

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

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

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»

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Москва – 2024

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 натурных 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 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).

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.

Текст автореферата и диссертации проверен на оригинальность и отсутствие плагиата с помощью онлайн платформы «Антиплагиат» (<https://antiplagiat.ru/>).

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) λ , 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 (λ): 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 (μ), 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.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения и 6 глав, заключения, приложения и библиографического списка из 190 наименований. Полный объём диссертации составляет 190 страниц с 50 рисунками и 31 таблицей.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 16 печатных работах. Всего в перечне ВАК по шифру специальности 7 работ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, а также научная и практическая значимости. Введено понятие размерного уровня с привязкой к размеру детали. 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 появляются отдельные научные направления по изучению материалов и технологий на разных размерных уровнях. Для изделий микро-уровня в англоязычном пространстве существуют такие термины, как microforming (микродеформирование), microstamping (микроштамповка), miniaturized (миниатюрный) и другие.

В первой главе выполнен аналитический обзор литературы по теме диссертации. Приведены термины и определения, рассмотрено влияние размерных эффектов и технологических факторов на процесс микроштамповки, которые основаны на развитии теории процессов макроштамповки в работах советских, российских и зарубежных учёных.

Проведён анализ и дана оценка основных отличий процесса технологического расчета процесса микроштамповки от процесса макроштамповки. Миниатюризация заготовки и штампа от нескольких миллиметров до нескольких микрометров приводит к затруднениям в выборе технологических параметров процесса микроштамповки и невозможности применения теории макропроцесса к микропроцессу. Следовательно, трудно прогнозировать и контролировать поведение микромасштабной деформации материала из-за малого размера деформируемых деталей. Согласно уравнению Холла-Петча, прочность материала растёт с уменьшением его геометрического размера, что обусловлено небольшим количеством зёрен поликристаллического строения исследуемого материала и снижением количества плоскостей скольжения, что, в свою очередь, приводит к понижению пластических свойств, т.е. снижению относительного удлинения. Чтобы лучше понять влияние совокупности технологических параметров на поведение материала в процессе его микродеформирования, были выполнены серия экспериментов и численных расчётов для разных коэффициентов подобия заготовки и деформирующей части инструмента.

Во второй главе рассматривается методика проектирования технологии и наиболее важные её части. На рис. 1 приводится сравнение двух подходов разработки технологий, из которых в диссертации реализуется второй, с применением цифровых инструментов.

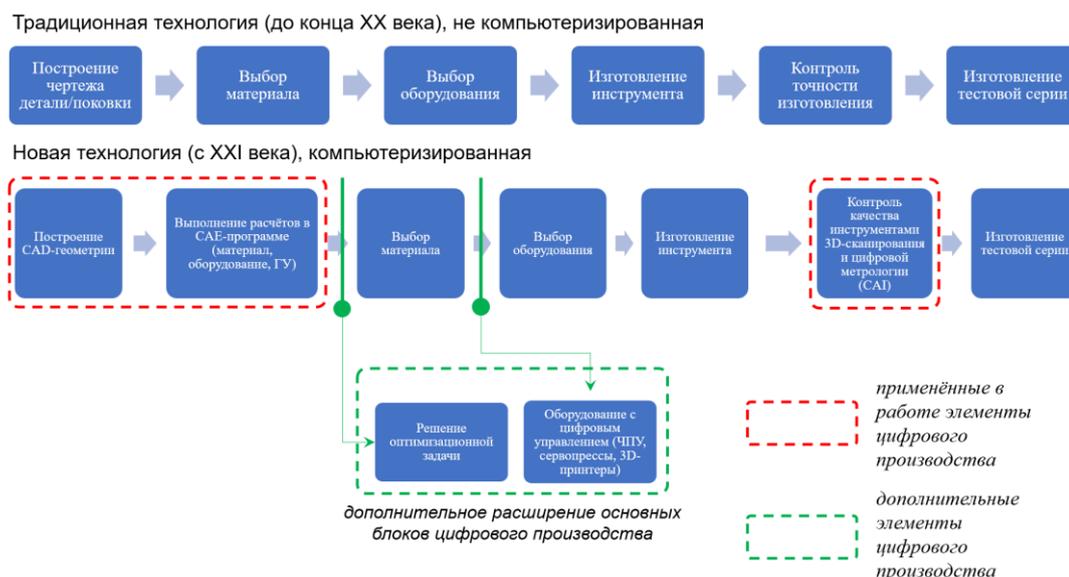


Рисунок 1. Сравнение схем разработки технологических процессов

В объёме диссертации рассматриваются два базовых процесса, вырубка и вытяжка, своими размерами определяемыми, как микродеформирование, для которых выполнены теоретические расчёты основных параметров.

В процессе формообразования деталей методом микроштамповки износ инструмента неизбежен. Проведён обзор применяемых при микродеформировании законов трения.

Производство инструментов и оборудования для технологии микрообработки в целом и технологии микроштамповки в частности сталкивается со многими трудностями по сравнению с традиционными процессами из-за их небольших размеров, требуемой высокой точности изготовления и сборки инструмента, а также позиционирования заготовки. Выполнены исследования по изготовлению инструментов с использованием технологий 3D-печати (SLM, LCD и FFF).

Для всех вариантов рассматривался один и тот же набор коэффициентов геометрического подобия (λ): 1; 0,5 и 0,25 или 1; 1/2 и 1/4. За базовый вариант ($\lambda = 1$) принимался вариант исполнения геометрии, данные для которого представлены в табл. 1. Вариант $\lambda=0,25$ исследовался только численным моделированием. Коэффициент подобия (λ) определяется по уравнению 1.

$$\lambda = \frac{D_n^m}{D_n^b} \quad (1)$$

где $D_{\text{пуансон}}^t$ – текущий диаметр пуансона, $D_{\text{пуансон}}^b$ – базовый диаметр пуансона, принят равным 8 мм.

Таблица 1. Значения КП λ и геометрических размеров штампов (мм)

λ [-]	1	0,5	0,25	0,125
Диаметр пуансона ($D_{\text{п}}$)	8	4	2	1
Диаметр отверстия матрицы ($D_{\text{м}}$)	8,3	4,3	2,3	1,15
Диаметр заготовки ($D_{\text{з}}$)	15	7,5	3,75	1,875
Радиус закругления на пуансоне ($R_{\text{п}}$)	1,5	0,75	0,375	0,1875
Радиус закругления на матрице ($R_{\text{м}}$)	1,5	0,75	0,375	0,1875
Зазор между пуансоном и матрицей (C)	0,15	0,075	0,0375	0,01875

В качестве материалов используются ленты из: меди М1 (по ГОСТ 859-214), латуни Л63 (по ГОСТ 15527-2004) и алюминия технической чистоты А5 (по ГОСТ 618-2014). Толщина круглой листовой заготовки составляет 0,1 мм.

Механические свойства, характеризующие прочностные и пластические свойства меди М1, определяются уравнением (2).

$$\sigma_{\epsilon} = 250 + 15\epsilon^{0,58} \quad (2)$$

Испытания образцов на растяжение проводились по ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» (рис. 2). Из ленты ножницами вырезались непропорциональные (тип А, 149,5×25 мм) и пропорциональные (тип Б, 76×24 мм) образцы, размеры которых учитывали коэффициенты подобия ($\lambda=1$; 0,5 и 0,25). Толщина заготовки не изменялась и составляла 100 мкм. По полученным результатам были построены кривые в координатах напряжение-относительное удлинение (рис. 3). На основе полученных данных выражена зависимость прочности тонкого медного листа М1 от коэффициента подобия позволяет прогнозировать поведение медного материала М1 при изменении размеров.

Были исследованы показатели анизотропии материала на основании одноосного растяжения образцов из меди М1, изготовленных в трёх направлениях к направлению прокатки ленты (0°, 45° и 90°), на электромеханической настольной

испытательной машине «Мелитэк» МЭС-Л-0,5. Были определены коэффициенты Лэнкфорда для плоскостной (Δr) и нормальной (\bar{r}) анизотропии.



Рисунок 2. Непропорциональные (№1...6) и пропорциональные (№7...12) образцы после проведения испытаний на одноосное растяжение (из М1)

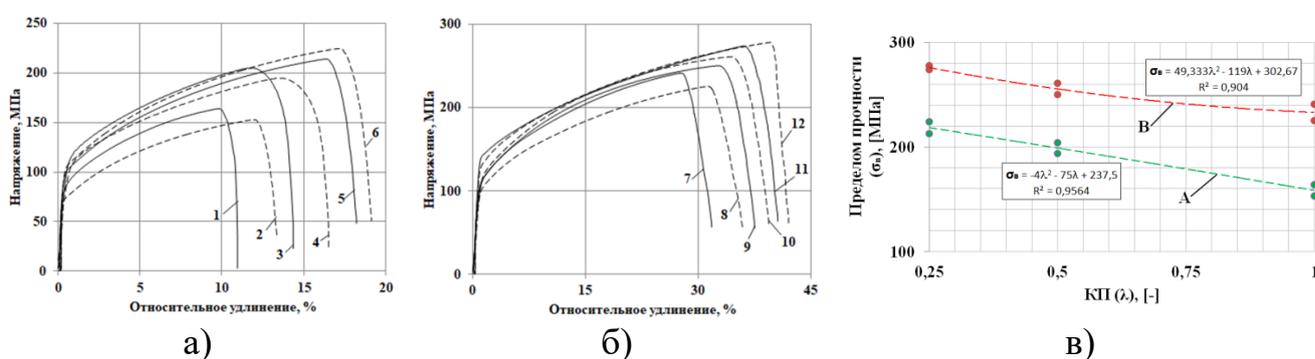


Рисунок 3. Диаграммы растяжения для непропорционального (а) и пропорционального (б) образцов, а также график, связывающий предел прочности материала и коэффициент подобия (λ) (в)

В третьей главе выполнено исследование влияния размерных эффектов на процесс микроштамповки с помощью программ численного моделирования (рис. 4) по методу конечных-элементов (МКЭ). Процесс компьютерного моделирования разделен на три блока: геометрическое моделирование (T-Flex, Компас, Inventor), моделирование технологического процесса (Abaqus, QForm) и проверка геометрической точности размеров готового изделия на основании результатов оптического 3D-сканирования на основе структурированного подсвета (RV 3D Studio). В объем моделирования технологического процесса включено моделирование разделительной операции, операции вытяжки стаканчика с разными условиями оформления матрицы, силовыми характеристиками прижимного кольца, коэффициентами трения. Численное моделирование процесса микроштамповки проводится с помощью программы ABAQUS и QForm. Для комплексной оценки процесса микроштамповки были изучены входные данные, включающие два основных фактора: геометрию инструмента (зазор между пуансоном и матрицей, геометрии радиуса скругления матрицы) и технологические параметры процесса микроштамповки (коэффициент вытяжки, коэффициент трения и сила прижима). Качество осесимметричной детали типа «Стаканчик» оценивается по типу дефектов, возникающих в процессе деформирования. К ним относятся: разрушения, складкообразование и утончение стенки стаканчика.

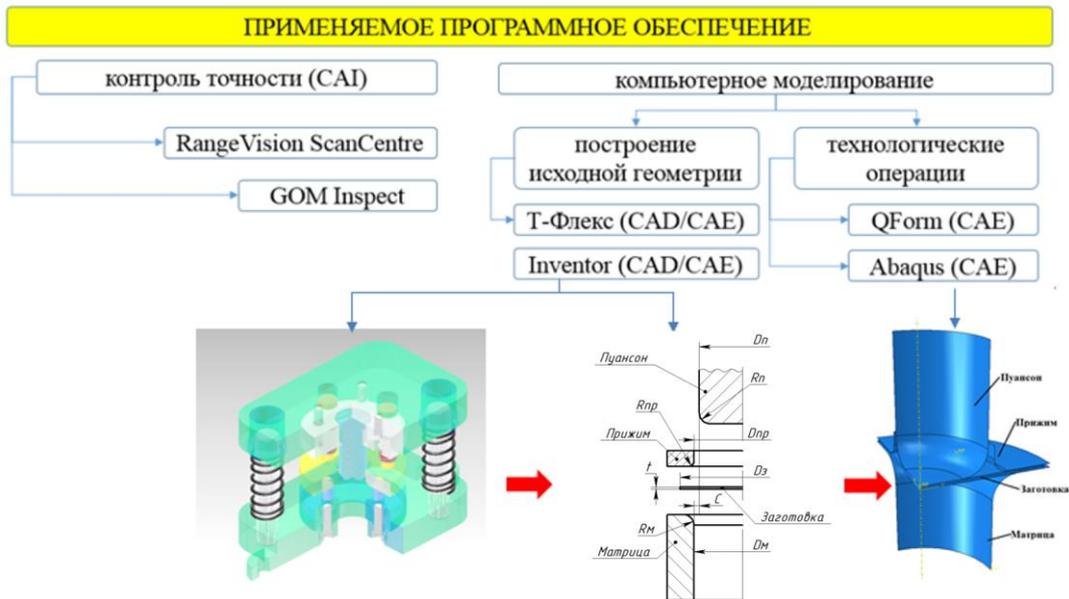


Рисунок 4. Набор программного обеспечения для компьютерного моделирования и контроля точности геометрии

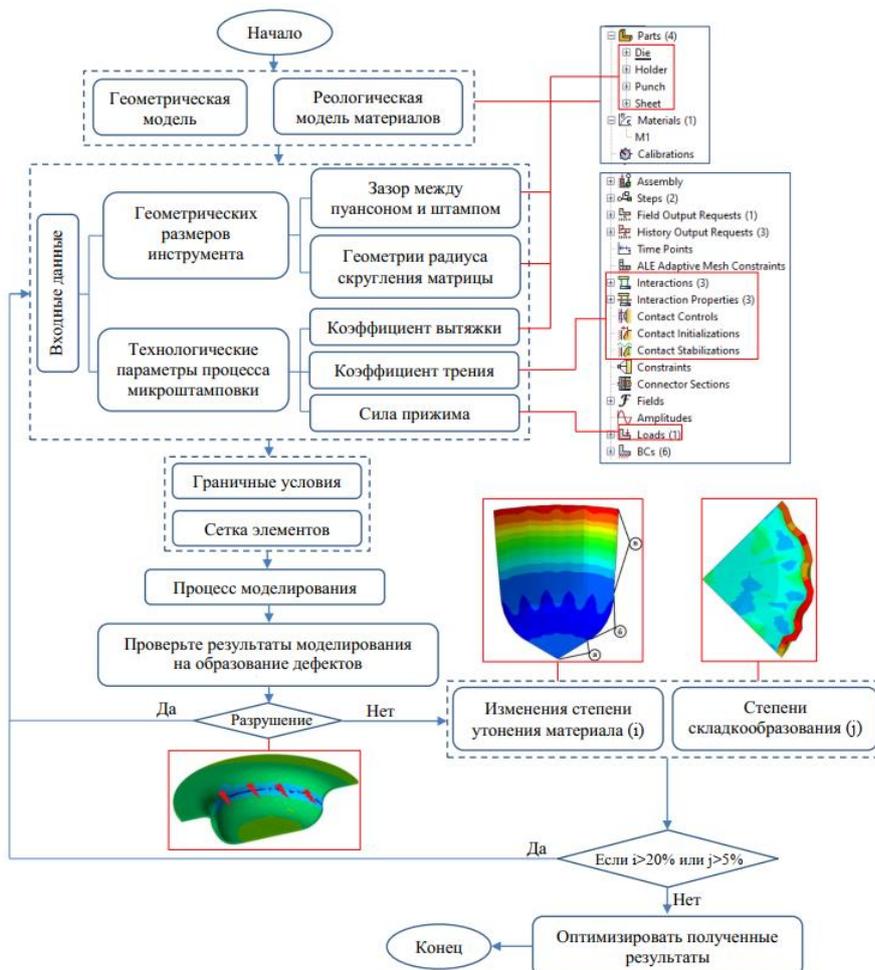


Рисунок 5. Блок-схема для моделирования процесса микровытяжки

Для оценки влияния геометрии сглаживания заходного ребра матрицы (ЗРМ) на процесс определяющими параметрами выбраны размер и форма геометрии сглаживания матрицы, выполненного в виде круга и эллипса, с геометрическими размерами согласно табл. 2 и 3, соответственно.

Результаты моделирования при разных значениях КП (λ) показывают, что максимальная сила деформации имеет тенденцию к увеличению при уменьшении значения радиуса матрицы (уменьшение $K_{изм}$) и, наоборот, максимальная сила деформации уменьшается при увеличении значения радиуса матрицы (увеличение $K_{изм}$).

Таблица 2. Значение размеров скруглений, в [мм]

Случай	Вариант		$\lambda = 1$		$\lambda = 0,5$		$\lambda = 0,25$	
			$R_{МК}$	$R_{МЭ}$	$R_{МК}$	$R_{МЭ}$	$R_{МК}$	$R_{МЭ}$
1-для $R_{МК}$ 2-для $R_{МЭ}$	А ($a < b$)	a	0,9	1,125	0,45	0,625	0,225	0,281
		b		1,875		0,875		0,469
	Б ($a < b$)	a	1,2	1,333	0,6	0,682	0,3	0,333
		b		1,667		0,818		0,417
1	В ($a = b$)	a	1,5	-	0,75	-	0,375	-
		b						
1-для $R_{МК}$ 2-для $R_{МЭ}$	Г ($a > b$)	a	1,8	1,636	0,9	0,818	0,45	0,409
		b		1,364		0,682		0,341
	Д ($a > b$)	a	2,1	1,75	1,05	0,875	0,525	0,438
		b		1,25		0,625		0,312

Таблица 3. Варианты исполнения радиусов скругления матрицы (R_m)

$K_{изм}$	-40%	-20%	0	+20%	+40%
R_m	$0,6 \times R1$	$0,8 \times R1$	$1,0 \times R1$	$1,2 \times R1$	$1,4 \times R1$
Вариант	А	Б	В	Г	Д

Уменьшение значения λ от 1 до 0,25 влияет на распределение толщины и утонение стенки стаканчика (рис. 6). При уменьшении коэффициента λ степень утонения стенки стаканчика уменьшается. Наиболее чувствительны крайние точки рассматриваемой области определения $K_{изм}$. Расхождения степени утонения максимальны для варианта А и минимальны для варианта Д. Для комплексной оценки влияния формы радиуса матрицы на образование дефектов требуется дальнейшее уточнение степени складкообразования стенок стаканчика после завершения процесса микровытяжки. По мере увеличения размера радиуса матрицы увеличивается степень складкообразования стенки стаканчика. Это справедливо как для случая 1, так и для случаев 2 и 3, при всех значениях λ . Сравнение результатов с базовым случаем 1 по варианту В показывает, что наименьшее отклонение наблюдается при $\lambda = 1$, а все значения лежат в интервале $\pm 0,3\%$. Для оценки влияния зазора между пуансоном и матрицей для изучения и выполнения процесса моделирования были выбраны 4 значения коэффициента К (1; 1,5; 2; 2,5), где К – отношение толщины исходной заготовки к зазору между пуансоном и матрицей (табл. 4). Максимальная сила деформирования ($F_{макс.}$) увеличивается с увеличением коэффициента трения с $\mu = 0,1$ до $\mu = 0,13$ (рис. 12). Оба результата имеют схожие тенденции: при увеличении коэффициента вытяжки увеличивается и максимальная сила деформирования ($F_{макс.}^{\lambda=1} < F_{макс.}^{\lambda=0,5} < F_{макс.}^{\lambda=0,25}$).

Таблица 4. Значения соотношения между толщиной и зазором с различными значениями КП

K, [-]	$\lambda = 1$			$\lambda = 0,5$			$\lambda = 0,25$		
	D ₂ , [ММ]	C, [ММ]	S ₀ , [ММ]	D ₂ , [ММ]	C, [ММ]	S ₀ , [ММ]	D ₂ , [ММ]	C, [ММ]	S ₀ , [ММ]
1	8,4	0,2	0,2	4,2	0,1	0,1	2,1	0,05	0,05
1,5	8,6	0,3	0,2	4,3	0,15	0,1	2,15	0,075	0,05
2	8,8	0,4	0,2	4,4	0,2	0,1	2,2	0,1	0,05
2,5	9,0	0,5	0,2	4,5	0,25	0,1	2,25	0,125	0,05

Регрессионная модель (рис. 7) строится по методике многофакторного планирования эксперимента, реализующей принцип «чёрного ящика». Для выбора значимых факторов используются критерии, согласно которым варьируемые факторы не связаны и не зависят от внешних факторов. Для процесса микровытяжки выбираются пять значимых фактора: зазор между пуансоном и матрицей $((D_M - D_{II})/2)$, радиус угла матрицы R_M , коэффициент трения μ , сила прижима $F_{пр}$ и коэффициент вытяжки $(m = D_3/D_{II})$. Изменение пределов факторов показано в таблице 5. Процесс моделирование проводился с варьированием факторов на двух уровнях. За значение целевой функции в каждом эксперименте принимался результат соответствующего численного расчёта. В таблице 6 показаны полученные математические модели для максимальной силы деформирования, для трёх коэффициентов подобия. На основе численного моделирования дано окно благоприятного сочетания технологических параметров, которые позволяют получить бездефектную деталь для рассматриваемых коэффициентов подобия (λ).

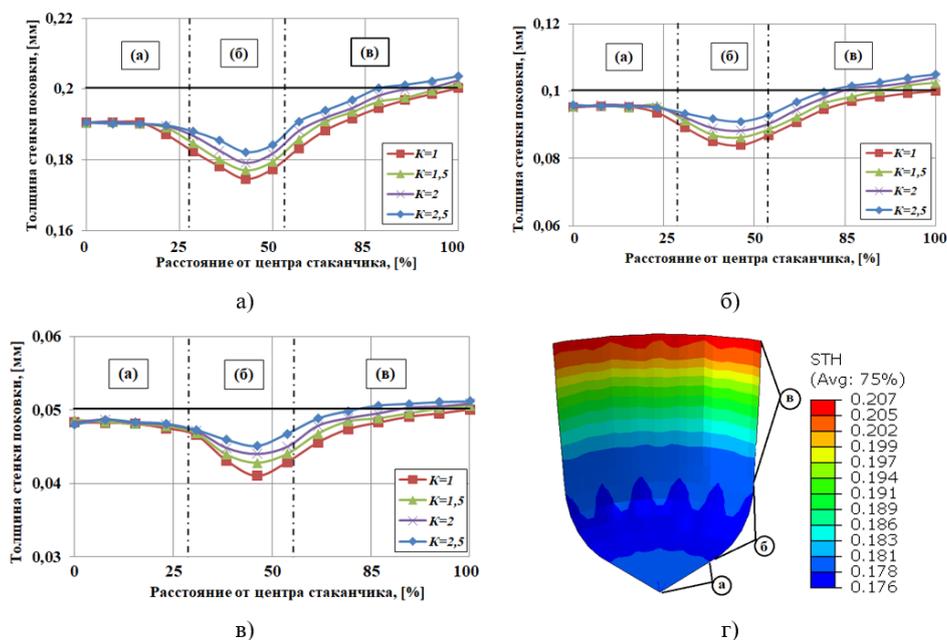


Рисунок 6. Сравнение распределения толщины стенок стаканчика: $\lambda = 1$ (а), $\lambda = 0,5$ (б), $\lambda = 0,25$ (в); области: дно стаканчика (а), переходная область от донной части к стенке (б), стенка стаканчика (в); результат моделирования приведён для случая $\lambda = 1$ и $K = 1,5$, показано поле распределения толщины стенок в [ММ] (г).

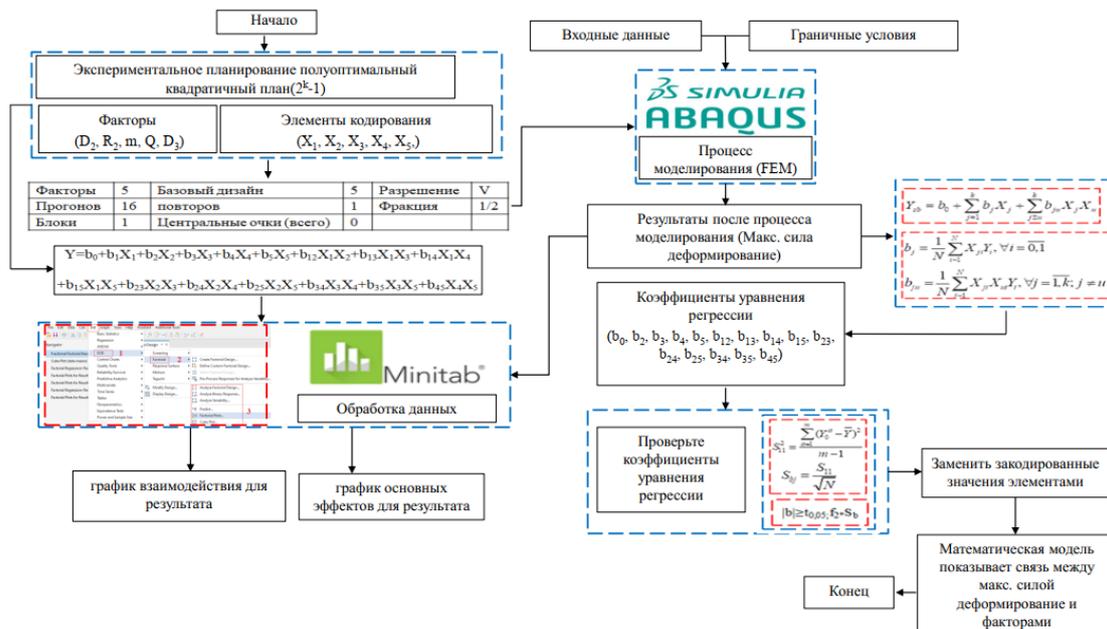


Рисунок 7. Блок-схема построения регрессионной модели, показывающая связь максимальной силы деформации с технологическими факторами процесса микроштампки

Таблица 5. Факторы, влияющие на силу деформации в процессе микровытяжки

λ	Название фактора	Обозначение	Кодирование	Шаг	Уровень значения		
					ВУ (+1)	ГУ (0)	НУ (-1)
1	Диаметр матрицы, [мм]	D_M	X_1	0,3	9	8,7	8,4
	Радиус угла матрицы, [мм]	R_M	X_2	0,3	1,8	1,5	1,2
	Коэффициент трения, [-]	μ	X_3	0,03	0,14	0,11	0,08
	Сила прижима, [Н]	$F_{пр}$	X_4	75	200	125	50
	Диаметр заготовки, [мм]	D_3	X_5	0,8	16	15,2	14,4
0,5	Диаметр матрицы, [мм]	D_M	X_1	0,15	4,5	4,35	4,2
	Радиус угла матрицы, [мм]	R_M	X_2	0,15	0,9	0,75	0,6
	Коэффициент трения, [-]	μ	X_3	0,03	0,14	0,11	0,08
	Сила прижима, [Н]	$F_{пр}$	X_4	37,5	100	62,5	25
	Диаметр заготовки, [мм]	D_3	X_5	0,4	8	7,6	7,2
0,25	Диаметр матрицы, [мм]	D_M	X_1	0,075	2,25	2,175	2,1
	Радиус угла матрицы, [мм]	R_M	X_2	0,075	0,45	0,375	0,3
	Коэффициент трения, [-]	μ	X_3	0,03	0,14	0,11	0,08
	Сила прижима, [Н]	$F_{пр}$	X_4	18,75	50	31,25	12,5
	Диаметр заготовки, [мм]	D_3	X_5	0,2	4	3,8	3,6

Таблица 6. Математическая модель для F_{\max} .

$$\begin{aligned}
 &\lambda \\
 &\text{Уравнение} \\
 &Y = 114169 + 817,2D_M - 491R_M + 32,25\mu + 5252m + 4656,6D_3 + 0,108\mu D_M + \\
 &1 \quad + 464,4D_M F_{пр} + 3,456D_M D_3 + 0,114\mu R_M - 0,114R_M F_{пр} + 2,064R_M D_3 + \\
 &\quad + 18\mu F_{пр} - 0,12\mu D_3 + 2700F_{пр} D_3 \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &0,5 \quad Y = -1024 - 10,26D_M - 21,87R_M - 0,26\mu - 698,34F_{пр} - 53,27D_3 - 0,01\mu D_3 - \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -6,6D_3F_{\text{пр}}+0,126D_M D_3-9,78R_M F_{\text{пр}} +0,25R_M D_3+ \\
& \quad +2,5\mu F_{\text{пр}}-0,02\mu D_3+34,7F_{\text{пр}}D_3 \\
& Y=-12,453+0,37D_M-0,8R_M+0,0013\mu-30 \\
& \quad \quad \quad F_{\text{пр}}+3,59D_3+ \\
0,25 & \quad +0,02D_M F_{\text{пр}}+0,013D_M D_3-0,325R_M F_{\text{пр}} +0,01R_M D_3+ \\
& \quad \quad \quad +3,28\mu F_{\text{пр}}-0,026\mu D_3+2,64F_{\text{пр}}D_3
\end{aligned} \tag{5}$$

В четвёртой главе рассматривается изготовление отдельных инструментов и оборудования для проведения микровытяжки детали типа «Стаканчик». На рис. 8 представлена общая схема процесса и способа создания инструментов, используемых в процессе микроштамповки. Инструменты изготавливались двумя способами: при помощи механообработки и 3D-печати (рис. 9). Процесс микроштамповки тонких листовых заготовок включает в себя два основных процесса: процесс вырубki заготовки и процесс вытяжки. Необходимость выполнения той или иной доделочной операции (пост-обработка) определяется способом изготовления инструментов. Так, значительным отличием пост-обработки изделий после 3D-печати является удаление поддерживающих структур и работа над устранением остаточных напряжений, снимаемых отжигом. При наличии остаточных напряжений возникают коробления, нарушающие параллельность поверхностей и отклонение от соосности отверстий.

Также, в силу малости отдельно взятых элементов геометрии наблюдаются наплывы и нечеткие 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.

Рельеф поверхности (квази-текстура) инструментов не изменялся (рис. 10), т.е. механическая обработка поверхностей напечатанных инструментов не проводилась, так как данное обстоятельство является одной из потенциальных целей исследования, а именно – определение влияния рельефа поверхности на вытяжку стаканчика.

Проведенные исследования показали, что для инструмента с квази-текстурированной поверхностью применение небольшого количества смазки может как улучшить, так и ухудшить вытяжку стаканчика. На это также оказывает влияние размер исходной заготовки и точное, осесимметричное расположение заготовки перед вытяжкой. Оценка точности сборки, точности печати и износа проводилось при помощи оптического 3D-сканирования. На рис. 11 показана последовательность получения полигональной 3D-модели.

Эксперименты выполнялись как на напольной универсальной испытательной машине (номинальная сила до 100 тонн), так и на разработанном специализированном оборудовании настольного исполнения (номинальная сила до 1300 Н) Для проведения серии экспериментов был сконструирован и изготовлен испытательный стенд (рис. 12). Регистрация силы осуществляется на основании показаний миниатюрного датчика силы, максимальное заданное перемещение

гарантируется конечными выключателями, а осесимметричное расположение заготовки на матрице гарантируется специальными шаблонами-позиционерами.

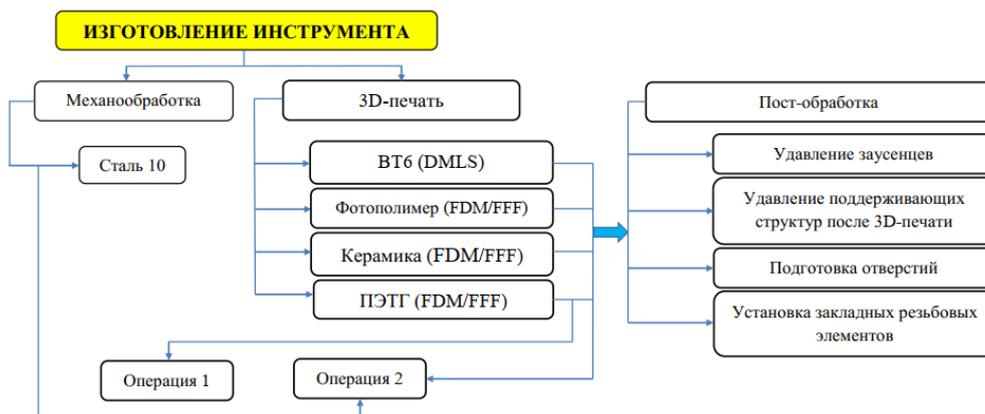


Рисунок 8. Общая схема проведения исследования микроштамповки: операция 1 – разделительная операция; операция 2– формообразующая операция.

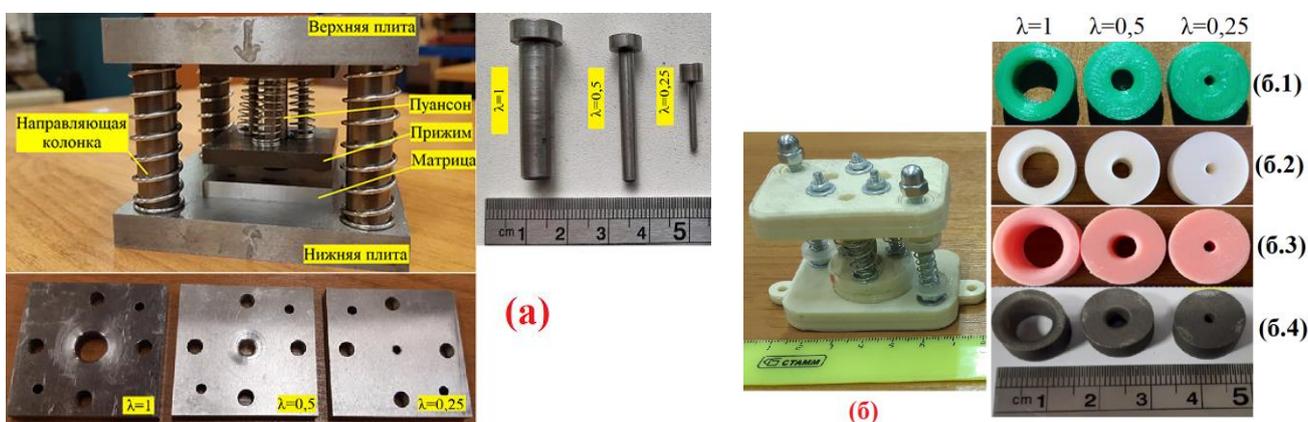


Рисунок 9. Инструменты, полученные методом механической обработки из стали 10 (а) и полиэтилентерефталат гликоля или сокр. ПЭТГ (б), а также матричные вставки из ПЭТГ (б.1), керамоподобного фотополимера или сокр. КПФП (б.2), базового фотополимера или сокр. БФП (б.3) и титанового сплава ВТ6 (б.4).

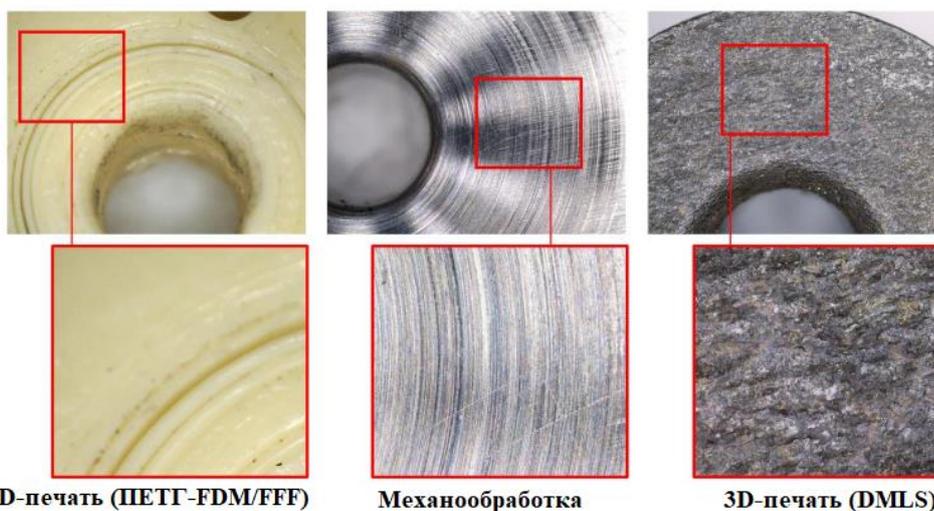
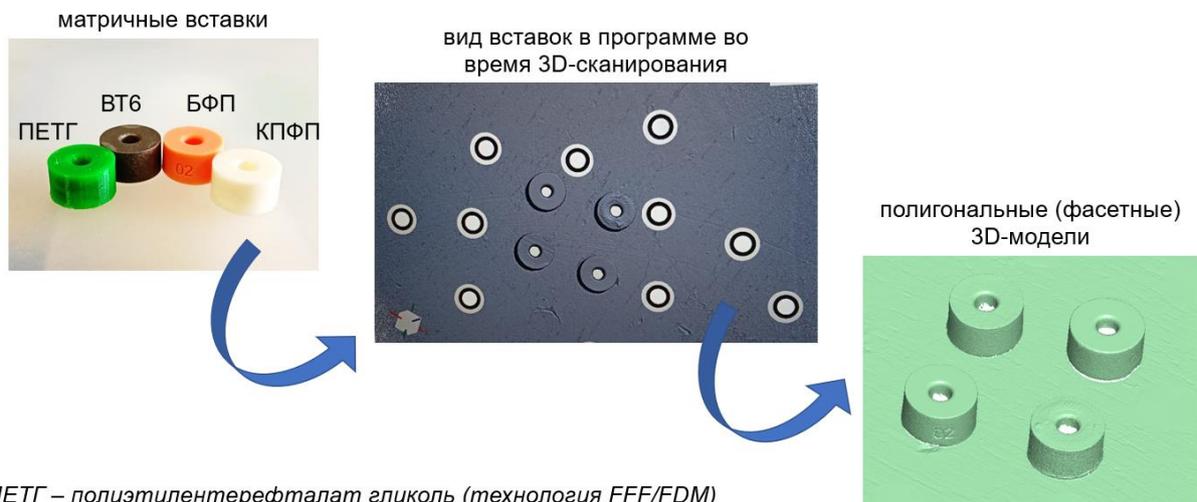
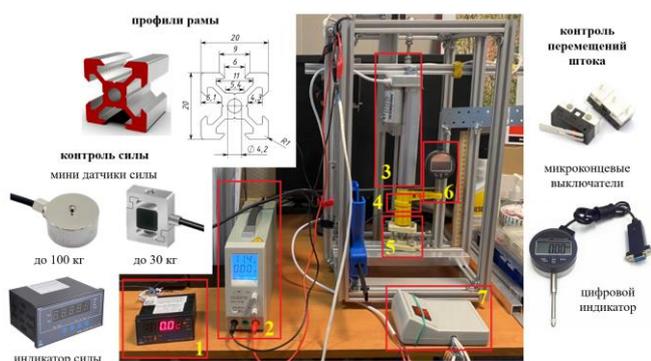


Рисунок 10. Общая схема проведения исследования микроштамповки



ПЕТГ – полиэтилентерефталат гликоль (технология FFF/FDM)
 VT6 – титановый сплав VT6 (технология DMLS/SLM)
 БФП – базовый фотополимер (технология LCD)
 КПФП – керамоподобный фотополимер (технология LCD)

Рисунок 11. Получение полигональных моделей



Параметры	Ед. изм-я	Значение
Номинальное напряжение	В	12
Скорость перемещения штока	мм/с	7
Длина штока	мм	150
Макс. сила	Н	1 300

Рисунок 12. Схема испытательного стенда и его технические характеристики: 1 – устройство измерения силы деформирования; 2 – источник питания; 3 – актюатор с механическим редуктором; 4 – датчик силы; 5 – инструмент, 6 – лапка и цифровой индикатор для измерения линейного перемещения; 7 – переключатель управления

В пятой главе исследуется износ инструмента в области ЗРМ, согласно схеме, представленной на рис. 13. Инструменты, используемые при микроштамповки, отличаются небольшими размерами и выдерживают высокое контактное давление, что приводит к износу или преждевременному выходу микроинструментов из строя. При помощи моделирования установлен характер изменения контактного давления между заготовкой и поверхностью инструмента (рис. 14–15). Процесс нагружения ЗРМ включает этапы от момента начала скольжения заготовки по радиусу скругления матрицы до ее завершения. Более того, износ является динамическим процессом, который зависит от геометрии инструмента, качества поверхности листа, свойств материала, параметров вытяжки, смазки и т.д. Сложность сочетания параметров процесса и свойств материала затрудняет точное прогнозирование потерь от износа инструмента. Криволинейная часть ЗРМ затрудняет оценку износа бесконтактным способом, например, при помощи 3D-сканирования.



Рисунок 13. Общая схема проведения исследования износа инструмента по формуле износа Арчарда

На рис. 15 показано распределение суммы всех контактных давлений на поверхности угла матрицы в течение всего процесса микроштамповки. Полученные результаты моделирования показали, что контактное давление в основном распределяется в двух основных точках по радиусу матрицы, образуя график из двух пиков.

Основной расчётной формулой оценки износа была принята формула Арчарда. Проведены эксперименты по износу поверхностей пар трения «материал заготовки – материал инструмента» по методу трансляционного перемещения стержня по пластине («pin-on-plate»). Области износа исследуемых материалов стержней показаны на рис. 16, а объём износа и коэффициент износа – на рис. 17 и 18, соответственно.

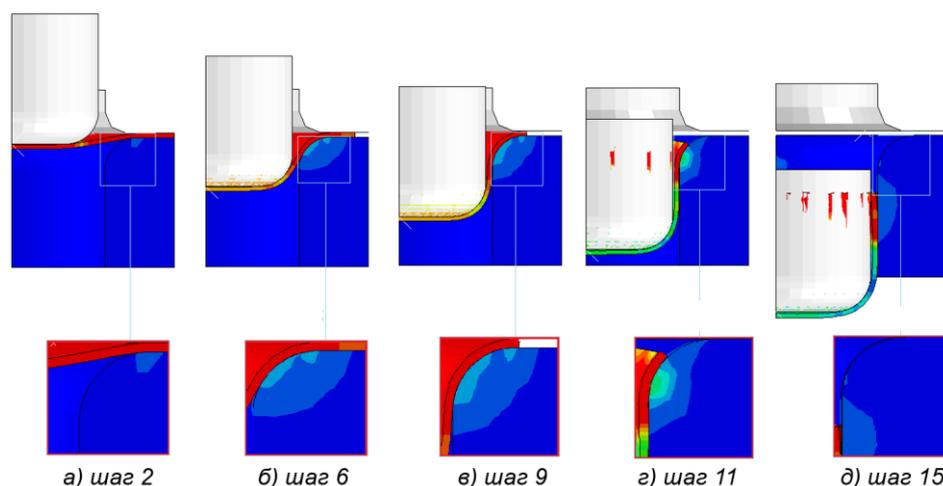
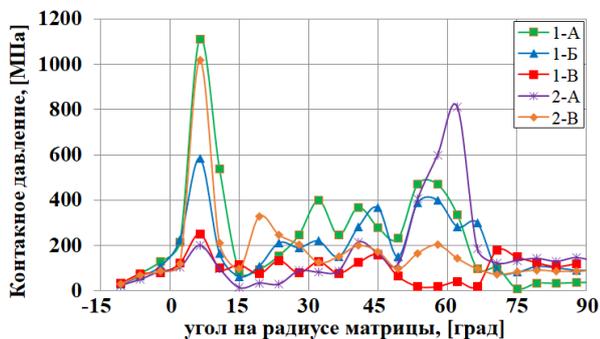


Рисунок 14. Процесс скользящего контакта между заготовкой и поверхностью радиуса скругления матрицы

Первый пик находится в положении от 8° до 12° градусов и достигает самого высокого значения при 10° . Второй пик находится в интервале $50^\circ \dots 70^\circ$ и достигает своего максимального значения при 60° . Для случая 1, распределение контактных давлений во всех местах на поверхности радиуса матрицы имеет тенденцию к уменьшению по мере уменьшения значения $R_{МК}$.



Случай	Вариант	$R_{МК}$	$R_{МЭ}$	
1 – для $R_{МК}$	А ($a < b$)	a	1	
		b	2	
1	Б ($a = b$)	a	1,5	
		b		
1 – для $R_{МК}$ 3 – для $R_{МЭ}$	В ($a > b$)	a	2	
		b	1	

Рисунок 15. Сравнение распределения контактного давления на поверхности по ЗРМ

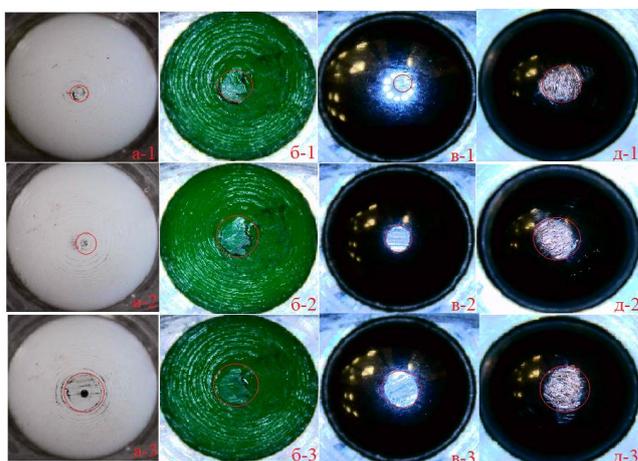


Рисунок 16. Анализ области износа шарик, измеренный с помощью цифрового микроскопа: а – КПФП, б – ПЭТГ, в – сталь 10, д – титан ВТ6 (длина пути (сверху-вниз): 1–100 м, 2–250 м, 3–500 м)

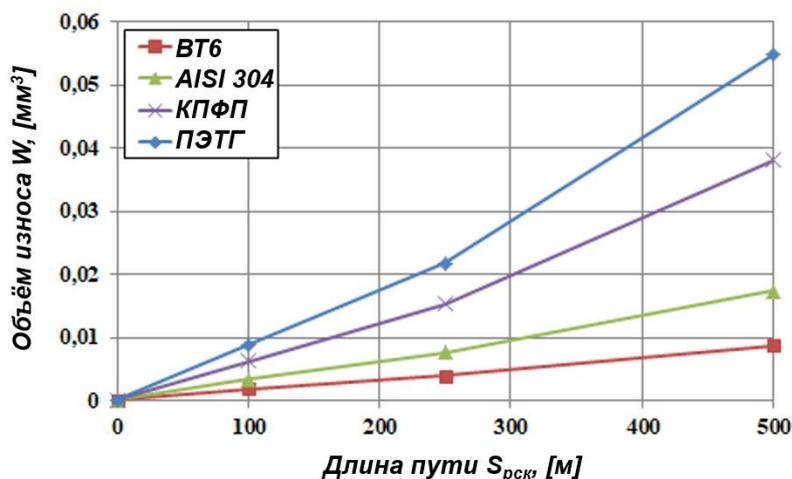


Рисунок 17. Объем материала, потерянного после испытаний по схеме «стержень по пластине» для различных материалов

Для случаев 2-А и 3-В по сравнению с базовым вариантом 1-Б наблюдается заметная разница. В случае 2-А распределение контактного давления сосредоточено в диапазоне $50^\circ \dots 65^\circ$ и достигает наибольшего значения при 60° , в то время как контактное давление по-прежнему распределяется в диапазоне от

8°...12°, но намного меньше, чем при 60°. Случай 3-В противоположен случаю 2-А.

Из результатов моделирования в сочетании с моделью исследования износа Арчарда видно, что область, подверженная наибольшему поверхностному давлению, и степень износа инструмента зависят от геометрии ЗРМ при одном и том же материале и условиях процесса.

Исследования по контролю шероховатости поверхности матрицы после 3D-печати образца («as-printed») проводились на двух электронных измерительных приборах TR210 и Mahr Marsurf M400, для разных длин измерения.

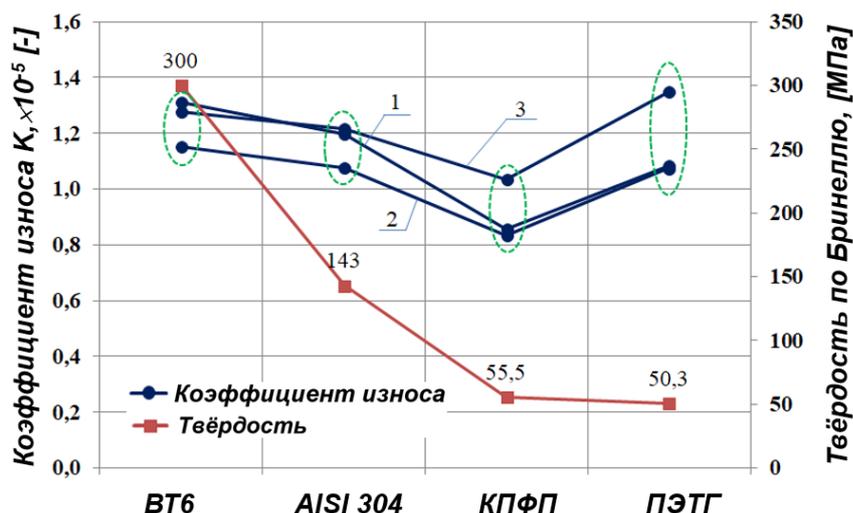
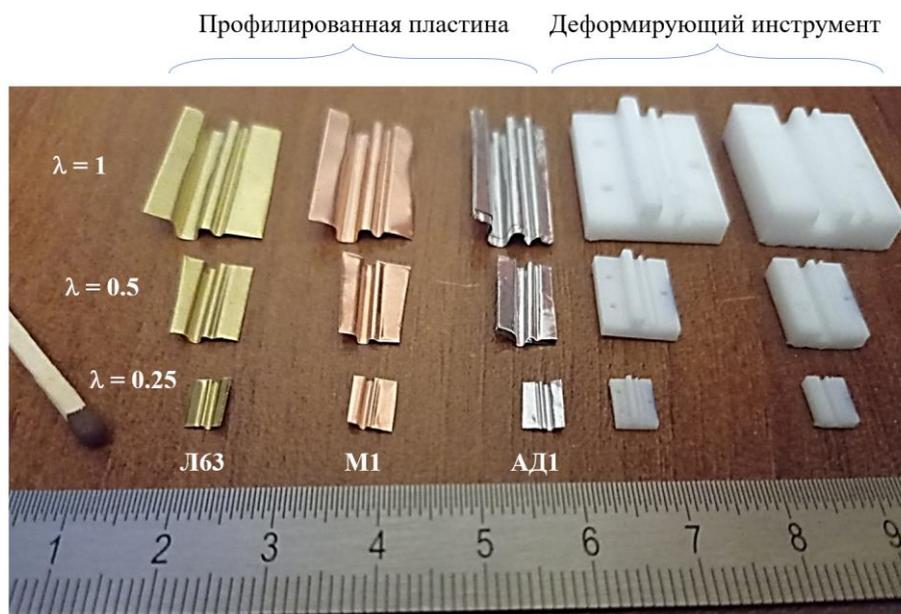


Рисунок 18. Коэффициент износа и поверхностная твердость материалов (длина пути: 1–100 м, 2–250 м, 3–500 м)

И, наконец, в **шестой главе** приводятся результаты натурных испытаний. Технология направлена на мелкосерийное производство и обработки новых технологий микродеформирования (микроформовка, микровырубка и т.д.). Рассматривается режим деформирования в условиях сухого трения (рис. 19).



а)

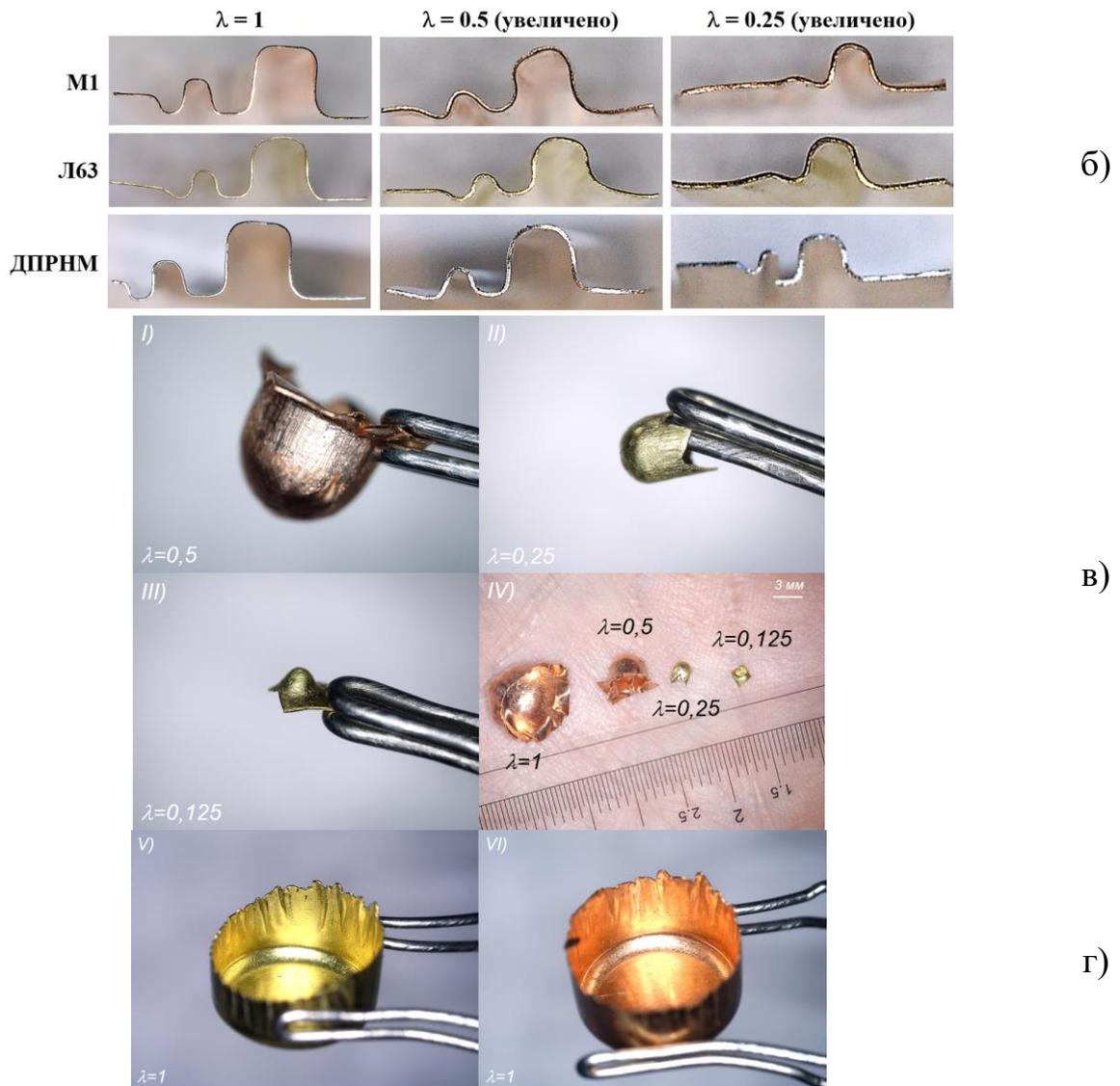


Рисунок 19. Примеры полученных микроизделий: профилированные пластины (а, б); осесимметричные детали, без прижима (в, I–M1, II и III–Л63, IV–сравнение геометрии); осесимметричные детали, с прижимом (г, V–Л631, VI–M1)

Поверхность изготовленного инструмента не модифицировалась, так как опираясь только на выступы текстуры у заготовки снижается общая площадь контакта и, соответственно, сила трения, что позитивно сказывается на вытяжке. При профилировании пластин наблюдается сильное изменение профиля для M1 и Л63 при $\lambda=0,5$ и $\lambda=0,25$. Получение осесимметричных изделий также носит неоднозначный характер, так как с уменьшением размеров изменяется и допустимый коэффициент вытяжки. Кроме этого, применяемые пунсоны для $\lambda=0,125$ теряют устойчивость и изгибаются, что не позволяет изготовить деталь с высотой более 2 мм. Микровытяжка может быть выполнена как с прижимом, так и без него.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

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 (μ), 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 (λ) 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.

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.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

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, 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, 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, 2024-2025 (**ВАК, в печати**).

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**).

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**).