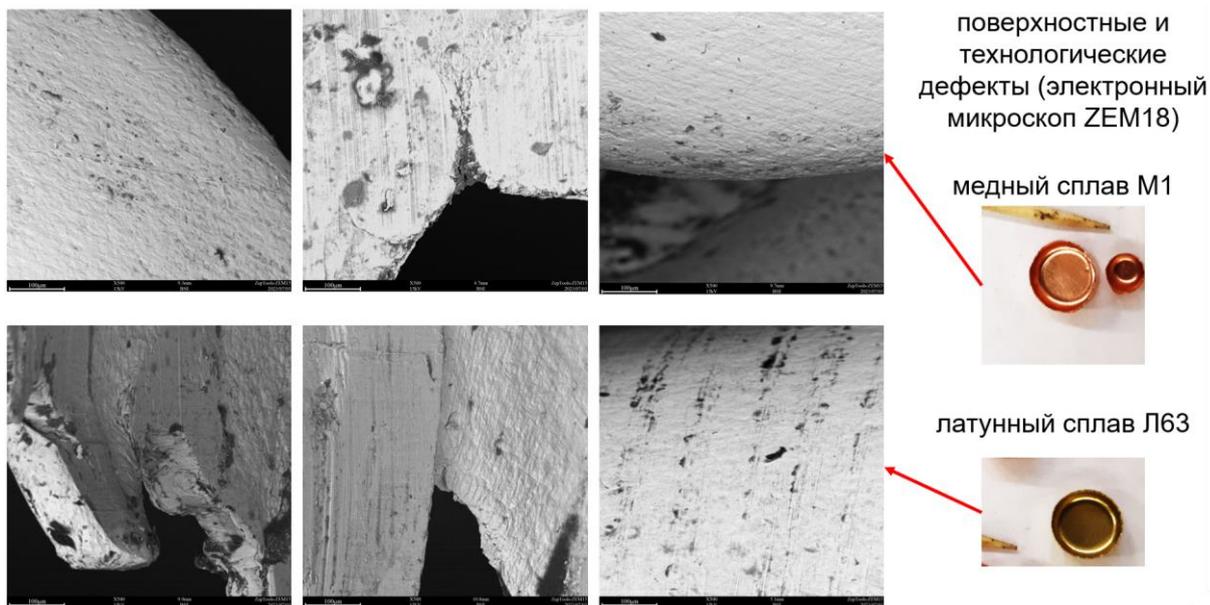


Рисунок 6.6. Качество поверхности после микровытяжки

## 6.2 Микроформовка детали «Пластина»

На рис. 6.7а и 6.7б показаны примеры пластин и стаканчиков (рис. 1в), полученных из разных материалов с разным коэффициентом масштабирования (подобия) исходной геометрии ( $\lambda$ ). Отчётливо видно, что конструкционные материалы ведут себя отлично друг от друга в процессе их деформирования, в зависимости от коэффициента подобия. Для исследования использовались листовые заготовки, толщиной 0,1 мм, из меди М1, латуни Л63, алюминиевого сплава АД1 (сложенная пищевая фольга, толщиной 25 мкм) и алюминия А (ДПРНМ).

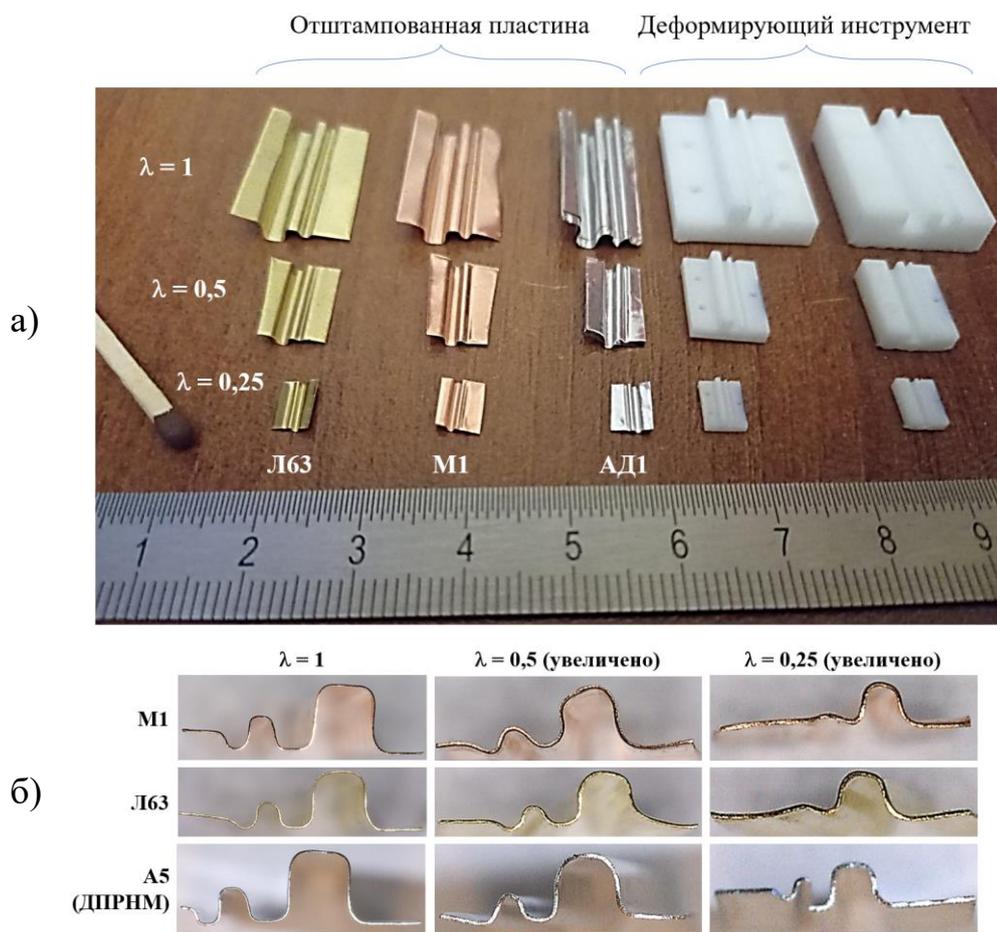


Рисунок 6.7. Примеры отштампованных пластин

## ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1) Исследовано влияние технологических факторов при помощи конечно-элементного моделирования. Зависимости между факторами представлены в виде двухфакторного линейного уравнения регрессии. По классическим формулам выполнены теоретические расчёты процесса вытяжки для рассматриваемых коэффициентов подобия.

2) С помощью инструментов твердотельного моделирования подготовлены модели инструментов для микровырубки и микровытяжки, использованных при численном моделировании процессов микровырубки и микровытяжки, соответственно. Были изготовлены инструменты из металлов и полимеров. Результат изготовления отдельных деталей, подборок и сборок был оценен при помощи бесконтактной системы 3D-сканирования, что позволило противопоставить точность изготовления и сборки потенциальным рискам образования брака в процессе микровытяжки детали. Для улучшения результатов моделирования на основании экспериментов на одноосное растяжение, определены кривые сопротивления деформации (напряжения текучести) и использованы при моделировании, с учётом анизотропии свойств и изменений при переходе от одного коэффициента подобия к другому.

3) На основании математического уравнения введён термин складкообразование, который был использован при определении качества деталей, полученных при помощи виртуального эксперимента микровытяжки. Установлено влияние коэффициента трения на складкообразование и разрушение материала.

4) При помощи численного моделирования и экспериментального исследования установлены контактные давления, действующие на поверхности матрицы при скольжении заготовки по радиусу закругления инструмента. На основе экспериментальных исследований по схеме «стержень на пластине» («pin-on-plate») и при помощи модели износа

Арчарда был определён коэффициент износа для матриц, изготовленных методами 3D-печати, из разных материалов, образующие пары трения в системе «инструмент-заготовка», для условий сухого трения. Геометрия сглаживания входного ребра матрицы оказывает существенное влияние на износ инструмента, а стандартные круговые и эллиптические формы сглаживания позволяют существенно снизить контактное давление и, соответственно, износ инструмента. Полученная информация может быть использована в дальнейшем для развития модели стойкости инструментов для микродеформирования, изготовленных методами 3D-печати.

5) При помощи методики многофакторного планирования эксперимента и на основе виртуальных результатов численного моделирования получено пятифакторное уравнение регрессии, связывающее основные технологические параметры для нахождения целевой функции, максимальной силы деформирования при микровытяжке. К основным технологическим параметрам относятся: геометрические размеры инструмента (радиус скругления матрицы  $R_2$ , зазор между пуансоном и матрицей  $C$ ), технологические параметры процесса (коэффициент трения ( $\mu$ ), коэффициент вытяжки ( $B$ ), сила прижима ( $Q$ ), макс. сила деформирования ( $F_{\text{макс.}}$ ), утонение стенки и складкообразование на стенках стаканчика).

6) Применение инструментов из полимеров для разделительной операции показало, что пуансон с острым углом позволяет получить круглую заготовку из алюминиевого сплава А5. Однако, для материалов М1 и Л63 полного отделения заготовки от отхода не происходит. Применение же металлического инструмента и пуансона с острым ребром позволяет выполнять вырубку заготовок из трёх рассматриваемых материалов.

7) На мехатронном стенде, состоящего из актюатора, датчика силы и перемещения была изготовлена малая серия осесимметричных деталей типа «Стаканчик» и профилированных пластин для разных коэффициентов подобия из Л63, М1 и А5. Установлено, что с уменьшением размеров

формообразование выполняется, но контур получаемых деталей не соответствует контуру инструмента или инструменты теряют устойчивость, изгибаются, вместо вытяжки выполняется операция пробивка.

8) Применение компьютерного моделирования позволило провести исследование по оценке влияния коэффициента подобия ( $\lambda$ ) и технологических факторов на процесс микроштамповки. С целью поиска благоприятных технологических параметров на основании теории подобия процесса было проведено порядка 180 расчётов и построено окно для благоприятного выполнения процесса микроштамповки. Благоприятное сочетание факторов было перенесено в экспериментальную плоскость. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами моделирования.

В завершении следует отметить, что заранее предсказать поведение материалов штамповой оснастки удаётся не всегда, что приводит к её выходу из строя. Примером могут служить некоторые дефекты, полученные до или после выполнения основных экспериментальных работ по получению деталей (Приложение 6). Этот вопрос может быть решён в более детальной проработке методами цифрового инжиниринга, однако, требует времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка износа инструмента для процесса микроштамповки выполняется с применением методов компьютерного моделирования, натуральных экспериментов и метрологической оценки бесконтактным способом. Достоверность технологии определяется рассмотрением взаимодействия наиболее известных технологических параметров, что позволяет, применяя метод планирования эксперимента и теорию подобия, оценить максимальную силу деформирования и построить окно благоприятного протекания процесса микроштамповки.

Полученные результаты работы могут быть использованы при проектировании процессов микровытяжки. Инструменты для разделительных операций (микровырубка) должны иметь острое ребро и быть выполнены из металла, так как полимерные инструменты с острым ребром имеют низкую стойкость (менее 5 деталей). Инструменты для микровытяжки могут быть изготовлены как из металлов, так и из полимеров. Экспериментально получено, что их стойкость составляет не менее 10 деталей, что соответствует мелкой серии.

Разработанная научно-обоснованная методика определения благоприятных параметров микровытяжки может быть применена в учебном процессе, при выполнении лабораторных работ по профилю обработки давлением.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. M. Geiger, M. Kleiner, R. Eckstein, N. Tiesler, U. Engel, *Microforming*, Vol. 50, issue 2, 2001, pp. 445–462. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62991-6
2. Ю.П. Богачев, О.П. Сахарова, *Основы для микропроизводства*, <https://ritm-magazine.com/en/node/1586> (дата обращения: 08.12.2024)
3. A.R. Razali, Y. Qin, A Review on Micro-manufacturing, *Microforming and their Key Issues*, *Procedia Engineering* 53, 2013, 665–672. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.086
4. F. Vollertsen, Z. Hu, H. Schulze Niehoff, C. Theiler, State of the art in micro forming and investigations into micro deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 151, Issue 1–3, 2004, pp. 70–79. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.266
5. Vollertsen, F., Schulze Niehoff, H., & Hu, Z. (2006). State of the art in micro forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(11), 1172–1179. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.01.033
6. Vollertsen, F., & Hu, Z. (2010). Analysis of punch velocity dependent process window in micro deep drawing. *Production Engineering*, 4(6), 553–559. doi:10.1007/s11740-010-0241-6
7. Vollertsen, F. (2011). Effects on the deep drawing diagram in micro forming. *Production Engineering*, 6(1), 11–18. doi:10.1007/s11740-011-0355-5
8. Engel U., Eckstein R. (2002). Microforming – from basic research to its realization. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 125-126, pp. 35–44. DOI: 10.1016/s0924-0136(02)00415-6
9. Geiger, M., Vollertsen, F., & Kals, R. (1996). Fundamentals on the Manufacturing of Sheet Metal Microparts. *CIRP Annals*, 45(1), 277–282. doi:10.1016/s0007-8506(07)63063-7
10. Fu, M. W., & Chan, W. L. (2012). A review on the state-of-the-art microforming technologies. *The International Journal of Advanced*

Manufacturing Technology, 67(9-12), 2411–2437. doi:10.1007/s00170-012-4661-7

11. Eichenhüller, B., Engel, U., & Geiger, M. (2010). Microforming and investigation of parameter interactions. *Production Engineering*, 4(2-3), 135–140.

12. Rosochowski A, Presz W, Olejnik L, Richert M. Micro-extrusion of ultrafine grained aluminium. 2007, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 33(1):137-146. DOI:10.1007/s00170-007-0955-6

13. Gieseke, M., Senz, V., Vehse, M., Fiedler, S., Irsig, R., Hustedt, M., ... Haferkamp, H. (2012). Additive Manufacturing of Drug Delivery Systems. *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*, 57(SI-1 Track-S). DOI:10.1515/bmt-2012-4109

14. Track F. (2014). *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*, 59(Supplement). DOI:10.1515/bmt-2014-5005

15. Z. Jiang, J. Zhao, H. Xie, *Microforming technology: theory, simulation and practice*, Elsevier: Academic Press, 2017, 458 p. ISBN: 978-0-12-811212-0

16. Fu, M. W., & Chan, W. L. (2014). *Micro-scaled Products Development via Microforming*. Springer Series in Advanced Manufacturing, 2014, Springer London Heidelberg New York Dordrecht, p. 183. doi:10.1007/978-1-4471-6326-8

17. Kuhfuss, B. et al. (2020). *Micro Forming Processes*. In: Vollertsen, F., Friedrich, S., Kuhfuß, B., Maaß, P., Thomy, C., Zoch, HW. (eds) *Cold Micro Metal Forming. Lecture Notes in Production Engineering*. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-030-11280-6

18. Tiesler N. Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile, in: M. Geiger, K. Feldmann (eds.), *Reihe Fertigungstechnik Erlangen*. –Meisenbach, Bamberg, Germany, 2002. – vol. 120.

19. Wang, G., Li, Y., Liu, S., Yang, J., & Yang, M. (2017). Micro deep drawing of T2 copper foil using proportional decreased tools. *The International*

Journal of Advanced Manufacturing Technology, 95(1-4), 277–285.  
doi:10.1007/s00170-017-1111-6

20. Hall, E. O. (1951). The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results. Proceedings of the Physical Society. Section B, 64(9), 747–753. doi:10.1088/0370-1301/64/9/303

21. Petch, N.J. The cleavage strength of polycrystals. J. Iron Steel Inst. 1953, 174, 25–28

22. Hansen, N. (2004). Hall–Petch relation and boundary strengthening. Scripta Materialia, 51(8), 801–806. doi:10.1016/j.scriptamat.2004.06.002

23. W.L. Chan, M.W. Fu, J. Lu, J.G. Liu, Modeling of grain size effect on micro deformation behavior in micro-forming of pure copper, Materials Science and Engineering A, Vol. 527(24–25), 2010, pp. 6638–6648.

24. A. Molotnikov, R. Lapovok, C.F. Gu, C.H.J. Davies, Y. Estrin, Size effects in micro cup drawing, Materials Science and Engineering A, Vol. 550, 2012, pp. 312–319. DOI: 10.1016/j.msea.2012.04.079

25. L.V. Raulea, A.M. Goijaets, L.E. Govaert, F.P.T. Baaijens, Size effects in the Processing of Thin Metal Sheets, in: proceedings of the 7th international conference Sheet metal 1999, Friedrich-Alexander University, Erlangen-Nuremberg, Germany, 27–28 September, Bamberg: Meisenbach, 1999, pp. 521–528.

26. F. Vollertsen, D. Biermann, H.N. Hansen, I.S. Jawahir, K. Kuzman, Size effects in manufacturing of metallic components, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 58, 2009, pp. 566–587. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.09.002

27. B. Meng, W.H. Wang, Y.Y. Zhang, M. Wan, Size effect on plastic anisotropy in microscale deformation of metal foil, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 271, 2019, Pages 46-61. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.03.023.

28. Deng, J. H., Fu, M. W., & Chan, W. L. (2011). Size effect on material surface deformation behavior in micro-forming process. *Materials Science and Engineering: A*, 528(13-14), 4799–4806. DOI: 10.1016/j.msea.2011.03.005
29. Wang, C., Guo, B., & Shan, D. (2014). Friction related size-effect in microforming – a review. *Manufacturing Review*, 1, 23. doi:10.1051/mfreview/2014022
30. Messner, A., Engel, U., Kals, R., & Vollertsen, F. (1994). Size effect in the FE-simulation of micro-forming processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 45(1-4), 371–376. doi:10.1016/0924-0136(94)90368-9
31. Tiesler N. Microforming – size effects in friction and their influence on extrusion processes / N. Tiesler // *Wire*. – 2002. – vol. 52. – pp. 34–38.
32. Guo, B., Gong, F., Wang, C., & Shan, D. (2010). Size effect on friction in scaled down strip drawing. *Journal of Materials Science*, 45(15), 4067–4072. doi:10.1007/s10853-010-4492-6
33. Siopis, M. S., & Kinsey, B. L. (2010). Experimental Investigation of Grain and Specimen Size Effects During Electrical-Assisted Forming. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132(2), 021004. doi:10.1115/1.4001039
34. Shan, D., Wang, C., Guo, B., Wang, X. (2009). Effect of thickness and grain size on material behavior in micro-bending. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19, s507–s510. doi:10.1016/s1003-6326(10)60098-2
35. Wang CJ, Shan DB, Zhou J, Guo B, Sun LN. Size effects of the cavity dimension on the microforming ability during coining process. 2007, *Journal of Materials Processing Technology* 187(2):256-259. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2006.11.055
36. Liu JG, Fu MW, Lu J, Chan WL. Influence of size effect on the springback of sheet metal foils in micro-bending. 2011, *Comput Mater Sci* 50(9):2604–2614. *Computational Materials Science* 50(9):2604-2614. DOI:10.1016/j.commatsci.2011.04.002

37. Chan, W. L., Fu, M. W., & Lu, J. (2011). The size effect on micro deformation behaviour in micro-scale plastic deformation. *Materials & Design*, 32(1), 198–206. doi:10.1016/j.matdes.2010.06.011
38. C. Barbier, S. Thibaud, F. Richard, P. Picart. Size effects on material behavior in microforming. 2009, *International Journal of Material Forming* 1(S1):439-442. DOI:10.1007/s12289-008-0089-x
39. Е.А. Попов, Основы теории листовой штамповки, М.: Машиностроение, 1968, с. 283.
40. Справочник по технологии патронного производства (в 2-х томах), под ред. Н.П. Агеева, В.И. Зиновкина, Н.М. Масляева, т. 1, СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2011, с. 643.
41. В.Г. Ковалев, А.А. Ковалев, Л.А. Тищенко, Технологическое обеспечение качества деталей при листовой штамповке, М.: Спектр, 2017, с. 45
42. В.П. Романовский, Справочник по холодной штамповке, Ленинград: Машиностроение, 1979, с. 520.
43. В.Г. Бурдуковский, Технология листовой штамповки, Екатеринбург: Уральский университет, 2019, с. 224.
44. *Metal Forming Handbook*, SCHULER GmbH, Springer Berlin, Heidelberg, 1998. DOI: 10.1007/978-3-642-58857-0
45. Lange, K., ed., *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill, New York, 1985.
46. А. Ю. Аверкиев, Д. И. Бережковский, Ю. С. Вильчинский. Ковка и штамповка. 1985, Москва машиностроение, 567с.
47. E. Billur, *Fundamentals and Applications of Hot Stamping Technology for Producing Crash Relevant Automotive Parts*, PhD-thesis, Ohio State University, p. 258, 2013.
48. Z. Marciniak, J. L. Duncan, and S. J. Hu, *Mechanics of sheet metal forming*, 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1992.

49. Woo, D. M. (1968). On the complete solution of the deep-drawing problem. *International Journal of Mechanical Sciences*, 10(2), 83–94. DOI: 10.1016/0020-7403(68)90065-9
50. El-Sebaie, M. G., & Mellor, P. B. (1972). Plastic instability conditions in the deep-drawing of a circular blank of sheet metal. *International Journal of Mechanical Sciences*, 14(9), 535–540. DOI: 10.1016/0020-7403(72)90055-0
51. Al-Makky, M. M., & Woo, D. M. (1980). Deep-drawing through tractrix type dies. *International Journal of Mechanical Sciences*, 22(8), 467–480. DOI: 10.1016/0020-7403(80)90002-8
52. Korhonen, A. S. (1982). Drawing Force in Deep Drawing of Cylindrical Cup With Flat-Nosed Punch. *Journal of Engineering for Industry*, 104(1), 29. DOI: 10.1115/1.3185794
53. Kleemola, H., & Kumpulainen, J. (1980). A calculation method for determining the limit of flange wrinkling in the deep-drawing of cylindrical steel shells without blankholding. *Metallurgical Transactions A*, 11(10), 1701–1710. DOI: 10.1007/bf02660525
54. Kawai, N. (1961). Critical Conditions of Wrinkling in Deep Drawing of Sheet Metals : 3rd Report, Prediction of Critical Blank-Holding Pressure. *Bulletin of JSME*, 4(13), 182–192. DOI: 10.1299/jsme1958.4.182
55. N. Rebelo, J.C. Nagtegaal, H.D. Hibbit, Finite element analysis of sheet forming processes, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 30 (1990) 1739–1758. DOI: 10.1002/nme.1620300824
56. Lin B.T., Yang C.Y. Applying a punch with microridges in multistage deep drawing processes, SpringerPlus. 2016. Vol. 5. DOI 10.1186/s40064-016-3371-2
57. C.H. Pham, S. Thuillier, P.Y. Manach, Experimental and numerical investigation of the formability of an ultra-thin copper sheet, *IOP Conference Series: Journal of Physics*, Vol. 896, 2017, 012109. DOI: 10.1088/1742-6596/896/1/012109

58. H. Zein, M. El-Sherbiny, M. Abd-Rabou, M. El Shazly, Effect of Die Design Parameters on Thinning of Sheet Metal in the Deep Drawing Process, American Journal of Mechanical Engineering, Vol. 1, No. 2, 2013, pp. 20–29. DOI: 10.12691/ajme-1-2-1
59. Diehl A, Engel U, Geiger M. Influence of microstructure on the mechanical properties and the forming behaviour of very thin metal foils. 2010, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 47(1):53-61. DOI:10.1007/s00170-008-1851-4
60. Brabie, G., Nanu, N., & Jitaru, A. (2013). Influence of the Thickness Value on the Mechanical and Formability Properties of the CuZn37 Thin Sheet Metal. Applied Mechanics and Materials, 371, 163–167. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.371.163
61. А.В. Третьяков, В.И. Зюзин, Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: Справочник, М.: Металлургия, 1973 с. 224.
62. Smith W.F., Hashemi J. Foundations of Materials Science and Engineering, 7th Edition. — McGraw-Hill, 2023. — 1137 p. — ISBN 978-1260597709.
63. Stebunov S., Vlasov A., Biba N. Prediction of the fracture in cold forging with modified Cockcroft-Latham criterion // Procedia Manufacturing, 2018. No 15. P. 519–526. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.07.264
64. Advance High Strength Steel Application Guidelines, <https://ahssinsights.org/> (дата обращения: 08.12.2024).
65. Sato, T., & Besshi, T. (1998). Anti-galling evaluation in aluminum sheet forming. Journal of Materials Processing Technology, 83(1-3), 185–191. doi:10.1016/s0924-0136(98)00061-2
66. Nilsson, A., Gabrielson, P., & Ståhl, J.-E. (2002). Zinc-alloys as tool materials in short-run sheet-metal forming processes. Journal of Materials Processing Technology, 125-126, 806–813. doi:10.1016/s0924-0136(02)00396-5

67. Ю. Н. Логинов, Медь и деформируемые медные сплавы, ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. 136 с.
68. Leera Raju , Somashekhar S Hiremath . A state-of-the-art review on micro electro-discharge machining. *Procedia Technology* 25 (2016) 1281 – 1288. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.08.222
69. Yan, M.-T., Huang, C.-W., Fang, C.-C., & Chang, C.-X. (2004). Development of a prototype Micro-Wire-EDM machine. *Journal of Materials Processing Technology*, 149(1-3), 99–105. doi:10.1016/j.jmatprotec.2003.10.057
70. Maity, K. P., & Singh, R. K. (2012). An optimisation of micro-EDM operation for fabrication of micro-hole. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(9-12), 1221–1229. doi:10.1007/s00170-012-4098-z
71. Han, F., Chen, L., Yu, D., & Zhou, X. (2006). Basic study on pulse generator for micro-EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(5-6), 474–479. doi:10.1007/s00170-006-0483-9
72. Hasan, M., Zhao, J., & Jiang, Z. (2017). A review of modern advancements in micro drilling techniques. *Journal of Manufacturing Processes*, 29, 343–375. doi:10.1016/j.jmapro.2017.08.006
73. Fu, L., & Guo, Q. (2010). Development of an ultra-small micro drill bit for packaging substrates. *Circuit World*, 36(3), 23–27. doi:10.1108/03056121011066305
74. Sugawara, A., & Inagaki, K. (1982). Effect of workpiece structure on burr formation in micro-drilling. *Precision Engineering*, 4(1), 9–14. doi:10.1016/0141-6359(82)90107-6
75. Iwata, K., Moriwaki, T., & Hoshi, T. (1981). Basic Study of High Speed Micro Deep Drilling. *CIRP Annals*, 30(1), 27–30. doi:10.1016/s0007-8506(07)60889-0
76. L. Tunna, W. O'Neill, A. Khan, C. Sutcliffe. Analysis of laser micro drilled holes through aluminium for micro-manufacturing applications. *Optics*

and Lasers in Engineering 43 (2005) 937–950.  
DOI:10.1016/j.optlaseng.2004.11.001

77. Chang, J. J., & Warner, B. E. (1996). Laser-plasma interaction during visible-laser ablation of methods. *Applied Physics Letters*, 69(4), 473–475.  
doi:10.1063/1.118144

78. Zhou, B. H., & Mahdavian, S. . (2004). Experimental and theoretical analyses of cutting nonmetallic materials by low power CO<sub>2</sub>-laser. *Journal of Materials Processing Technology*, 146(2), 188–192.  
doi:10.1016/j.jmatprotec.2003.10.017

79. Chern, G.-L., Wu, Y.-J. E., & Liu, S.-F. (2006). Development of a micro-punching machine and study on the influence of vibration machining in micro-EDM. *Journal of Materials Processing Technology*, 180(1-3), 102–109.  
doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.05.010

80. Y. Qin, Y. Ma, C.S. Harrison, A. Brockett, M. Zhou, J. Zhao, F. Law, A. Razali, R. Smith, J. Eguia, (2008), Development of a new machine system for the forming of micro sheet product, *International Journal of Materials Forming Suppl 1*:475-478. DOI:10.1007/s12289-008-0098-9

81. Joo, B.-Y., Rhim, S.-H., & Oh, S.-I. (2005). Micro-hole fabrication by mechanical punching process. *Journal of Materials Processing Technology*, 170(3), 593–601. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.06.038

82. Chern, G.-L., & Chuang, Y. (2006). Study on vibration-EDM and mass punching of micro-holes. *Journal of Materials Processing Technology*, 180(1-3), 151–160. doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.03.238

83. Bauer J., Malone P., Cost Estimating Challenges in Additive Manufacturing, 2015 Workshop Proceedings, International Cost Estimating and Analysis Association, 2015, <https://www.iceaaonline.com/wpcontent/uploads/2015/06/MM01-Paper-Bauer-Additive-Manufacturing.pdf> (дата обращения: 08.12.2024)

84. S. Malbašić, B. Nedić, A. Đorđević, S. Živković, The role of Evaluation of Cost quality in additive manufacturing, *Journal of Engineering*,

Management and Information Technology, Vol. 1, No. 1, 2023, pp. 11-18. DOI: 10.61552/JEMIT.2023.01.002

85. Rickenbacher, L., Spierings, A., & Wegener, K., An integrated cost-model for selective laser melting (SLM), *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 19, Issue 3, 2013, pp. 208–214. DOI:10.1108/13552541311312201

86. Rima sauskas, M.; Rima sauskiene, R. Development of Decision Support System for Fused Deposition Modelling Manufacturing Cost Estimation. *Mechanika* 2012, 18 (5), 600–604. DOI: 10.5755/j01.mech.18.5.2705

87. Teitelbaum, G. A., Schmidt, L. C., & Goer, Y. (2009). Examining Potential Design Guidelines for Use in Fused Deposition Modeling to Reduce Build Time and Material Volume. Volume 8: 14th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference; 6th Symposium on International Design and Design Education; 21st International Conference on Design Theory and Methodology, Parts A and B. doi:10.1115/detc2009-87491

88. Mostafa, N., Syed, H. M., Igor, S., & Andrew, G. (2009). A study of melt flow analysis of an ABS-Iron composite in fused deposition modelling process. *Tsinghua Science and Technology*, 14(S1), 29–37. doi:10.1016/s1007-0214(09)70063-x

89. Kruth, J.P., Mercelis, P., Froyen, L., Rombouts, M., 2005. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal* 11 (1), 26–36. DOI:10.1108/13552540510573365

90. Kruth, J. P., Wang, X., Laoui, T., & Froyen, L. (2003). Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Automation*, 23(4), 357–371. doi:10.1108/01445150310698652

91. Klocke, F & Wirtz, H. (1998). Selective Laser Sintering of Zirconium Silicate. *Proc. of the 9th Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 605–612.

92. K.P. Mcalea, DTM's selective laser sintering technology: new products, new benefits, new manufacturing horizons, in: *Proceedings 8th International Conference on Rapid Prototyping*, Tokyo, Japan, 2000, pp. 347–352.

93. М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. Аддитивные технологии в машиностроении. пособие для инженеров.– М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с.
94. Валетов В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы). Учебное пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2015, – 63с.
95. Yasa, E., Deckers, J., & Kruth, J. (2011). The investigation of the influence of laser re-melting on density, surface quality and microstructure of selective laser melting parts. *Rapid Prototyping Journal*, 17(5), 312–327. doi:10.1108/13552541111156450
96. Mangano, F. G., Caprioglio, A., Levrini, L., Farronato, D., Zecca, P. A., & Mangano, C. (2015). Immediate Loading of Mandibular Overdentures Supported by One-Piece, Direct Metal Laser Sintering Mini-Implants: A Short-Term Prospective Clinical Study. *Journal of Periodontology*, 86(2), 192–200. doi:10.1902/jop.2014.140343
97. Mangano, F.G., Franco, M.D., Caprioglio, A., et al., 2014. Immediate, non-submerged, root-analogue direct laser metal sintering (DLMS) implants: A 1-year prospective study on 15 patients. *Lasers in Medical Science* 29, 1321–1328. DOI:10.1007/s10103-013-1299-0
98. Dobransky, J., Baron, P., Simkulet, V., et al., 2015. Examination of material manufactured by direct metal laser sintering (DMLS). *Metallurgija*, 54 (2015) 3, 477-480
99. Bineli, A.R.R., Peres, A.P.G., Jardini, A.L., Filho, R.M., 2011. Direct metal laser sintering (DMLS): Technology for design and construction of microreactors. In: *Proceedings of 6th Brazilian Conference on Manufacturing Engineering*, April 11th to 15th, Caxias do Sul-RS-Brazil.
100. Han, W., Jafari, M. A., & Seyed, K. (2003). Process speeding up via deposition planning in fused deposition-based layered manufacturing processes. *Rapid Prototyping Journal*, 9(4), 212–218. doi:10.1108/13552540310489596

101. Galantucci, L. M., Lavecchia, F., & Percoco, G. (2008). Study of compression properties of topologically optimized FDM made structured parts. *CIRP Annals*, 57(1), 243–246. doi:10.1016/j.cirp.2008.03.009
102. Shimizu, T., Yang, M., & Manabe, K. (2012). Impact of Surface Topography of Tools and Materials in Micro-Sheet Metal Forming. *Metal Forming - Process, Tools, Design*. doi:10.5772/48296
103. ZhengXu, J., Wang, X., Wang, C., Yuan, L., Chen, W., Bao, J., ... Guo, B. (2020). A Review on Micro/Nanofforming to Fabricate 3D Metallic Structures. *Advanced Materials*, 33(6), 2000893. doi:10.1002/adma.202000893
104. Петров М.А., Эльдиб И.С.А., Азатьян Э.М., Оптическое 3D-сканирование и оценка точности изготовления деталей и прототипов, *Известия ТулГУ. Серия: Технические науки*, 2019, №12, стр. 151 – 158.
105. Петров М.А., Применение технологий 3D-сканирования в заготовительной и машиностроительной практике, *РИТМ машиностроения*, №4 (май), 2020, стр. 32 – 41.
106. <https://neopoint.rangevision.com/> (дата обращения: 08.12.2024)
107. R. Sridhar, S. Inbarasan, R. Ramkumar, S.C. Shankar, Review on micro deep drawing process for thin foil materials. 2018. Volume 11, pp 2319–1058. DOI: 10.21172/ijiet.113.03
108. Документация на программное обеспечение Abaqus 2016, <http://130.149.89.49:2080/v2016/index.html> (дата обращения: 08.12.2024)
109. Прохоров А., Лысачёв М., Боровков А. Цифровой двойник, М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с.
110. S. Geißdörfer, U. Engel, M. Geiger, FE-simulation of microforming processes applying a mesoscopic model, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 46, issue 11, 2006, pp. 1222–1226. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.01.019
111. Z. Hu, Realization and application of size dependent FEM-simulation for deep drawing of rectangular work pieces, *CIRP Journal of*

Manufacturing Science and Technology, Vol. 4, 2011, pp. 90–95. DOI: 10.1016/J.CIRPJ.2011.05.006

112. M.W. Fu, B. Yang, W.L. Chan, Experimental and simulation studies of micro blanking and deep drawing compound process using copper sheet, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 213(1), 2013, pp. 101–110. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.08.007

113. Реброва И.А., Планирование эксперимента: учебное пособие. – Омск: СибАДИ, 2010. –105 с.

114. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В., Методы оптимизации эксперимента в химической технологии, 1985. –327 с.

115. Налимов В.В., Чернова Н.А., Статистические методы планирования экстремальных экспериментов, 1965. –340 с.

116. Mathews P.G., Design of Experiments with Minitab, ASQ Quality Press, 2005. –499 p.

117. Jiju A., Design of Experiments for Engineers and Scientists, 2nd edition, Elsevier Science & Technology Books, 2014. –220 p.

118. Bauer D., Leidolf R. (1995). Design of experiments, a statistical method to analyse sheet metal forming defects effectively. Materials Processing Defects, pp. 187–201. DOI: 10.1016/s0922-5382(05)80013-3

119. Modi B., Kumar, D.R. (2019). Optimization of process parameters to enhance formability of AA5182 alloy in deep drawing of square cups by hydroforming. Journal of Mechanical Science and Technology, 33(11), pp. 5337–5346. DOI: 10.1007/s12206-019-1026-2

120. Oh K.S., Oh K.H., Jang J.H., Kim D.J., Han K.S. (2011). Design and analysis of new test method for evaluation of sheet metal formability. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 211(4), 695–707. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2010.12.004

121. Sarema B.,Matope S., Sterzing A. (2022). Design of experiments procedure for evaluating the formability of sheet metals components in forming processes. Proceedings of the 33rd Annual Southern African Institute for

Industrial Engineering Conference (SAIIE), 3-5 October 2022, KwaZulu-Natal, South Africa, pp. 73–84. DOI: 10.52202/066390-0004

122. Z. Hu, R. Walter, F. Vollertsen, Forming tools for micro deep drawing –Influence of geometrical tolerance of forming tools on the punch force in micro deep drawing, *wt Werkstattstechnik online*, H 11/12, 2009, pp. 814–819.

123. G. Behrens, F. Vollertsen, Influence of Tool Geometry Variation on the Punch Force in Micro Deep Drawing, *Key Engineering Materials*, Vols. 554–557, 2013, pp. 1306–1311. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.1306

124. G. Behrens, F.O. Trier, H. Tetzl, F. Vollertsen, Influence of tool geometry variations on the limiting drawing ratio in micro deep drawing, *International Journal of Material Forming*, Vol. 9(2), 2015, pp. 253–258. DOI: 10.1007/s12289-015-1228-9

125. Ike, H. (2003). Surface deformation vs. bulk plastic deformation—a key for microscopic control of surfaces in metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 138(1-3), 250–255. doi:10.1016/s0924-0136(03)00080-3

126. Weidel, S., & Engel, U. (2009). Characterisation of the flattening behaviour of modelled asperities. *Wear*, 266(5-6), 596–599. doi:10.1016/j.wear.2008.04.063

127. Tetsuhide Shimizu, Yushiro Murashige, Kuniyoshi Ito, Ken Ichi Manabe. Influence of surface topographical interaction between tool and material in micro-deep drawing. (2009), *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering* 3(2):pp 397-408. DOI: 10.1299/jmmp.3.397

128. P. Carlsson, *Surface Engineering in sheet metal forming*, PhD Thesis, Uppsala University, Uppsala, 2005.

129. Леванов А.Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А.Н. Леванов, В.Л. Колмогоров, С.П. Буркин, Б.Р. Картак, Ю.В. Ашпур, Ю.И. Спасский. – Москва: Металлургия, 1975. – 352 с.

130. Vollertsen, F., & Hu, Z. (2006). Tribological Size Effects in Sheet Metal Forming Measured by a Strip Drawing Test. *CIRP Annals*, 55(1), 291–294. DOI: 10.1016/s0007-8506(07)60419-3
131. Engel, U. (2006). Tribology in microforming. *Wear*, 260(3), 265–273. DOI: 10.1016/j.wear.2005.04.021
132. Zhang, S., Hodgson, P. D., Cardew-Hall, M. J., & Kalyanasundaram, S. (2003). A finite element simulation of micro-mechanical frictional behaviour in metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 134(1), 81–91. DOI: 10.1016/s0924-0136(02)00926-3
133. Olsson, D. D., Bay, N., & Andreasen, J. L. (2004). Prediction of limits of lubrication in strip reduction testing. *CIRP Annals*, 53(1), 231–234. DOI: 10.1016/s0007-8506(07)60686-6
134. Becker, P., Jeon, H. J., Chang, C. C., & Bramley, A. N. (2003). A Geometric Approach to Modelling Friction In Metal Forming. *CIRP Annals*, 52(1), 209–212. DOI: 10.1016/s0007-8506(07)60567-8
135. Petrov, M. A., Petrov, A. N., & Petrov, P. A. (2016). Numerical Investigation of the Material Behaviour during Compression Tests for Samples with Rough Surfaces Represented in Different Geometry Scale Factors. *Key Engineering Materials*, 716, 736–752. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.716.736
136. Baek S.W. Lubrication for micro forming of ultra thin metal foil / S.W. Baek, S.I. Oh, S.H. Rhim // *CIRP Ann Manuf Technol.* – 2006. – vol. 55. – is. 1. – pp 295–298. doi: 10.1016/S0007-8506(07)60420-X
137. Dixit, U. S., Yadav, V., Ganesh Narayanan, R., & Bhardwaj, N. (2018). Friction in micromanufacturing. *Journal of Micromanufacturing*, 1(1), 76–91. doi:10.1177/2516598418766918
138. Peng, L., Lai, X., Lee, H.-J., Song, J.-H., & Ni, J. (2010). Friction behavior modeling and analysis in micro/meso scale metal forming process. *Materials & Design*, 31(4), 1953–1961. doi:10.1016/j.matdes.2009.10.040

139. Link P., Penter L., Rückert U., Klingel L., Verl A., Ihlenfeldt S. (2025). Real-time quality prediction and local adjustment of friction with digital twin in sheet metal forming. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 91. DOI: 10.1016/j.rcim.2024.102848
140. Reid, J. V., & Schey, J. A. (1987). The effect of surface hardness on friction. *Wear*, 118(1), 113–125. doi:10.1016/0043-1648(87)90008-1
141. Gore, G. J., & Gates, J. D. (1997). Effect of hardness on three very different forms of wear. *Wear*, 203-204, 544–563. doi:10.1016/s0043-1648(96)07414-5
142. Z. Hu, Analyse des tribologischen Größeneffekts beim Blechumformen, Dissertation, Strahltechnik Band 37, BIAS-Verlag, ISBN 978-3-933762-30-6, (2009).
143. E. Rabinowicz, *Friction and Wear of Materials*. New Yorks: John Wiley and Sons, 1965.
144. Alinger, M. J., & Van Tyne, C. J. (2001). Evolution of the tribological characteristics of several forming die materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 111(1-3), 20–24. doi:10.1016/s0924-0136(01)00512-x
145. Sanchez, L. . (1999). Characterisation of a measurement system for reproducible friction testing on sheet metal under plane strain. *Tribology International*, 32(10), 575–586. doi:10.1016/s0301-679x(99)00098-5
146. F. Gong, B. Guo, C.J. Wang, D.B. Shan, Effects of lubrication conditions on micro deep drawing, *Microsystem Technologies* 16(10):1741-1747. DOI:10.1007/s00542-010-1108-7
147. Wang, C., Guo, B., Shan, D., & Bai, X. (2013). Tribological behaviors of DLC film deposited on female die used in strip drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(3), 323–329. doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.10.011
148. Wang, C., Shan, D., Guo, B., Xu, J., & Zhang, H. (2013). Effect of nano-crystals at surfaces induced by ion beam irradiation on the tribological

behaviour in microforming. *Vacuum*, 89, 267–270.  
doi:10.1016/j.vacuum.2012.07.007

149. Wang, C., Wang, C., Guo, B., & Shan, D. (2014). Effects of tribological behavior of DLC film on micro-deep drawing processes. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(9), 2877–2882. doi:10.1016/s1003-6326(14)63421-x

150. F. Gong, B. Guo, C.J. Wang, D.B. Shan, Micro deep drawing of micro cups by using DLC film coated blank holders and dies, *Diamond and Related Materials* 20 (2011) 196–200. DOI:10.1016/j.diamond.2010.11.025

151. Wang, C., Guo, B., Shan, D., & Bai, X. (2012). Experimental research on micro-deep drawing processes of pure gold thin sheet using DLC-coated female die. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(9-12), 2477–2487. DOI:10.1007/s00170-012-4665-3

152. Hu, Z., Schubnov, A., & Vollertsen, F. (2012). Tribological behaviour of DLC-films and their application in micro deep drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(3), 647–652. doi:10.1016/j.jmatprotec.2011.10.012

153. Archard, J. F. (1953). Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24(8), 981–988. DOI: 10.1063/1.1721448

154. Hoffmann, H., Nürnberg, G., Ersoy-Nürnberg, K., & Herrmann, G. (2007). A new approach to determine the wear coefficient for wear prediction of sheet metal forming tools. *Production Engineering*, 1(4), 357–363. DOI: 10.1007/s11740-007-0065-1

155. Ersoy-Nürnberg, K., Nürnberg, G., Golle, M., & Hoffmann, H. (2008). Simulation of wear on sheet metal forming tools—An energy approach. *Wear*, 265(11-12), 1801–1807. DOI: 10.1016/j.wear.2008.04.039

156. Pereira, M. P., Yan, W., & Rolfe, B. F. (2008). Contact pressure evolution and its relation to wear in sheet metal forming. *Wear*, 265(11-12), 1687–1699. DOI: 10.1016/j.wear.2008.04.042

157. Wang, X. Z., & Masood, S. H. (2010). A Study on Tool Wear of Sheet Metal Stamping Die Using Numerical Method. *Materials Science Forum*, 654-656, 346–349. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.654-656.346
158. А.Н. Петров, П.А. Петров, М.А. Петров, Теория обработки металлов давлением: штампы, износ и смазочные материалы, 2-е изд., испр. и доп. (для ВПО и СПО), учебное пособие, М.: Юрайт, 2020, 130 с.
159. Bose, K. K., & Penchaliah, R. (2019). 3D FEM Wear Prediction of Brass Sliding against Bearing Steel Using Constant Contact Pressure Approximation Technique. *Tribology Online*, 14(4), 194–207. DOI: 10.2474/trol.14.194
160. Руководство пользователя Tribometer CSM, Version: R0.1.3a, CSM Instruments SA, 2012.
161. Sobis T. A theoretical study of wear simulation in metal forming processes / T. Sobis, U. Engel, M. Geiger // *J. Mater. Process Tech.* – 1992. – vol. 34. – pp. 233–240. doi: 10.1016/0924-0136(92)90112-6
162. R.G. Bayer, A general model for sliding wear in electrical contacts, *Wear* 162–164 (1993) 913–918. DOI: 10.1016/0043-1648(93)90094-3
163. M.P. Pereira, W. Yan, B.F. Rolfe. Sliding distance, contact pressure and wear in sheet metal stamping, Volume 268, Issues 11–12, 12 May 2010, Pages 1275-1284. DOI: 10.1016/j.wear.2010.01.020
164. D. Hortig, D. Schmoeckel, Analysis of local loads on the draw die profile with regard to wear using the FEM and experimental investigations, *Journal of Materials Processing Technology* 115 (2001) 153–158. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00757-9
165. M. Eriksen, The influence of die geometry on tool wear in deep drawing, *Wear* 207 (1997) 10–15. DOI: 10.1016/S0043-1648(96)07461-3
166. R. G. Bayer, *Mechanical wear Fundamentals and testing*. New York: Marcel Dekker, 2004.

167. Shahani, A. R., & Salehinia, I. (2008). Analysis of wear in deep-drawing process of a cylindrical cup. *Journal of Materials Processing Technology*, 200(1-3), 451–459. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.08.076
168. Z. Hu, S. Huferath-von Luepke, C. von Kopylow, F. Vollertsen: Characteristic of wear behavior of micro deep drawing tools, *Proceedings of International Conference on Advance in Materials and Processing Technologies (AMPT 2010)*, eds.: F. Chinesta, Y. Chastel, M. El Mansori. AIP Melville New York, ISBN: 978-0-7354-0871-5, (2011), 335-340. DOI: 10.1063/1.3552464
169. H. Flosky, F. Vollertsen. Wear behaviour in a combined micro blanking and deep drawing process. *CIRP Annals Volume 63, Issue 1, 2014, Pages 281-284.*
170. M. A. Masen, *Abrasive tool wear in metal forming processes*, PhD Thesis, University of Twente, Enschede, 2004.
171. Blau, P. J., & Budinski, K. G. (1999). Development and use of ASTM standards for wear testing. *Wear*, 225-229, 1159–1170. doi:10.1016/s0043-1648(99)00045-9
172. *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM G99-05*. West Conshohocken: ASTM International, 2010.
173. E. Billur, Continuing the look at die materials and wear in stamping AHSS Part II: Tests for evaluating galling, wear of tool materials and coatings, *Stamping Journal*, vol. 14, pp. 10-11, 2010, <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/metalsmaterials/continuing-the-look-at-die-materials-and-wear-in-stamping-ahss> (дата обращения: 08.12.2024)
174. C. Boher, D. Attaf, L. Penazzi, and C. Levailant, Wear behaviour on the radius portion of a die in deep-drawing: Identification, localisation and evolution of the surface damage, *Wear*, vol. 259, pp. 1097-1108, 2005.
175. Gåård, A., Krakhmalev, P., & Bergström, J. (2008). Wear mechanisms in deep drawing of carbon steel – correlation to laboratory testing. *Tribotest*, 14(1), 1–9. doi:10.1002/tt.49

176. Cora, Ö. N., Namiki, K., & Koç, M. (2009). Wear performance assessment of alternative stamping die materials utilizing a novel test system. *Wear*, 267(5-8), 1123–1129. doi:10.1016/j.wear.2008.12.111
177. F. Gong, B. Guo, Size Effects on Mechanical Properties of Copper Thin Sheet in Uniaxial Tensile Tests, *MATERIALS SCIENCE (MEDŽIAGOTYRA)*. Vol. 20, No. 4. 2014, pp. 509-512.
178. Han, P., Yuan, G., Zhu, X. et al. Grain size effect of pure Ti foils by micro blanking-deep-drawing compound process. *Int J Adv Manuf Technol* 123, 1799–1810 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10279-z>
179. Yamaguchi, Ryo & Bai, Yang & Shimizu, Tetsuhide & Yang, Ming. (2015). Effect of ultrasonic vibration on stress relaxation in micro-compression test with step motion. *Mechanical Engineering Journal*, 2015, Vol. 2. DOI: 10.1299/mej.14-00410.
180. [www.bruderer.com](http://www.bruderer.com) (дата обращения: 08.12.2024)
181. Patil, D. and Narayanasamy, R. (2024) ‘Micro-forming process for miniaturized industrial products: influencing factors, progress and challenges’, *International Journal of Metallic Materials*, pp. 1–10. doi: 10.1080/2996136X.2024.2408474.
182. <https://3dradar.ru/post/45940/> (дата обращения: 08.12.2024)
183. <https://blog.iqb.ru/sla-dlp-lcd/> (дата обращения: 08.12.2024)
184. Аверкиев А.Ю., Аверкиев Ю.А., Белов Е.А. и др., Ковка и штамповка: Справочник, Том 4: Листовая штамповка, ред. Матвеев А.Д., Семёнов Е.И., М.: Машиностроение, 1985, с. 544
185. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности, под ред. Боровкова А.И., СПб: Политех-Пресс, 2022, стр. 492.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1. Публикации по теме диссертации

#### В рецензируемых научных изданиях по шифру научной специальности.

1. **Чан Д.Х.**, Петров М.А., Влияние геометрических размеров инструмента на склонность к складкообразованию стенок стаканчика из меди в процессе мезо- и микровытяжки с помощью конечно-элементного моделирования, Заготовительные производства в машиностроении, №12, 2023, стр. 549 – 557 (**ВАК**).

2. Петров М.А., **Чан Д.Х.**, Оценка степени влияния геометрии радиуса скругления матрицы на процесс микровытяжки с применением КЭ-моделирования, Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением, №10, 2023, стр. 20 – 27 (**ВАК**).

3. Петров М.А., **Чан Д.Х.**, Исследование технологических параметров микровытяжки на образование дефектов с помощью КЭ-моделирования, Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением, №9, 2024 (**ВАК, в печати**).

4. Петров М.А., **Чан Д.Х.**, Применение технологий 3D-печати для изготовления формообразующих и разделительных инструментов для изготовления мелкогабаритных листовых изделий, Известия Тульского Государственного Университета. Технические науки, №10, 2024 (**ВАК, в печати**).

5. Петров М.А., **Чан Д.Х.**, К определению точности изготовления формообразующего инструмента для микровытяжки, Известия Тульского Государственного Университета. Технические науки, №10, 2024 (**ВАК, в печати**).

6. Петров М.А., **Чан Д.Х.**, Определение коэффициента износа с целью прогнозирования износа поверхности инструментов для микродеформирования листовой заготовки, Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением, №9, 2024 (**ВАК, в печати**).

7. **Чан Д.Х.**, Петров М.А., Определение математической модели силы деформирования при микровытяжке с помощью методики многофакторного планирования эксперимента и численного моделирования, Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением, 2024 (**ВАК, в печати**).

В других изданиях

8. Петров М.А., **Чан Д.Х.**, Использование технологий аддитивного производства при разработке инструмента для микродеформирования листовых заготовок из цветных металлов и сплавов, Научная визуализация, №5, 2024 (**ВАК, в печати**).

9. Petrov M.A., **Tran D.H.**, Application of additive technologies in the development of tools for microdeformation of sheet blanks made from non-ferrous metal and alloy, Scientific visualization, №5, 2024 (**Scopus, в печати**).

В сборниках конференций

10. Петров М.А., **Чан Д.Х.**, Анализ влияния геометрических размеров листовой заготовки в процессе микровытяжки на технологические параметры при помощи КЭ-моделирования, труды XXXIII Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС-2021), 30.11–02.12.2021, 2022, ИМАШ РАН, стр. 76–81 (**РИНЦ**).

11. Петров М.А., **Чан Д.Х.**, Изучение влияния фактора трения на результат процесса микровытяжки при помощи КЭ-моделирования, Наука, техника, педагогика высшей школы Новые технологии. Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Наука – Общество – Технологии – 2022» (Россия, Москва, 1–4 марта 2022 г.), стр. 604–611 (**РИНЦ**).

12. **Чан Д.Х.**, Петров М.А., Изучение влияния коэффициента вытяжки на степень утонения стенки стаканчика в процессе микровытяжки медной заготовки при помощи КЭ-моделирования, Наука, техника, педагогика высшей школы Новые технологии. Материалы Всероссийской

научно-практической конференции «Наука – Общество – Технологии–2023» (Россия, Москва, 20–27 февраля 2023 г.), стр. 323–329 (**РИНЦ**).

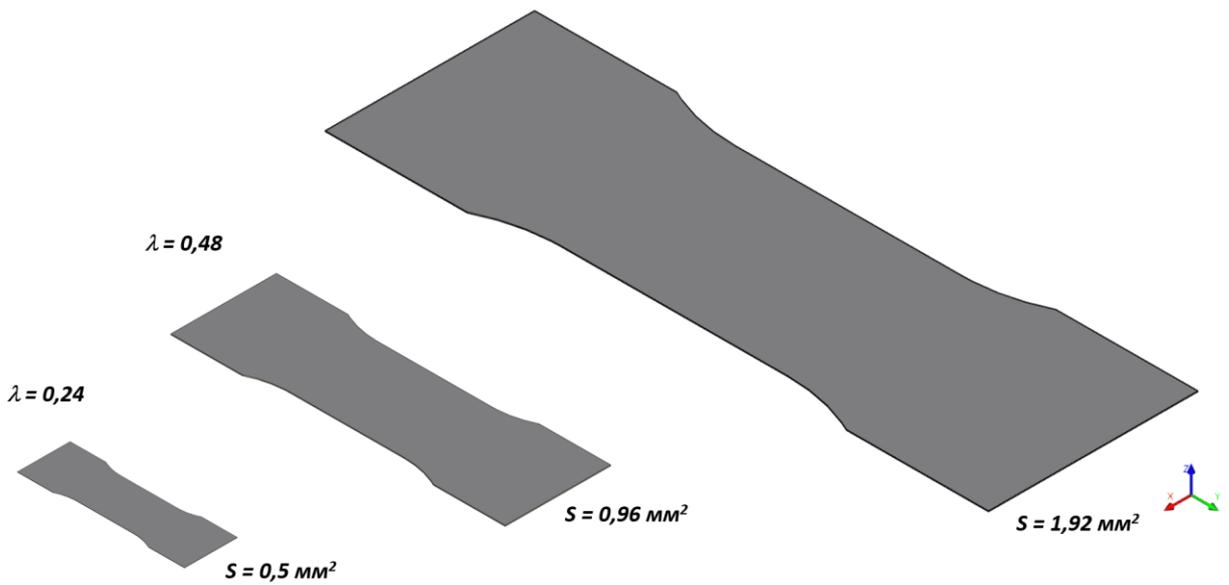
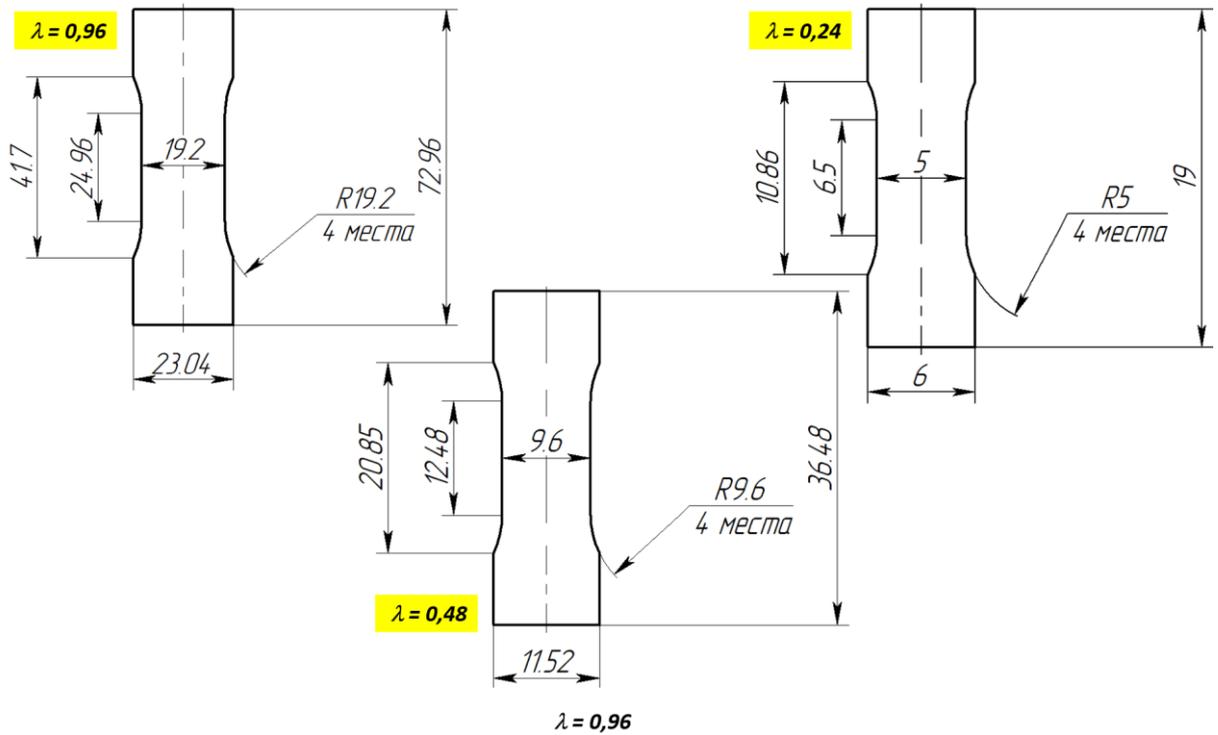
13. **Чан Д.Х.**, Петров М.А., Оценка влияния геометрии сглаживания матрицы на распределение контактного давления в процессе микроштамповки при помощи численного моделирования, Международной научно-практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов», Томск, 2023, стр. 431–437 (**РИНЦ**).

14. Петров М.А., **Чан Д.Х.**, Методика и шаги проектирования процесса микровытяжки листовых заготовок, труды XXXV Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС-2023), 13.11 – 16.11.2023, 2023, ИМАШ РАН, стр. 83 – 89 (**РИНЦ**).

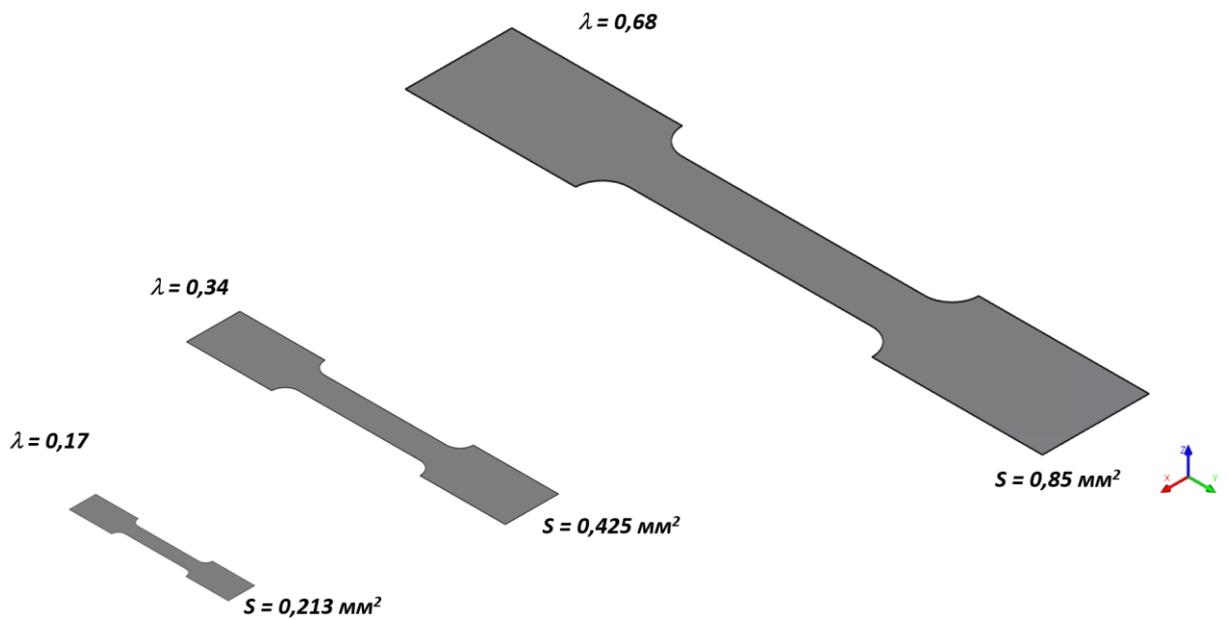
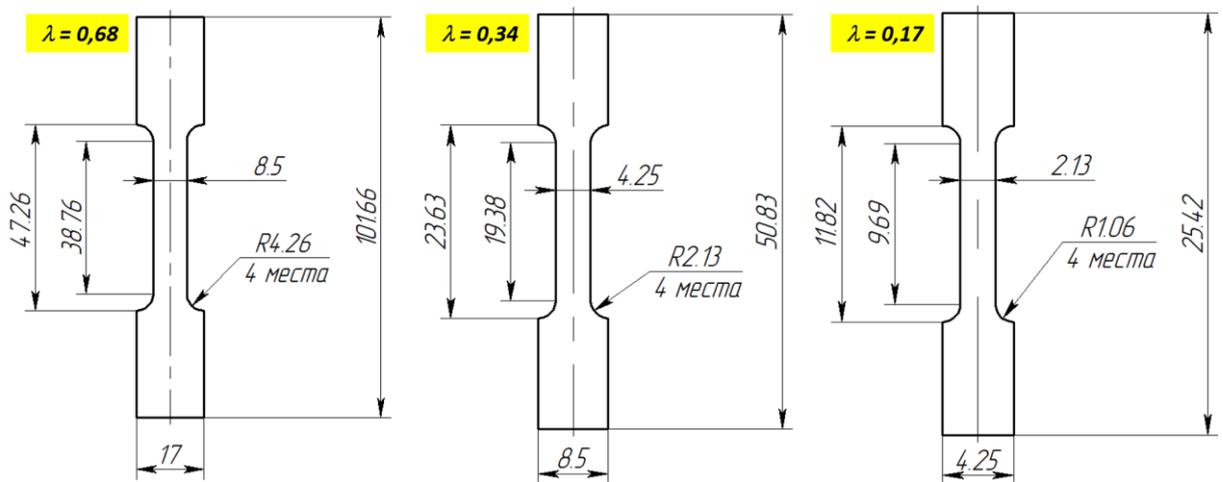
15. Петров М.А., **Чан Д.Х.**, Исследование микровытяжки медной листовой заготовки с применением компьютерного моделирования, Сборник тезисов Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации», Тула, 22.12.2023, стр. 35–36 (**РИНЦ**).

16. Петров М.А., **Чан Д.Х.**, Применение технологий 3D-печати при изготовлении инструментов для микродеформирования листовой заготовки, труды 34-ой Международной конференции ГрафиКон 2024, 17–19.09.2024, г. Омск, стр. 411–417 (**РИНЦ**).

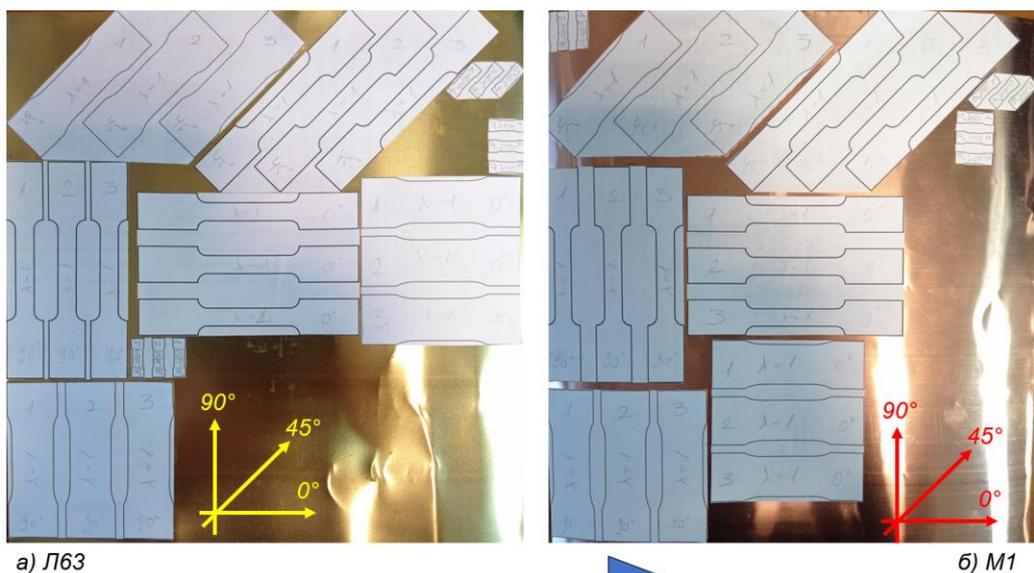
Приложение 2. Механические испытания материалов



а) пропорциональные образцы



б) непропорциональные образцы

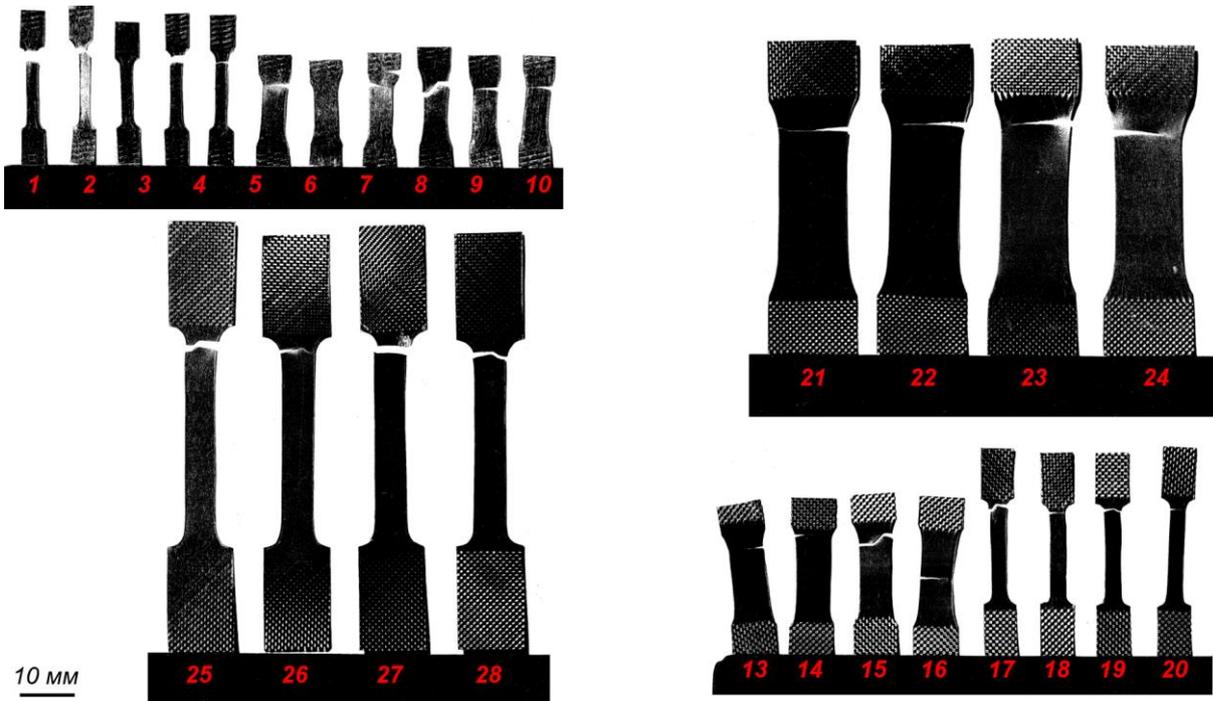


а) Л63

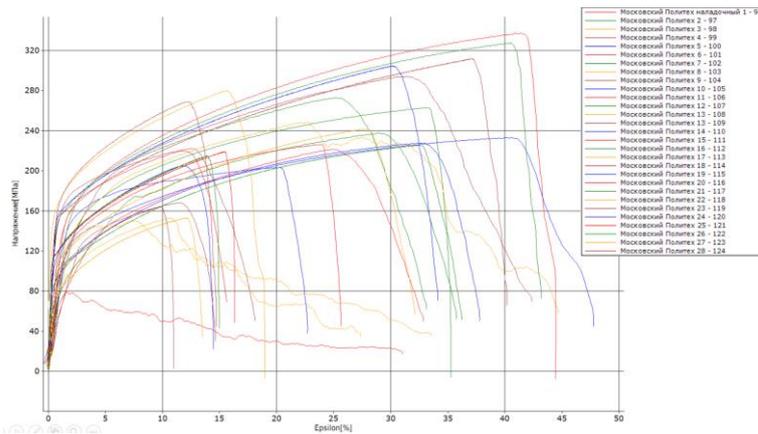
б) М1

направление прокатки

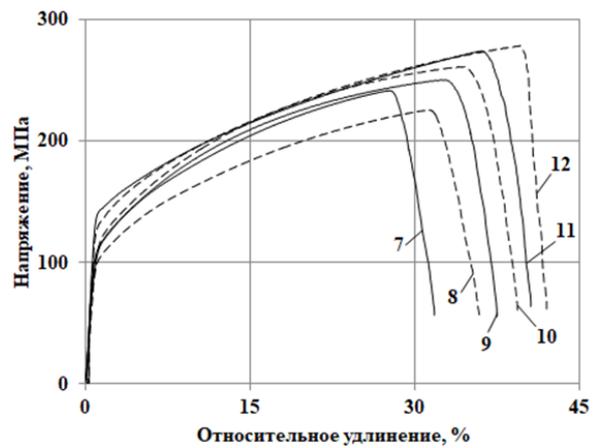
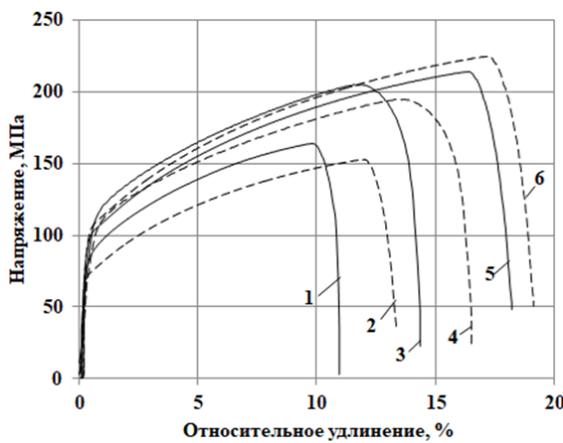
в) подготовка образцов



г) образцы после испытаний, под углами  $0^\circ$  и  $90^\circ$  к направлению прокатки



← все образцы (НП и ПП)



↑ только образцы из М1 (НП и ПП)

д) графики деформация – напряжение

Приложение 3. Результаты теоретических расчётов технологического процесса

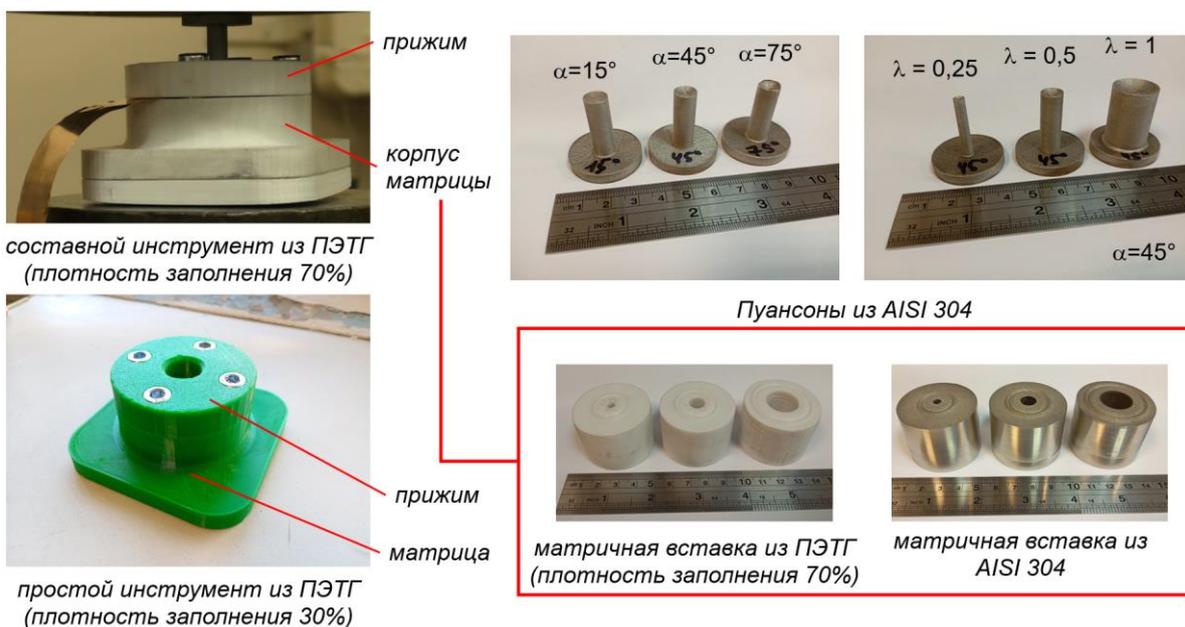
толщина заготовки 100 мкм

Параметр	Коэффициент подобия ( $\lambda$ )			
	1	0,5	0,25	0,125
Диаметр пуансона ( $D_{п}$ ), [мм]:	8,0	4,0	2,0	1,0
Диаметр отверстия матрицы ( $D_{м}$ ), [мм]:	8,3	4,3	2,3	1,3
Диаметр заготовки ( $D_{з}$ ), [мм]:	15,0	7,5	3,75	1,875
Радиус пуансона (эксп.) ( $R_{п}$ ), [мм]:	1,5	0,75	0,375	0,1875
Радиус пуансона (расч.) ( $R_{п}$ ), [мм]:	0,9	0,35	0,125	0,05
Радиус матрицы (эксп.) ( $R_{м}$ ), [мм]:	1,00	0,50	0,25	0,13
Радиус матрицы (расч.) ( $R_{м}$ ), [мм]:	1,4	0,55	0,2	0,075
Относительная толщина ( $t/D_{з}$ ), [-]:	0,0067	0,0133	0,0267	0,0533
Потеря устойчивости (с прижимом – да, без прижима – нет), [-]:	да	да	нет	да
Высота детали с припуском под обрезку ( $H_{д}$ ), [мм]	3,63	1,4	0,57	0,17
Сила вытяжки ( $F$ ), [Н]:				
- Л63	1000,817	241,196	74,1023	22,63027
- М1	102,787	24,7715	7,61051	2,32419
- А5	365,163	88,0039	27,0373	8,256989
Сила прижима (для Л63) ( $F_{пр.}$ ), [Н]:	156,4984	40,2438	10,1986	2,480447
Зазор на сторону ( $C=t+C'$ ), [мм]:	0,15	0,10	0,075	0,0625

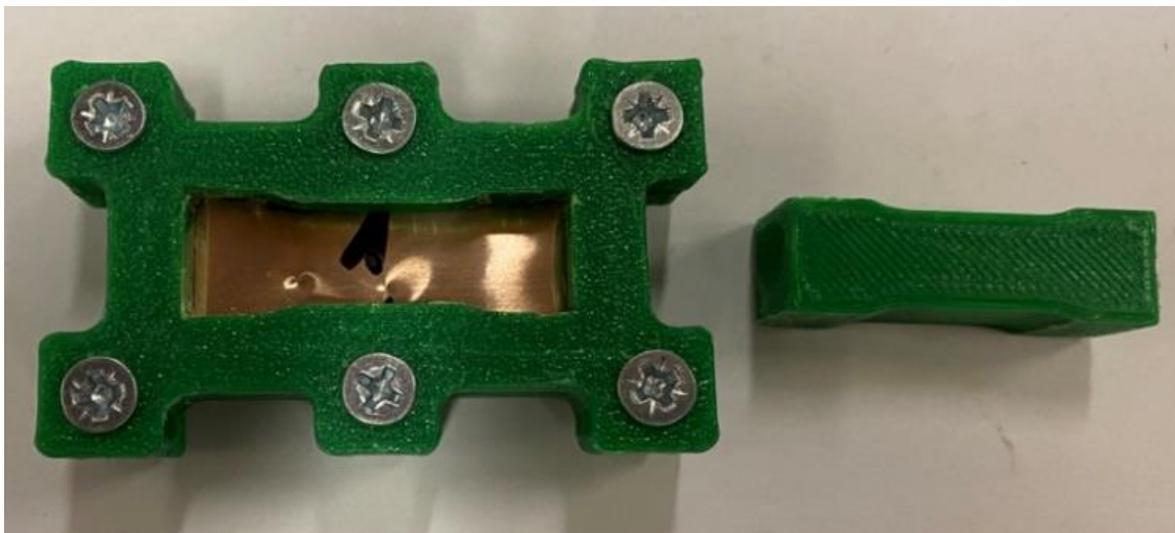
толщина заготовки 200 мкм

Параметр	Коэффициент подобия ( $\lambda$ )			
	1	0,5	0,25	0,125
Диаметр пуансона ( $D_{п}$ ), [мм]:	8,0	4,0	2,0	1,0
Диаметр отверстия матрицы ( $D_{м}$ ), [мм]:	8,3	4,3	2,3	1,3
Диаметр заготовки ( $D_{з}$ ), [мм]:	15,0	7,5	3,75	1,875
Радиус пуансона (эксп.) ( $R_{п}$ ), [мм]:	1,5	0,75	0,375	0,1875
Радиус пуансона (расч.) ( $R_{п}$ ), [мм]:	0,9	0,35	0,125	0,05
Радиус матрицы (эксп.) ( $R_{м}$ ), [мм]:	1,00	0,50	0,25	0,13
Радиус матрицы (расч.) ( $R_{м}$ ), [мм]:	1,4	0,55	0,2	0,075
Относительная толщина ( $t/D_{з}$ ), [-]:	0,013	0,007	0,003	0,0017
Потеря устойчивости (с прижимом – да, без прижима – нет), [-]:	да	да	нет	да
Высота детали с припуском под обрезку ( $H_{д}$ ), [мм]	3,63	1,4	0,57	0,17
Сила вытяжки ( $F$ ), [Н]:				
- Л63	2026,04	488,20	149,95	45,77
- М1	208,0803	50,1398	15,4001	4,700608
- А5	739,2325	178,128	54,7108	16,69953
Сила прижима (для Л63) ( $F_{пр.}$ ), [Н]:	119,9185	33,18	8,91	2,23
Зазор на сторону ( $C=t+C'$ ), [мм]:	0,25	0,125	0,0625	0,03125

## Приложение 4. Результаты 3D-печати инструментов МИКРОВОЙРУБКА



а) круглая заготовка

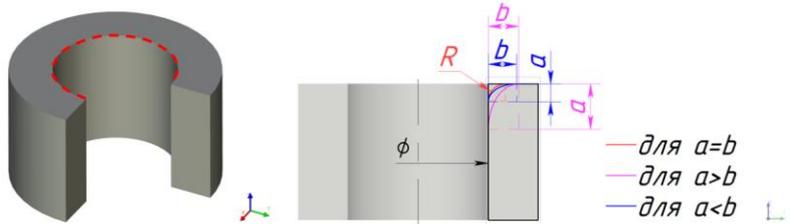


б) фигурная заготовка

# МИКРОВОЫТЯЖКА

## I) матричные вставки

Номер вставки (размеры, [мм])	
обозначение: $R$ (при $a=b$ ); $\emptyset$	
№1	( $R=1,5$ ; $\emptyset 8,2$ )
№2	( $R=0,75$ ; $\emptyset 4,2$ )
№3	( $R=0,375$ ; $\emptyset 2,2$ )
№4	( $R=0,188$ ; $\emptyset 1,2$ )
№5	( $R=1,5$ ; $\emptyset 8,1$ )
№6	( $R=0,75$ ; $\emptyset 4,1$ )
№7	( $R=0,375$ ; $\emptyset 2,1$ )
№8	( $R=0,188$ ; $\emptyset 1,1$ )
обозначение: $a$ и $b$ (при $a < b$ ); $\emptyset$	
№9	( $a=0,72$ и $b=1,2$ ; $\emptyset 8,2$ )
№10	( $a=0,36$ и $b=0,6$ ; $\emptyset 4,2$ )
№11	( $a=0,18$ и $b=0,3$ ; $\emptyset 2,2$ )
№12	( $a=0,1$ и $b=0,15$ ; $\emptyset 1,2$ )
№13	( $a=0,72$ и $b=1,2$ ; $\emptyset 8,1$ )
№14	( $a=0,36$ и $b=0,6$ ; $\emptyset 4,1$ )
№15	( $a=0,18$ и $b=0,3$ ; $\emptyset 2,1$ )
№16	( $a=0,1$ и $b=0,15$ ; $\emptyset 1,1$ )
обозначение: $a$ и $b$ (при $a > b$ ); $\emptyset$	
№17	( $a=2,52$ и $b=1,8$ ; $\emptyset 8,2$ )
№18	( $a=1,26$ и $b=0,9$ ; $\emptyset 4,2$ )
№19	( $a=0,63$ и $b=0,45$ ; $\emptyset 2,2$ )
№20	( $a=0,315$ и $b=0,225$ ; $\emptyset 1,2$ )
№21	( $a=2,52$ и $b=1,8$ ; $\emptyset 8,1$ )
№22	( $a=1,26$ и $b=0,9$ ; $\emptyset 4,1$ )
№23	( $a=0,63$ и $b=0,45$ ; $\emptyset 2,1$ )
№24	( $a=0,315$ и $b=0,225$ ; $\emptyset 1,1$ )

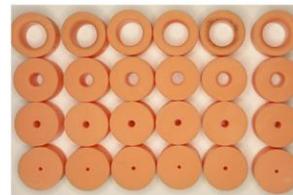


а) ВТ6



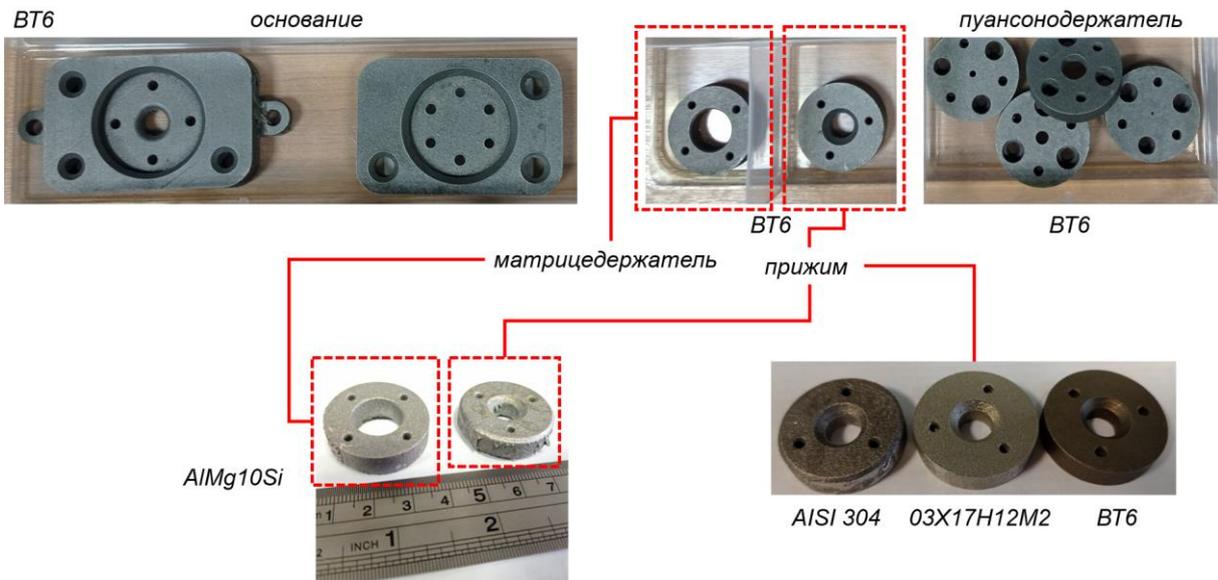
б) ПЭТГ

в) КПФП



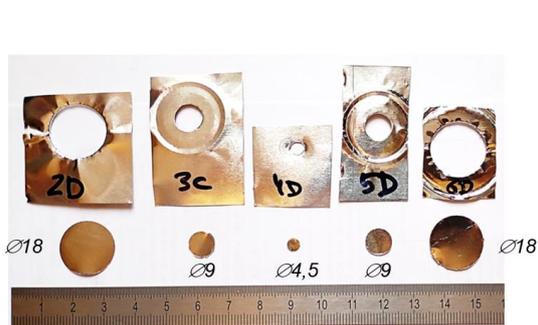
г) БФП

## II) детали деформирующего инструмента

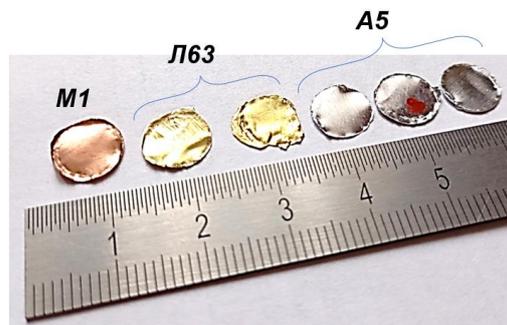


## Приложение 5. Результаты микровырубки и микровыдавливания

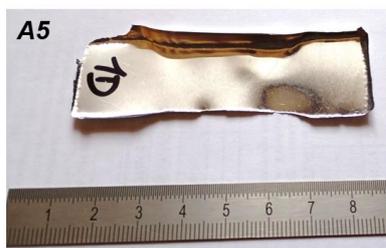
### МИКРОВЫРУБКА



круглые заготовки, сплав А5



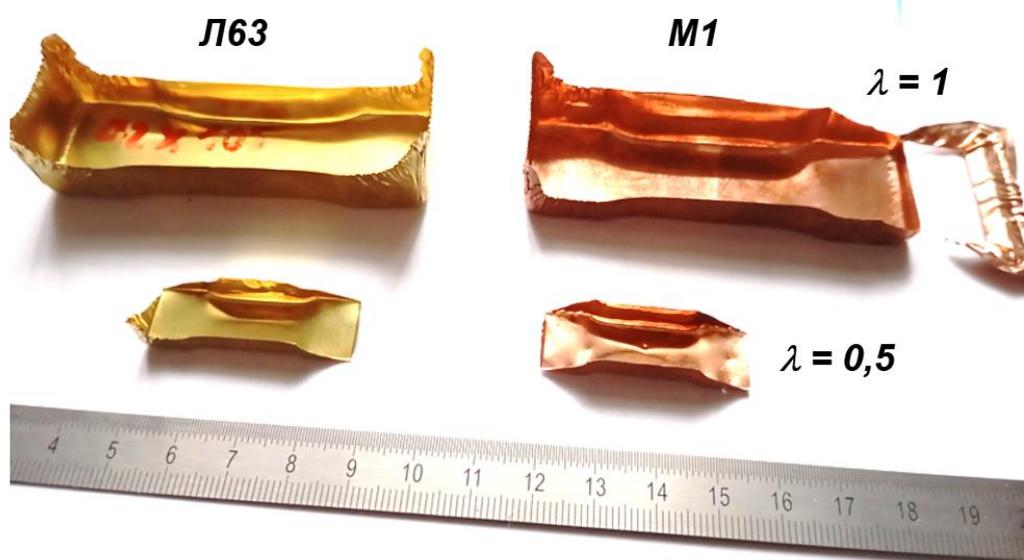
круглые заготовки  $\varnothing 9$



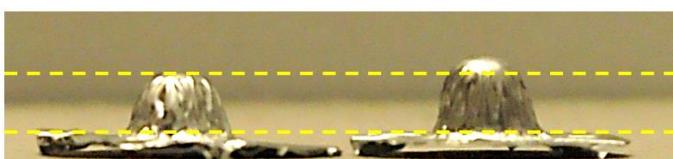
фигурная заготовка



фигурные заготовки



### МИКРОВЫТЯЖКА



125 Н

200 Н

Материал: алюминиевая фольга АД1/АД2,  
толщиной 11 мкм  
Заготовка, мм:  $\varnothing 30$   
Толщина, мкм: 220 (20 слоёв)



№ п/п	Ø	Материал	Условие
1	30	Л63	без смазки
2	30	М1	без смазки
3	30	АД1/АД2 фольга 10 слоёв, общ. толщина 110 мкм	без смазки
4	30	АД1/АД2 фольга 20 слоёв, общ. толщина 220 мкм	без смазки
5	60	Л63	без смазки
6	60	М1	без смазки

Оборудование: УИМ-100



Материал: М1  
Заготовка, мм: Ø7  
Толщина, мкм: 100  
Оборудование: сервопресс



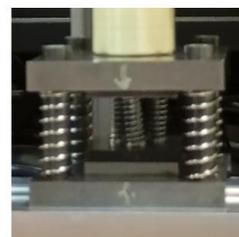
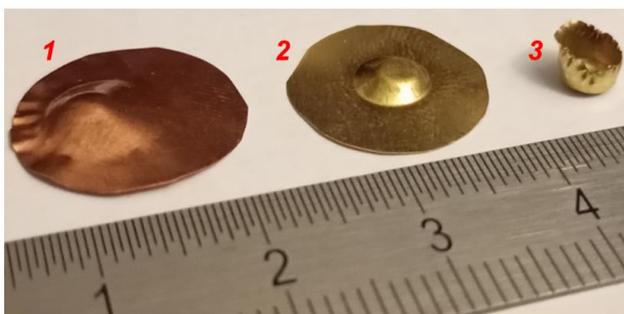
№ п/п	Ø	Материал	Условие
1	30	Л63	без смазки
2	25	Л63	без смазки
3	20	Л63	без смазки
4	15	Л63	без смазки
5	30	М1	без смазки
6	25	М1	без смазки
7	20	М1	без смазки
8	15	М1	без смазки
9	15	М1	смазка, графит
10	15	Л63	смазка, графит
11	15	М1	смазка, тетрацилин
12	10	М1	без смазки
13	10	М1	смазка, тетрацилин
14	10	Л63	без смазки
15	7,5	М1	без смазки
16	7,5	Л63	без смазки
17	6	М1	без смазки
18	6	М1	смазка, тетрацилин

Оборудование: УИМ-100

со смазкой

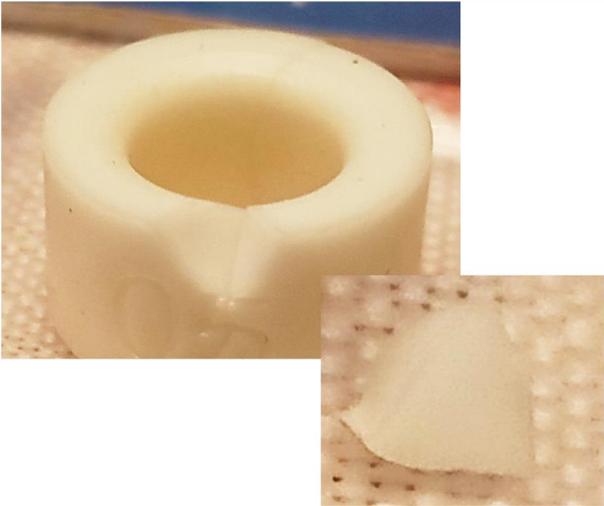
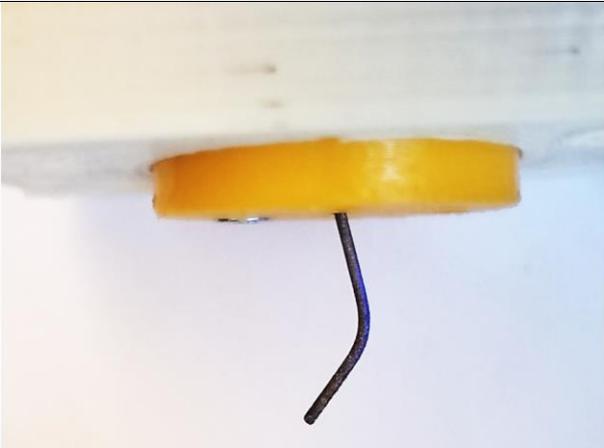


к=6,25 Н/мм: 3, 5  
к=7,5 Н/мм: 1, 2, 4, 6  
Оборудование: УИМ-100



Материал: М1 и Л63 (2, 3)  
Заготовка, мм: Ø30 (1, 2) и Ø4 (3)  
Оборудование: сервопресс

Приложение 6. Дефекты и повреждение деталей инструментов

Описание	Решение	Вид дефекта
<p>раскалывание матричной вставки при отделении от платформы 3D-принтера после выращивания и отверждения</p>	<p>выполнять отделение после выращивания, так как материал имеет большее относительное удлинение на этом этапе</p>	
<p>искривление пуансона с <math>\lambda=0,125</math> при выполнении вытяжки</p>	<p>увеличить диаметр нерабочей части, что приведёт к снижению критического отношения L/D</p>	
<p>коробление прототипов из ВТ6</p>	<p>выбор правильной ориентации в пространстве области 3D-печати на этапе подготовки управляющей программы</p>	

# Приложение 7. Акт внедрения в учебный процесс в РФ

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

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
К.Т.Н.

«24» Владимир А.Ю. Наливайко  
2024 г

АКТ

№ 04-10/24

Московский Политех  
(место составления)

О внедрении в учебный процесс университета результатов диссертационной работы «Разработка и исследование технологии микроштамповки листовых деталей из цветных металлов и сплавов, с применением штампового инструмента, полученного методами 3D-печати», выполненной аспирантом кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Чаном Динь Хынгом.

Мы, нижеподписавшиеся, директор департамента по образовательной политике, декан факультета машиностроения, заведующий кафедрой «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы  
(научно-исследовательской или диссертационной)

по теме «Разработка и исследование технологии микроштамповки листовых деталей из цветных металлов и сплавов, с применением штампового инструмента, полученного методами 3D-печати» имеют теоретическое и практическое значение для учебного процесса и внедрены в учебный процесс Московского политехнического университета при обучении студентов направлений подготовки 15.04.01 «Машиностроение» (магистратура) в форме практических занятий по теме «Методика проведения валидации результатов пластического деформирования при помощи компьютерного моделирования».  
(направления подготовки: цифры и названия)

Кафедра, внедрившая результаты: «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии».

Номер протокола и дата заседания кафедры, на котором рассмотрены результаты внедрения: протокол №2 от 02.10.2024.

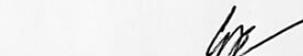
Начало использования объекта внедрения: 01 сентября 2024 года.

Директор департамента по образовательной политике

  
(личная подпись)

А.Б. Максимов

Декан факультета, внедривший разработку

  
(личная подпись)

Е.В. Сафонов

Заведующий кафедрой

  
(личная подпись)

А.Г. Матвеев

«XÁC NHẬN»



Phó Hiệu trưởng phụ trách đào tạo  
Trường Đại học «Trần Đại Nghĩa»,  
PGS, Tiến sĩ Lương Hồng Sâm  
« 6 » octobre 2024 г.

**VĂN BẢN**

Về việc sử dụng kết quả của luận án tiến sĩ “Nghiên cứu và phát triển công nghệ dập vuốt micro chi tiết dạng tấm từ kim loại và hợp kim màu với việc áp dụng loại dụng cụ dập nhận được bằng phương pháp in 3D” của ông Trần Đình Hưng trong quá trình đào tạo của Trường Đại học “Trần Đại Nghĩa”, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Hội đồng bao gồm: Chủ tịch Hội đồng – Trưởng phòng Đào tạo Trường Đại học Trần Đại Nghĩa TS Nguyễn Mạnh Hùng; các thành viên: Kế hoạch tổng hợp TS Phạm Việt Hoàng và Chủ nhiệm khoa Cơ khí PGS, TS Trần Thế Văn đã họp và xác nhận các kết quả trong luận án tiến sĩ của ông Trần Đình Hưng đã được ứng dụng trong quá trình đào tạo khi tiến hành các thí nghiệm và giải dạy thực hành cho sinh viên theo mã ngành 7510201 “Kỹ thuật cơ khí”, chuyên ngành “Công nghệ và máy gia công áp lực”.

Trưởng phòng Đào tạo,

TS. Nguyễn Mạnh Hùng

Bộ phận Kế hoạch tổng hợp,

TS. Phạm Việt Hoàng

Chủ nhiệm khoa KTCS,

PGS, TS. Trần Thế Văn

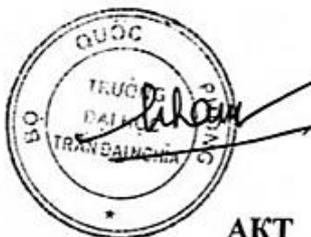
«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора по учебной работе

университета «Чан Дай Нгхиа»

к.т.н., доцент. Лыонг Хонг Сам

« 06 » ОКТАБРЯ 2024 г.



АКТ

об использовании результатов кандидаткой диссертации Чан Динь Хынга на тему: «Разработка и исследование технологии микроштамповки листовых деталей из цветных металлов и сплавов, с применением штампового инструмента, полученного методами 3D-печати» в учебном процессе университета «Чан Дай Нгхиа», г. Хошиминь, Вьетнам

Комиссия в составе председателя – Начальник отдел обучения университета «Чан Дай Нгхиа», к.т.н., Нгуиен Мань Хунг и членов: Начальника отдела планирования к.т.н., Фам Вьет Хоанг и декана факультета «Машиностроение» к.т.н., доцент. Чан Тхэ Ван составила настоящий акт, которым подтверждается что результаты диссертации Чан Динь Хынга использованы в учебном процессе при проведении лабораторных и практический занятий со студентами по направлению 7510201 «Машиностроение», специальность «Технологии и машины обработки давлением».

Начальник отдел обучения,  
к.т.н.,

Нгуиен Мань Хунг

Начальник отдел планирования,  
к.т.н.,

Фам Вьет Хоанг

Заместитель декана факультета  
«Машиностроение», к.т.н., доцент

Чан Тхэ Ван