

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

На правах рукописи



ПРАСОЛОВА АНАСТАСИЯ АНВАРОВНА

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ДИАПАЗОНА
РАБОТОСПОСОБНОСТИ ФОСФАТНОГО ПОКРЫТИЯ
ПРИ ХОЛОДНОМ КОМБИНИРОВАННОМ ВЫДАВЛИВАНИИ
СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК**

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность 2.5.7 – Технологии и машины обработки давлением

Научный руководитель –
д-р техн. наук, проф.,
Соболев Яков Алексеевич

Москва – 2022

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОЦЕССОВ КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ	11
1.1 Показатели качества деталей, изготовленных холодным выдавливанием.....	11
1.2 Достоинства и недостатки процесса холодного выдавливания..	12
1.3 Тепловыделение на границе деталь инструмент при холодном выдавливании стальных деталей.....	13
1.4 Устранение налипания за счет использования технологических покрытий.....	19
1.5 Основные выводы и постановка задач исследования	31
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ФОСФАТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ГРАНИЦЕ ДЕТАЛЬ - ИНСТРУМЕНТ.....	34
2.1 Исследования слоя технологического покрытия.....	34
2.2 Определение температурной зависимости показателя трения на границе деталь-инструмент	37
2.2.1 Выбор метода исследования, допущения	37
2.2.2 Формулы для расчета и результаты экспериментального исследования.....	44
2.3 Выводы к главе 2.....	48
ГЛАВА 3. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ РАЗОГРЕВА ДЕТАЛИ ПРИ ШТАМПОВКЕ.....	50
3.1 Исследование температуры разогрева детали при штамповке..	50
3.1.1 Установление теплового эффекта деформации теоретическим путем.....	50
3.1.2 Нахождение средней температуры детали экспериментально	58
3.1.3 Сопоставление результатов и выводы.....	71
3.2 Определение температуры поверхностного слоя детали за счет тепловыделения на границе деталь-инструмент.....	73
3.3 Выводы к главе 3.....	93
ГЛАВА 4. МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТА НА СТАЛЬНОЙ ДЕТАЛИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ.....	94
4.1 Исходные данные и допущения, принятые при построении математической моде-	94

ли.....	
4.2 Расчет силы деформирования для производства стальной детали	105
4.3 Выводы к главе 4.....	107
ГЛАВА 5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ДЕТАЛИ «КОРПУС».....	108
5.1 Стальная деталь «Корпус».....	108
5.1.1 Область применения детали «Корпус»	108
5.1.2 Технические требования к стальной детали «Корпус».....	109
5.1.3 Технические требования к технологическому процессу изготовления стальной детали «Корпус».....	109
5.2 Проектирование технологического процесса изготовления стальной детали «Корпус».....	111
5.3 Внедрение разработанного технологического процесса на предприятии.....	121
5.4 Выводы к главе 5.....	122
Заключение	123
Список литературы.....	125
Приложения.....	134

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

Обработка металлов давлением является основой многих прогрессивных ресурсосберегающих технологий. Холодная объемная штамповка (ХОШ) широко используется в штамповочном производстве. Применение ХОШ совместно с другими штамповочными операциями позволяет получить законченные детали, не требующие дальнейшей обработки резанием. Штампованные детали отличаются повышенной точностью и чистотой поверхности, контуром, а также повышенной прочностью в результате упрочнения при холодной деформации [75]. К таким деталям относятся корпусные детали. Осесимметричная деталь «Корпус» изготавливается холодной объемной штамповкой, методом комбинированного выдавливания и классифицируется как простое тело вращения. При комбинированном выдавливании стальной детали «Корпус» формирование изделия происходит за счет осадки материала, прямого и обратного выдавливания.

Тепловыделение на границе деталь-инструмент при ХОШ вызывает необходимость применения технологических покрытий, выполняющего также роль технологической смазки. После получения штампованной детали покрытие удаляется с её поверхности. Наиболее эффективной технологией при холодной объемной штамповке стальных деталей является фосфатирование заготовок с последующим омыливанием. В отдельных случаях наблюдается разрушение технологического покрытия, что приводит к увеличению удельных нагрузок на отдельных участках деталей и появлению на поверхности деталей надрывов и налипания деформируемого металла на рабочие части штампа.

Предположительно причиной появления подобных дефектов является нарушение оптимального теплового режима работы фосфатного слоя.

При всем многообразии исследовательских работ, посвященных холодной объемной штамповке стальных деталей, этому вопросу ранее не было уделено достаточного внимания; публикаций, относящихся к упомянутой проблеме, практически нет. Технология, обеспечивающая крайне низкое значение показателя тепловыделения на границе деталь-инструмент и крайне низкую долю теплоты, выделяющейся от тепловыделения на границе деталь-инструмент в общем балансе теплового эффекта, может привести к таким явлениям, как разогрев тонкого контактного слоя детали до значений температуры, приводящих к его разрушению и появлению бра-

ка. Как следствие, снижение точности получаемой детали, определяемой формой, размерами и шероховатостью её поверхности.

Таким образом, актуальной **научной-технической задачей** является теоретическое и экспериментальное обоснование температурного диапазона работоспособности покрытия при холодном комбинированном выдавливании стальных заготовок.

Цель работы: повышение геометрической точности стальных фосфатированных деталей при холодном комбинированном выдавливании путем научного обоснования температурного диапазона работоспособности фосфатного покрытия, выполняющего роль технологической смазки и наносимого на поверхность заготовки перед выполнением операции пластического формоизменения.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены и решены следующие **задачи исследований:**

1. Установить влияние деформационного взаимодействия на границе деталь – инструмент и пластической деформации заготовки на температуру разогрева фосфатного покрытия, определяющую его свойства и качество штампуемой детали «Корпус».

2. Определить среднюю температуру разогрева детали при ее деформировании операцией комбинированного выдавливания теоретически и экспериментально с использованием прямого измерения температуры современным средством измерительной техники.

3. Установить температурный диапазон работоспособности технологического покрытия при комбинированном выдавливании детали «Корпус» теоретическим путем.

4. Разработать практические рекомендации по проектированию технологического процесса и выбору прессового оборудования, обеспечивающие качественное функционирование фосфатного покрытия и позволяющие изготавливать стальную деталь «Корпус», удовлетворяющие технологическим требованиям на производимый конечный продукт.

Степень разработанности.

Внимание многих уделено теоретическому и экспериментальному анализу операций холодной объемной штамповки, определению и вычислению технологической силы, которая зависит от вида напряжённо-деформированного состояния и показателя деформации, технологического покрытия, геометрии рабочего инструмента, и т.д. Эти и другие вопросы были рассмотрены в работах: А.Л. Воронцова,

А.Э. Артеса, О.А. Ганаго, В.А. Головина, Р. Хилла, И.П. Ренне, В.В. Евстифеева, Г.Д. Фельдмана, А.З. Журавлёва, А.Д. Томленова, Г.И., Ю.А. Алюшина, С.М. Колесникова, Ф.А. Коммеля, А.А. Коставы, Э. Томсена, Д.П. Кузнецова, В.А. Евстратова, А.Д. Матвеева, Г.А. Навроцкого, А.И. Хыбемяги, Р.И. Непершина, А.Г. Овчинникова, Л.Д. Оленина, Ю.С. Сафарова, Е.И. Семёнова, Л.Г. Степанского, Г.Я. Гуна, А.Н. Митькина, Е.П. Унксова, В.Е. Фаворского, Ю.Ф. Филимонова, В.А. Огородникова, Ю.К. Филиппова, В.Я. Шехтера, Л.А. Шофмана, Б. Авицура, У. Джонсона, А.М. Дмитриева, Ч. Янга и др. [3; 5; 10; 22; 25; 27; 30; 47; 54; 58; 61; 68; 69; 74; 78].

Объект исследования.

Процесс холодного комбинированного выдавливания изделия с технологическим покрытием.

Предмет исследования.

Температурные пределы разогрева фосфатного покрытия на стальных заготовках при холодной объемной штамповке, превышение которых приводит к разрушению технологического покрытия и ухудшению качества поверхности изготавливаемых деталей.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Работа соответствует формуле специальности 2.5.7 – «Технологии и машины обработки давлением (технические науки) в области исследования «Закономерности деформирования материалов и повышения их качества при различных термомеханических режимах, установление оптимальных режимов обработки.» в полном соответствии с п.1 паспорта специальности.

Методология и методы диссертационного исследования.

В работе проводились экспериментальные исследования по разрушению фосфатного слоя при помощи металлографии поверхностного слоя стальных деталей на оптическом микроскопе с камерой DCM800. Измерение температуры осуществлялось датчиком CSmiHS-SF15-C4, фиксирующим инфракрасное излучение фирмы MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GmbH&Co. KG. Осадка кольцевых образцов из стали 20 производилась на гидравлическом прессе ДО138Б с предварительным нагревом в муфельной печи с программатором USA V-95L-0918. Замеры шероховатости исследуемой поверхности детали «Корпус», выполненные с применением прибора профилограф-профилометр «Калибр 170311».

Расчет диаграмм «сила-путь» при осадке, прямом и обратном выдавливании выполнен на ЭВМ методом конечных элементов с использованием программы

Qform 2D. Расчет средней температуры разогрева детали осуществлен путем решения дифференциальных уравнений в программе MATLAB, учитывающих тепловой эффект от пластической деформации.

Автор защищает:

- научно-обоснованный подход при определении температуры поверхностного слоя детали за счет тепловыделения на границе деталь-инструмент;
- научно-обоснованный алгоритм расчета приращения температуры на границе деталь-инструмент;
- алгоритм расчета технологических параметров комбинированного выдавливания без налипания заготовки на инструмент;
- технологический процесс комбинированного выдавливания стальной детали «Корпус».

Научная новизна:

1. Установлено влияние деформационного взаимодействия на границе деталь – инструмент и пластической деформации заготовки на температуру разогрева фосфатного покрытия, определяющую его свойства и качество деталей, получаемых холодным комбинированным выдавливанием, в частности, детали «Корпус».

2. Получено дифференциальное уравнение, численное решение которого позволяет определить среднюю температуру разогрева детали при ее пластическом формоизменении, в том числе за счет осадки, прямого, обратного выдавливания и комбинированного выдавливания.

3. Разработан алгоритм расчета приращения температуры на границе деталь-инструмент, позволяющий определить температуру тонкого контактного слоя в момент формоизменения и, как следствие, установить температурный диапазон работоспособности технологического покрытия при холодном комбинированном выдавливании детали «Корпус».

Достоверность подтверждается:

- 1) применением в теоретических исследованиях фундаментальных положений теории пластичности и теории теплопроводности;
- 2) использованием современной экспериментальной и вычислительной техники, а также незначимыми расхождениями результатов экспериментов с результатами теоретических исследований;
- 3) успешным применением полученных результатов при разработке технологических процессов в производстве.

Теоретическая значимость работы.

Получены аналитические зависимости для определения температуры деформируемых заготовок, учитывающие увеличение температуры от работы пластической деформации и тепловыделение на границе деформационного взаимодействия деталь-инструмент.

Практическая значимость работы.

1. Разработаны практические рекомендации по проектированию технологического процесса и выбору прессового оборудования, обеспечивающие качественное функционирование технологического покрытия и позволяющие изготавливать стальную деталь «Корпус», удовлетворяющую технологическим требованиям на производимый конечный продукт.

2. Разработаны технологические режимы по обеспечению оптимальных условий работы фосфатных покрытий на стальных заготовках в технологическом процессе комбинированного выдавливания, повышающие качество изготавливаемых деталей на основе теоретических расчетов, выполненных в данной диссертационной работе.

3. Разработана имитационная модель холодного комбинированного выдавливания, включающая полученные в работе экспериментальные данные о зависимости фактора трения от температуры пластически деформируемого материала, позволяющая оценить силовые параметры проектируемого технологического процесса и спрогнозировать тепловыделение на границе деталь-инструмент.

Реализация работы.

Результаты работы приняты к внедрению в производство при изготовлении детали «Корпус» на предприятии ООО «Вектор», г. Реутов. Благодаря учету предложенных рекомендаций, повышена стойкость рабочего инструмента, в значительной мере уменьшен брак и уменьшены экономические затраты (Приложение В - Акт о внедрении результатов НИР в производство). Результаты исследований используются в учебном процессе в вузе (Приложение В - Акт внедрения в учебный процесс Московского Политехнического Университета результатов диссертационной работы).

Апробация работы.

Результаты исследований доложены на следующих конференциях.

1. Международная научно-техническая конференция "Современные технологии обработки материалов давлением: моделирование, проектирование, производство», посвящённой 70-летию кафедры «Машины и технологии обработки ме-

таллов давлением» им. И.А. Норицына. Москва, Университет машиностроения (МАМИ), 23–25.09.2013г.

2. III Международная научно-техническая конференция «Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов давлением». «ТулГУ», 8-10 октября, 2014 г.

3. 11-я Международная молодежная научная конференция «Молодежь и XXI век - 2021» (МЛ-50). Курск, Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ), 18-19 февраля, 2021 г.

4. III Международная научно-техническая конференция «Павловские чтения», посвященная 120-летию со дня рождения член-корреспондента АН СССР И.М. Павлова. Москва, ИМЕТ РАН, 25-26.02.2021 г.

Публикации.

Основное содержание работы изложено в 7 печатных работах, в том числе 5 из которых опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в список ВАК.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, основных результатов и выводов, списка использованной литературы из **83** наименования и включает **177** страниц машинописного текста, содержащего **79** рисунков, **13** таблиц, **3** приложения на **44** страницах.

В первой главе дан обзор имеющихся в настоящее время исследований, посвященных теме настоящей работы: перечислены преимущества и недостатки ХОШ стальных деталей, описаны кинематические признаки тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент. Также приведены законы трения, используемые в теории обработки металла давлением. Составлен план работы, поставлена ее цель и задачи.

Вторая глава посвящена установлению оптимального температурного интервала работы фосфатного покрытия. Изучение микроструктуры, методом микроструктурного анализа, фосфатного покрытия с омыливанием, показывает, что, нагрев детали до температуры выше 100°С приводит к уменьшению толщины технологического покрытия; однако получить какие-либо количественные результаты таким способом не удалось. Поэтому для определения влияния температуры нагрева детали на тепловыделение при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент был использован метод осадки кольцевых образцов. Попутно метод был подвергнут усовершенствованию: во-первых, установлена реальная форма нейтрального слоя кольца, отличная от принятого авторами способа строго цилиндрической формы; во-вторых, учтено упрочнение материала кольцевых образцов,

что, в конечном итоге, повысило точность определения тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент.

В результате получена зависимость тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент от температуры разогрева детали, что позволило найти значение температуры, превышение которой могло бы привести к разрушению фосфатного слоя и к появлению брака.

В третьей главе расчетным и экспериментальным путем определена реальная температура разогрева детали в результате тепловыделения при деформации, в том числе и с учетом неравномерности распределения температуры по сечению деформируемой заготовки, при различных скоростных режимах штамповки и на различных видах оборудования.

Четвертая глава посвящена исследованию образования дефекта.

Пятая глава посвящена разработке различных практических шагов, которые могли бы способствовать предотвращению появления брака. Рекомендации по совершенствованию технологии ХОШ внедрены в производство.

В заключение приведены основные результаты и общие выводы по диссертации.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОЦЕССОВ КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Подготовка новых технологических решений требует рассмотрения существующих методов изготовления определённого ряда изделий, в данном случае осесимметричных стальных корпусов для кумулятивных зарядов (рисунок 1); выявление достоинств и недостатков существующих методов по изготовлению подобных изделий, по сравнению с намеченным для исследования методом.

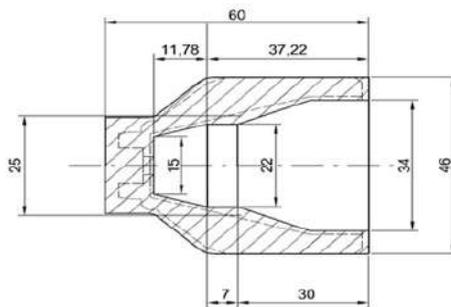


Рисунок 1 – Деталь «Корпус»

Процесс холодного выдавливания основан на использовании пластических свойств металлов; представляет формоизменение заготовки за счет всестороннего сжатия металла с течением его наружу, в незамкнутую полость штампа. От других подобных малоотходных методов эта технология отличается высокой стабильностью технологического процесса и качеством детали [44].

Одна из основных задач проектирования технологии состоит в выборе метода формообразования, расчленении процесса на элементарные операции, выборе последовательности или совмещении операций, определении характера формоизменения за каждый переход, выборе размеров и формы заготовки [10; 28; 66].

1.1. Показатели качества деталей, изготовленных холодным выдавливанием

Показатель качества продукции количественно характеризует пригодность продукции удовлетворять определенные потребности. Номенклатура показателей качества зависит от назначения продукции. Показатель качества продукции может выражаться в различных единицах или быть безразмерным по ГОСТ 15467-79.

При рассмотрении показателя качества продукции различают:

- наименование показателя;
- численное значение показателя, которое может изменяться в зависимости от различных условий.

Технико-экономическое понятие «качество продукции» охватывает только те свойства продукции, которые связаны с возможностью удовлетворения продукцией

определенных общественных или личных потребностей в соответствии с ее назначением.

Качество продукции зависит от качества составляющих ее изделий и материалов. Если продукция состоит из изделий машиностроения, то к свойствам, определяющим качество продукции, относятся свойства отдельных изделий, а также такие свойства совокупности изделий (деталей) как:

- однородность структуры;
- точность размеров;
- шероховатость поверхности;
- точность формы и т.д.

1.2. Достоинства и недостатки процесса холодного выдавливания

В зависимости от типа и конструкции детали применяются следующие способы холодного выдавливания: прямой, обратный, поперечный, комбинированный.

Достоинства холодного выдавливания:

- стабильность размерной точности и качества поверхности;
- упрочнение металла, позволяющее использовать для изготовления деталей с заданной прочностью более пластичные материалы с меньшим сопротивлением деформации и обеспечивать определенное соотношение механических характеристик без применения термической обработки;

- благоприятное расположение волокна, что повышает эксплуатационные свойства деталей;

- минимальные припуски на последующую механическую обработку;
- относительно низкая трудоемкость при изготовлении деталей;
- высокий уровень производительности;
- улучшение внешнего вида детали.

Холодное выдавливание имеет преимущества перед методами обработки металла, предполагающими обязательную термообработку. При данном методе обработки не возникает необходимости в нагреве исходных материалов и инструментов. В результате холодного выдавливания поверхность заготовки не окисляется, благодаря чему полученные детали отличаются большей прочностью и точностью размеров, меньшей шероховатостью поверхности. Результатом подобной обработки становятся качественные детали с высокими и стабильными механическими свойствами. Отсутствие термообработки означает и отсутствие окалины, которая образуется

на поверхности деталей при нагреве, кроме того, из общего химического состава поковок не уходит углерод.

К недостаткам процесса холодного выдавливания можно отнести:

- высокие нагрузки на инструмент;
- не все материалы могут обрабатываться из-за недостаточной пластичности в холодном состоянии или высокой прочности;
- пластичность металла снижается с увеличением степени формоизменения, что вызывает необходимость ограничивать степени деформации, а также вводить в технологический процесс операции термообработки для снятия упрочнения и промежуточные операции подготовки поверхности детали с целью предотвращения их схватывания с инструментом и снижения сопротивления сил тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент;
- для снижения нагрузок на инструмент необходимо применять высокоэффективные технологические покрытия, без которых не только уменьшается его стойкость, но зачастую его нормальная работа вообще невозможна из-за его разрушения [1; 2; 31].

1.3. Тепловыделение на границе деталь инструмент при холодном выдавливании стальных деталей

Процесс контактного теплообмена не мог быть правильно и всесторонне раскрыт ранее, при относительно слабом развитии многих отраслей промышленности. В настоящее время, благодаря достигнутым успехам в развитии науки и техники, возникает возможность глубоко изучить передачу тепловой энергии через контакт двух твердых тел. Раскрытие сущности этого теплофизического явления лежит на стыке таких областей науки, как физика твердого тела, теплофизика, газодинамика, теплопередача и др., и дает возможность ответить на многие интересующие практику вопросы [16; 22].

В работе Нуссельтона изложены результаты исследований термического сопротивления на стыке двух плотно соприкасающихся поверхностей металлов. Но вывод о том, что в месте стыка поверхностей отсутствует заметное контактное термическое сопротивление, был сделан ошибочный. Такое положение может быть лишь теоретическим – при идеальном контакте двух металлов [43].

Поверхность твердого тела волниста и шероховата. Более грубые поверхности металла, которые встречаются в машиностроении, имеют микровыступы высотой

100 ÷ 200 мкм, которые располагаются на волнистой поверхности. Под влиянием сжимающей нагрузки шероховатость поверхности меняется вследствие неоднородности механических свойств поверхности. Неточности при деформировании деталей, искажение формы от приложенных нагрузок, температуры, шероховатость и волнистость приводят к тому, что две поверхности контактируют на отдельных небольших площадках, причем вследствие волнистости эти площадки расположены в разных определенных областях. Число контактов зависит как от нагрузки, так и от шероховатости поверхностей. Давление на контактах распределено неравномерно и зависит от конфигурации [9].

Когда одна поверхность скользит по другой, то касание осуществляется лишь в отдельных точках, которые весьма непродолжительное время находятся в контакте. Понятие контакта двух твердых тел является довольно условным и зависит от действия, которое необходимо произвести одним телом на другое. Существует механический контакт, представляющий собой совокупность точек, через которые передается давление. Время существования единичного пятна может составлять $10^{-7} \div 10^{-8}$ с. На единичном пятне возникают кратковременные единичные температурные вспышки. Образующаяся теплота распределяется между потребителями: контактирующими телами и окружающей средой. Температура «вспышки» может достигать значительной величины, что влияет на тепловыделение при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент [36].

При анализе процесса тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент и износ необходимо различать три этапа:

- 1) соприкосновение поверхностей;
- 2) изменения, которые происходят на соприкасающихся поверхностях в процессе деформационного взаимодействия, приводящего к нагреву на границе деталь-инструмент;
- 3) налипание деформируемого металла на инструмент с последующим вырывом частиц металла.

Состояние поверхности инструмента – это важнейший показатель взаимодействия инструмента с заготовкой. Его влияние определяется двумя факторами: шероховатостью (микрорельефом) поверхности инструмента и присутствием на поверхности налипших частиц деформируемого металла, частиц окалина и других загрязнений.

Шероховатость на поверхности инструмента достаточно сильно влияет на тепловыделение при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент,

так как изменяется величина механической составляющей этих сил. С увеличением высоты неровностей, внедряющихся в металл при деформации, растет сопротивление сдвигу. Также влияют и твердые частицы, которые находятся на поверхности инструмента (частицы окалины). При попадании их в зону тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент, они играют так называемую роль шипов, ужесточая при деформации механическое сцепление.

Налипание металла на инструмент способствует молекулярному схватыванию поверхностей.

В зависимости от формы и размеров деформирующего инструмента, его механических свойств, требований к чистоте поверхности деталей и ряда других условий рабочие поверхности инструмента обрабатывают различным способом — точением, строганием, фрезерованием, шлифованием, полированием, слесарным инструментом вручную. Реже применяют электроискровую обработку, обдувку дробью, обкатку роликом, нанесение гальванического покрытия, напыление и некоторые другие [9].

В процессе работы в результате износа шероховатость инструмента изменяется, в большинстве случаев она возрастает. Иногда, при холодной деформации с применением технологических покрытий, наблюдается выглаживание поверхности инструмента в процессе работы.

Со временем, в процессе эксплуатации штампа на поверхности инструмента образуются различные дефекты: выкрашивания, трещины (в виде сетки) и отдельные налипания, царапины и др. Присутствие таких отрицательных дефектов вызывает регулярную необходимость зачистки поверхности штампа или его полную замену. Особенно сильное влияние на тепловыделение при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент, оказывает налипание частиц деформируемого металла на инструмент [6; 18; 41; 49].

На контакте металла с инструментом в любой момент времени деформации должно соблюдаться условие

$$q_3 + q_0 = q_w, \quad (1.3.1)$$

где q_3 и q_w – тепловые потоки из заготовки в штамп; q_0 – удельная мощность теплового источника на контакте [39].

При относительном скольжении двух соприкасающихся поверхностей вследствие упругих и пластических деформаций контактирующих пятен и преодоления молекулярного взаимодействия макродвижение переходит в микродвижение, упорядоченное движение в хаотическое, т.е. в тепловое.

В точках дискретного контакта возникают температурные всплески – теплота распространяется с одной стороны вглубь тела (теплопроводность), с другой стороны рассеивается в окружающую среду (радиация и конвекция) [36; 43].

В непосредственной близости от точек контакта образуются отдельные полушаровые изотермические поверхности, сливающиеся в общую поверхность на некоторой глубине тела (рисунок 1.3.1). Расположение изотермических поверхностей характеризует величину температурного градиента.

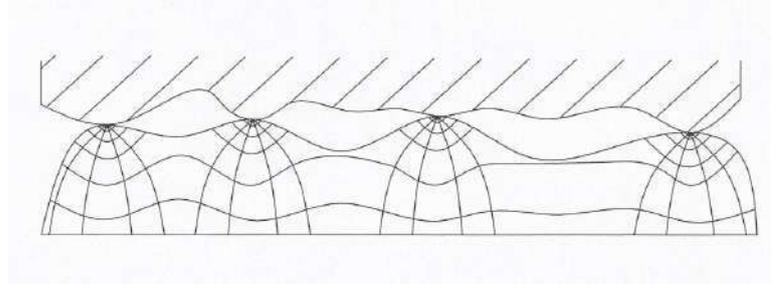


Рисунок 1.3.1 – Температурное поле поверхностного слоя при тепловыделении при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент

Сложность расчета температурного поля обусловлена теплоотдачей в окружающую среду с боковых стенок и трудностью определения граничных условий.

Следует учесть, что теплота генерируется в поверхностном слое – в зоне, которая подвергается интенсивной деформации. Вглубь материала теплота распространяется путем теплопроводности.

Если рассматривать штамп и деталь как полу бесконечные тела, помещенные в среду, температура которой является некоторой функцией времени, то можно определить температуру штампа в зависимости от координаты y и времени τ . Однако найти в этом случае распределение температуры в аналитическом виде трудно. Если же принять температуру поверхности штампа во времени постоянной ($t_c = const$), то

$$T_{ш}(y, \tau) = T_c + \left(\bar{T}_ш - T_c \right) \operatorname{erf} \frac{y}{2\sqrt{a_{ш}\tau}}; \quad (1.3.2)$$

$$T_3(y, \tau) = T_c + \left(\bar{T}_3 - T_c \right) \operatorname{erf} \frac{y}{2\sqrt{a_3\tau}}; \quad (1.3.3)$$

где $T_{ш}(y, \tau)$ и $T_3(y, \tau)$ – температура штампа и заготовки в приконтактной зоне;

$\bar{T}_ш$ и \bar{T}_3 – температура штампа и заготовки вдали от контактной поверхности; $a_{ш}$ и

a_3 – коэффициенты температуропроводности штамповой стали и материала заготовки [39].

В общем случае температурное поле может быть охарактеризовано графиком, изображенным на рисунке 1.3.2.

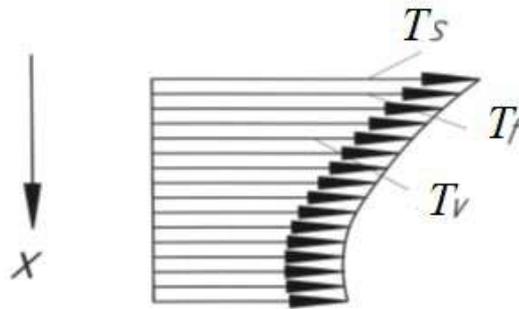


Рисунок 1.3.2 – Распределение температуры по глубине поверхностного слоя
Здесь

T_f – температура тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент (температура возникающая в зоне деформации);

T_s – объемная температура (температура ниже зоны деформации);

T_v – контактная температура (температура в зоне контакта).

Поверхностная и контактная температуры объединяются общим термином «граничная температура» [35].

Теплопроводность – передача теплоты от первого тела ко второму или от первой части тела ко второй, находящегося в соприкосновении с первым. Любое физическое явление, а также и процесс теплопередачи, происходит в пространстве и во времени. Следовательно, аналитическое исследование теплопроводности сходится к изучению пространственно-временных изменений основной физической величины – температуры, характерной для данного явления, т.е. к нахождению уравнения

$$T = f(x, y, z, \tau), \quad (1.3.4)$$

где x, y, z – пространственные координаты в декартовой системе, τ – время.

Сумма мгновенных значений температуры в точках изучаемого пространства является температурным полем, так как температура является величиной скалярной, и, следовательно, температурное поле является скалярным полем [40].

Различают два вида: стационарное и нестационарное температурное поле.

Нестационарное температурное поле - это такое поле, температура которого изменяется в пространстве и с течением времени, или, говоря образно, «температура есть функция пространства и времени» (неустановившееся состояние). Уравне-

ние (1.2.4) является математической записью нестационарного температурного поля.

Стационарное температурное поле - это такое поле, температура которого в любой точке не меняется во времени, то есть является функцией координат (установившееся состояние):

$$T = \Phi(x, y, z), \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0. \quad (1.3.5)$$

Температурное поле, которое соответствует уравнению (1.3.4) или (1.3.5), является пространственным, так как t есть функция трех координат.

Необходимым условием для распространения теплоты является наличие температурного градиента [39]. Изменение температурного поля по пространству наблюдается лишь в направлениях, пересекающих поверхности одинаковой температуры (изотермические поверхности); причем наиболее резкое изменение имеет место в направлении нормали к изотермической поверхности (рисунок 1.3.3) от мест с наибольшей температурой к местам с наименьшей температурой [67].

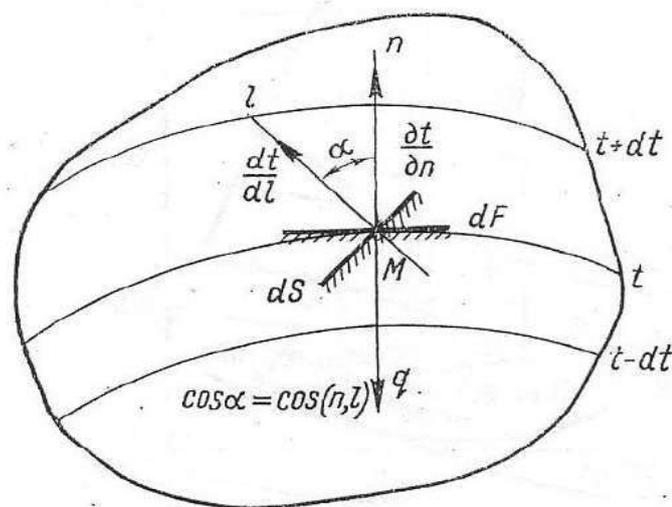


Рисунок 1.3.3 – Изменение температурного поля (к определению градиента температуры и формулировке закона Фурье).

Количество теплоты, проходящее за определенное количество времени и отнесенное к единице площади изотермической поверхности, является плотностью теплового потока, а соответствующий вектор определяется соотношением:

$$\mathbf{q} = (-n_0) \frac{dQ}{d\tau} \frac{1}{S}, \quad (1.3.6)$$

где $\frac{dQ}{d\tau}$ – скорость теплового потока, S – площадь изотермической поверхности, $(-n_0)$ – единичный вектор, направленный по нормали к поверхности S в сторону уменьшения температуры.

Вектор q называется вектором теплового потока, направление которого противоположно температурному градиенту (оба вектора направлены по нормали к изотермической поверхности, но в разные стороны).

Основной закон теплопроводности может быть сформулирован так: плотность теплового потока прямо пропорциональна напряженности температурного поля или плотность теплового потока прямо пропорциональна градиенту температуры, т.е.

$$q = \lambda E = -\lambda \text{grad}T = -\lambda \nabla T = -\lambda n_0 \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (1.3.7)$$

где λ – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплопроводности [40].

Тепловыделение при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент в значительной мере определяет деформационный и энергоскоростной режимы обработки давлением металлов и сплавов, а также стойкость инструмента и производительность оборудования. Тепловыделение при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент можно рассматривать как вид нагрузки, характер и величина которой обычно изменяются в довольно широких пределах. При обработке металла прессованием и выдавливанием обнаруживаются дополнительные особенности и усложнения условий тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент, вызванные тем, что нормальные напряжения обычно превышают сопротивление деформированию в 3-10 и более раз, а деформации достигают наивысшего уровня (степень деформации до 99% и более, вытяжка – до 100 и выше) [9].

Высокие температуры, развивающиеся при тепловыделении на границе деталь-инструмент, могут привести к такому нежелательному эффекту, как налипание с последующим вырывом материала.

1.4. Устранение налипания за счет использования технологических покрытий

Изучение вопроса контактного взаимодействия детали и инструмента было проведено разными учеными: А.Г. Овчинниковым, Е.И. Исаченковым, А.М. Дмит-

риевым, А.Л. Воронцовым, В.П. Ступниковым, С.И. Губкиным, М.А. Серезкиным и др. [2; 29; 56].

М.В. Сторожев и Е.А. Попов [62] отмечают следующие факторы, которые имеют влияние на показатель трения:

1. Состояние поверхности рабочего инструмента.
2. Вид обработки контактной поверхности деформируемой заготовки имеет значение в начальный момент деформации.
3. Физико-химическое состояние поверхности детали и инструмента.
4. Химический состав деформируемого материала.
5. Температура деформации.
6. Скорость скольжения заготовки. При увеличении скорости скольжения показатель трения снижается.
7. Характер приложения нагрузки.
8. Применение различных технологических покрытий. Это позволяет снизить показатель трения и устранить налипание. [40; 65].

Не все технологические покрытия гарантируют отсутствие такого дефекта как налипания, а только те, которые обладают достаточно высокой экранирующей способностью.

В исследованиях Я.А. Соболева, Ю.К. Филлипова, А.В. Рагулина и А.В. Молодова были проведены эксперименты с применением различных технологических покрытий. В работе были исследованы наиболее эффективные технологические покрытия: Bonderlube 623, Bonderlube 741, Bonderlube 742 фирмы Henkel; Lubrizol 5345, Lubrihol 40 фирмы Lubrizol. В качестве экспериментальной схемы был выбран процесс холодного обратного выдавливания в цилиндрической матрице.

Смазка фирмы Henkel, превышающая плотность воды, непрозрачная, белого цвета, представляет собой высокомолекулярный гликоль в жидком виде. После нанесения смазки на образец, она приобретает твердую прозрачную структуру.

Процесс нанесения смазки на образцы подразделяется на четыре этапа:

1. Травление образцов в ванне со щелочным раствором.
2. Промывание образцов в дистиллированной воде.
3. Перемещение образцов в ванну с одним из видов смазки Bonderlube.
4. Сушка в печи при температуре 110°C.

Смазка фирмы Lubrizol имеет в своем составе хлорсодержащий парафин (Lubrihol 40) и хлорсодержащий парафин с серой (Lubrizol 5345), представляет собой жидкую прозрачную или полупрозрачную структуру с желтоватым оттенком.

Нанесение смазки на образец происходит непосредственно перед технологической операцией. Так же Lubrizol хорошо взаимодействует с другими типами смазки, такими как мыло, парафин, дисульфид молибдена, пушечное сало, промышленное масло и др. Этим самым Lubrizol имеет первоначальное преимущество перед другими испытываемыми материалами за счет наименьших финансовых и временных затрат на покрытие образцов.

Для сравнения испытываемых смазывающих материалов с уже существующими и широко применяемыми смазками было решено включить фосфатированные образцы с последующим пропитыванием мыльной эмульсией. В качестве испытаний был выбран процесс обратного выдавливания в цилиндрической матрице на гидравлическом прессе, снабженным ЭВМ. Основными оценочными параметрами служили технологическое усилие, температура и чистота поверхности заготовки, наличие дефектов.

Заготовки были получены из стали 10, всего было испытано 20 образцов.

Так как смазка фирмы Lubrizol изначально имеет жидкую структуру, то для обеспечения более густой консистенции было принято решение смешивать её с другими смазывающими материалами, легкодоступными и дешевыми. Такое решение было обусловлено тем, что в процессе деформации образуется большая контактная поверхность пуансона с заготовкой, что влечет за собой частичное или полное выдавливание смазки из зоны деформации. При недостаточном количестве смазки на контактной поверхности в ходе эксперимента были выявлены такие дефекты, как задиры на пуансоне, складкообразование на внутренней поверхности образца, частичная "сварка" пуансона с образцом, невозможность отделения образца от матрицы без стороннего оборудования. В связи с этим ходе эксперимента было испорчено 10 пуансонов, из них 4 пуансона из материала 9ХС. При обработке результатов эксперимента не учитывались незначительные отклонения поведения материалов 9ХС и Х12М при обратном выдавливании. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.4.1. [79]

Таблица 1.4.1. – Результаты экспериментов.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Марка			5345	5345			40	5345			5345	5345	5345		5345		5345	5345		
Примеси			80% ИМ	75% ИМ 8% ПШ			50% ИМ 14% ПШ	48% ИМ 12% ПШ				33% ХМ	33% П		50% ММ		50% ПШ	50% ПШ	25% КС 50% ИМ	25% КС, 50% ИМ
Р, т.с.			145	147			135	144			140	138	137		144		137	145	136	149
t°c			50	50			55	55			60	60	55		60		50	55	50	55
Дефект			+	+			+	+			+	+	+		+		-	+	-	+
Р, т.с.	126	123								125					126					
t°c	45	45								45					45					
Дефект	-	-								-					-					
Марка					623	623				741						742				
Р, т.с.					141	134				135						146				
t°c					55	55				50						50				
Дефект					-	-				-						-				

Условные сокращения в таблице:

ИМ – индустриальное масло; ПШ – пушечное сало; ХМ – хозяйственное мыло; П – парафин; ММ – моторное масло 15W40; КС – консистентная смазка.

Из таблицы видно, что фосфатированный образец с последующим пропитыванием мыльной эмульсией показал самые стабильные свойства при холодном обратном выдавливании среди других смазок, испытанных в ходе эксперимента. При использовании данного метода требуется меньшая сила на технологическую операцию, он способствует меньшему нагреву образца и рабочих частей штампа, чем при других типах смазки. Так же не наблюдалось проблем с отделением образца от пуансона или матрицы. Но и этот материал имеет один значительный минус - после деформации образец имеет далеко не чистую поверхность, что сильно портит товарный вид будущей детали.

О проблемах смазки фирмы Lubrizol можно сказать следующее: в чистом виде смазочный материал выдавливается из зоны деформации, поэтому рекомендуется использовать его как присадку, смешивая с другими, более вязкими и обладающими хорошей адгезией смазывающими материалами. Хочется отметить, что образцы 18 и 20 показали наилучшую чистоту поверхности заготовки после деформации, которую можно сравнить с зеркальной или полированной поверхностью. Фирма Lubrizol показала средние результаты среди испытанных материалов, но для холодного обратного выдавливания идеальный состав смазки, в который входит Lubrizol как присадка, на сегодняшний день не найден.

Фирма Henkel по тепловым показателям и по технологическому усилию показала самый плохой результат, однако смазка фирмы Henkel хорошо ведет себя при холодном обратном выдавливании и не портит рабочий инструмент. Образец 17 по чистоте поверхности близок к образцам 18 и 20. [79]

Температуру, которая возникает при деформации, относят к числу важных факторов, влияющих на тепловыделение при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент. Влияние температуры от деформации на тепловыделение при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент объясняется тем, что происходит изменение свойств, состава и толщины слоя окислов на поверхности металла.

Особую роль играет температурный фактор при деформации с применением технологических покрытий. Температура сильно влияет на количество технологического покрытия, вовлекаемой в очаг деформации, и величину тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент. От температуры зависит также структура технологического покрытия и его прочность [19; 26; 36].

В промышленности применяют штамповку с подогревом заготовки до температур $500 \div 800$ °С, с целью повышения пластичности и снижения напряжений течения металла. Рассматриваемые технологические покрытия не предназначены для работы при таких высоких температурах.

Как при холодной, так и при горячей обработке давлением часто имеет место неравномерное распределение температуры металла вдоль контактной поверхности, а также по высоте деформируемого тела, при этом температура приконтактных слоев металла может значительно отличаться от температуры внутренних слоев [36; 48; 50].

В настоящее время в качестве технологических покрытий используют сотни различных веществ. Трудность выбора оптимального состава технологического покрытия для каждого конкретного процесса обработки заключается в том, что она должна удовлетворять одновременно целому ряду требований, некоторые из которых трудносовместимы.

Важнейшими характеристиками технологического покрытия являются: химический состав (содержание поверхностно активных веществ) и физическое состояние (жидкое, консистентное, твердое).

Применение технологических покрытий преследует несколько целей, что определяет основные функциональные требования к технологическим покрытиям: 1) снижение деформирующих сил; 2) уменьшение износа инструмента; 3) предотвращение схватывания и налипания металла на инструмент; 4) обеспечение чистоты и оптимальной шероховатости поверхности деталей; 5) охлаждение инструмента (для смазочно-охлаждающих жидкостей); 6) снижение теплопередачи между деформируемым металлом и инструментом; 7) уменьшение окисления металла и потерь легирующих элементов при обработке (для защитных технологических покрытий); 8) обеспечение более равномерного распределения деформации по объему деформируемого тела [36].

Технологическое покрытие должно удовлетворять целому ряду разных требований технического, экономического, санитарно-гигиенического характера:

- 1) стабильность состава и свойств;
- 2) удобство подачи ее на инструмент и заготовку;
- 3) простота приготовления и возможность регенерации;
- 4) простота удаления с поверхности деталей;
- 5) способность удерживаться на поверхности инструмента;

б) отсутствие вредного воздействия на металл и соответственно оборудование (коррозия и др.);

7) отсутствие неприятного запаха (не токсичность);

8) минимальное загрязнение рабочих мест;

9) отсутствие отрицательного воздействия на окружающую среду;

10) малая стоимость и не дефицитность (для технологических покрытий массового потребления).

Технологические покрытия классифицируют по химическому составу, агрегатному состоянию, назначению и другим признакам, по агрегатному состоянию технологические покрытия можно разделить на несколько групп: масла и их производные, эмульсии, компаунды и пластичные покрытия, твердые покрытия.

Масла и их производные. По химическому составу и происхождению масла подразделяют на следующие виды:

а) минеральные масла;

б) растительные и животные жиры;

в) масла на основе синтетических жирных кислот.

Эмульсии. Эмульсией является устойчивая система, которая состоит из двух жидких фаз, одна из фаз распределяется в виде мельчайших капель в другой. Жидкость, образующую капельки, называют дисперсной фазой, остальную часть — дисперсионной (непрерывной) средой. Наиболее употребительны эмульсии типа масло — вода. Из-за большого поверхностного натяжения вода не смачивает масло, которое стремится сосредоточиться на поверхности воды в виде отдельной фазы [26; 36].

Компаунды и пластичные покрытия. Смеси из минеральных масел с растительными или синтетическими продуктами, называют компаундами. Растительные масла или синтетические продукты вводят в минеральное масло для повышения эффективности технологического покрытия без значительного увеличения вязкости.

Твердые покрытия. Эту группу технологических покрытий можно разделить на две подгруппы: сухие твердые покрытия и наполнители; твердые покрытия, размягчающиеся или плавящиеся в процессе деформации. Сухие твердые покрытия отличаются тем, что они не меняют своего агрегатного состояния в процессе работы. К ним относится графит — минерал, гексагональная полиморфная модификация углерода [24].

К подгруппе твердых покрытий, размягчающихся или плавящихся в процессе деформации, относятся стекла, эмали, шлаки металлургические, природные мине-

ралы и горные породы, соли, сварочные флюсы. Эти покрытия не горят, не дают вредных газовых выделений, но они применимы только в определенном температурном диапазоне. При температурах ниже температуры плавления (размягчения) они превращаются в абразив. Стекла в широком смысле – аморфные тела различного химического состава, получаемые переохлаждением из расплава. Стекловидные вещества изотропны и характеризуются постепенным переходом из твердого состояния в вязкое и далее в жидкое при повышении температуры. Изменение свойств обратимо при охлаждении от высоких температур. Углеродистые стали при ХОШ в основном подвергают фосфатированию с последующим омыливанием.

Фосфатирование с омыливанием используют для дополнительной специальной защиты от коррозии, повышение износостойкости, улучшения твердости, электроизоляционных свойств покрытия на цветных и черных металлах. Суть такого процесса как фосфатирование состоит в том, чтобы создать на поверхности защищаемой детали слоя малорастворимых фосфатов цинка, железа или марганца.

Фосфатированию подвергаются чугун, кадмий, цинк, медь, низколегированные и углеродистые стали, сплавы меди, алюминий. Фосфатированием плохо обрабатываются высоколегированные стали. Фосфатная пленка не боится горячих материалов, органических масел, толуола, бензола, разных газов, кроме сероводорода. Под воздействием на фосфатную пленку морской воды, аммиака, щелочей, кислот, пресной, водяного пара покрытие довольно быстро разрушается. Небольшой срок службы покрытия связан еще и с его низкой прочностью и эластичностью [36].

Толщина фосфатной пленки составляет от 1 – 8 до 40 – 50 мкм (зависит от того какой режим фосфатирования, состава раствора для фосфатирования, как подготовлена поверхность). Толщина слоя связана и с его структурой. Мелкокристаллические слои имеют толщину (1 – 5 мкм) и обладают большей защитной способностью. Из-за этого их намного чаще применяют. Получают эти покрытия из цинкофосфатных растворов, которые в свою очередь содержат окисляющие элементы [23].

Крупнокристаллические фосфатные пленки наиболее толстые, их получают из марганцевофосфатных растворов. После их промасливания, они могут служить самостоятельными покрытиями. Фосфатные кристаллы имеют пластинчатую структуру, из-за этого пленка хорошо впитывает разные пропитки, лаки, удерживая в себе. Фосфатное покрытие состоит из двух слоев. Первый слой, который плотно прилегает к поверхности, плотно связан с металлом, незначительной своей толщины, имеет хорошую пористую структуру; он эластичный и достаточно гладкий. Состоит он из монофосфатов железа. А вот второй слой (наружный) состоит из монофосфа-

тов марганца, вторичных и третичных фосфатов. Он достаточно хрупкий, кристаллический. Характеристиками наружного слоя обуславливается ценность фосфатных пленок.

Цвет фосфатного покрытия может находиться в диапазоне от светло-серого до темно-серого. Фосфатные пленки, которые имеют светло-серый цвет, появляются на малоуглеродистых сталях и цветных металлах.

Фосфатный слой не подвергается воздействию воздуха, масел, керосина и не смачивается расплавленными металлами. Фосфатный слой может выдерживать влияние температуры до 500°C, но непродолжительное время, которое не сопоставимо со временем операции. Наибольшая минимальная температура, при которой не разрушается фосфатное покрытие, – -75°C. Когда происходит длительная выдержка при повышенной температуре, то фосфатный слой начинает, теряет свои защитные свойства и разрушается.

Фосфатное покрытие отличается достаточно большим электросопротивлением, может даже выдержать напряжение до 500 В. Чтобы повысить пробивное напряжение фосфатного покрытия, его пропитывают масляными либо бакелитовыми специальными лаками. Фосфатный слой по твердости мягче стали, но более тверд, по сравнению с латуной или медью. Подготовка поверхности играет очень важную роль, так как от ее качества и способа во многом зависят свойства покрытия, а конкретно – толщина, цвет фосфатной пленки, структура, адгезионная способность.

При нанесении фосфатного покрытия на поверхности металла наблюдается два главных процесса: растворение основного металла и осаждение фосфатов.

На сегодняшний день самое большое применение получил такой препарат для фосфатирования как «Мажеф». Выпускается этот препарат в виде серой массы, расфасованной по ящикам или бочкам. Отличается он кисловатым запахом. Название этого препарата произошло от начальных букв его составных частей: марганец, железо, фосфорная кислота.

Процесс получения фосфатного покрытия с использованием такого препарата имеет свои существенные недостатки: высокие температуры, малый рабочий диапазон температур, большая длительность операции, наводороживание стали. Чтобы понизить наводороживание, уменьшают обычно длительность процесса [24; 70].

Фосфатные покрытия не обладают достаточно большими защитными свойствами из-за того, что имеют пористую структуру, поэтому после того как их получили, их еще дополнительно обрабатывают [23]. Состав соли «Мажеф» ($Mn(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$) в соответствии с ТУ 6-09-02-570-2000 представлен в таблице 1.4.2.

Таблица 1.4.2 - Химический состав и некоторые параметры соли «Мажеф»

Компонент	Количество, %
Доля фосфорной кислоты, в пересчете на P ₂ O ₅	48,3
Массовая доля марганца Mn	14,7
Массовая доля железа	0,6
Массовая доля нерастворимых в воде веществ	4,9
Массовая доля сульфатов	0,7
Параметр	Количество, %
Общая кислотность	25
Потери при прокаливании	19

Директивный технологический процесс фосфатирования.

1. Обезжиривание образца бензином.
2. Помещение в раствор соли «Мажеф», нагретой до 96-100°C, на 15 (или от 5 до 60) мин.
3. Промывание образца в холодной воде.
4. Омыливание образца в растворе хозяйственного мыла (50 г/л. воды) при температуре 65°C в течении 10 мин.
5. Сушка образца в потоке горячего воздуха.

Обеспечение эффективного граничного и смешанного режима покрытия механизмов невозможно без применения твердых материалов. Последние способны работать в значительно более широком диапазоне температур. К их достоинствам также относится работоспособность при комнатных температурах. Характерная особенность твердых технологических покрытий состоит в том, что эти материалы находятся в агрегатном состоянии, исключающем при соблюдении заданных условий эксплуатации их вытекание из узла тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент.

Основным недостатком общепринятого способа покрытия заготовок цинковым фосфатом с последующим омыливанием является его многооперационность, а также возможность разрыва технологического покрытия при высоких удельных нагрузках и недостаточная термостойкость при выдавливании деталей из высокоуглеродистой и легированной стали [75].

Износостойкость твердых технологических покрытий оценивается по их истираемости. Истираемость определяется временем работы узла тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент в заданных условиях до истирания покрытия из твердой составляющей [24; 68].

Условия работы штамповых инструментов для холодного деформирования металла, значительно отличаются от условий, которые характерны для горячего деформирования. Все эти отличия связаны с наиболее высокими механическими характеристиками деформируемых деталей, вызывающими более высокие удельные силы, а также низкую начальную температуру заготовки [11; 12; 13; 32; 45; 46].

Температурные диапазоны работы инструментов для холодного выдавливания могут изменяться в широком интервале. В большей степени разогреваются инструменты для холодной объемной штамповки, а также на некоторых операциях пробивки и вырубки.

При холодном выдавливании температура пуансона увеличивается с ростом скорости деформирования и возрастает с течением времени, постепенно приближаясь к некоторому постоянному значению.

В каждом цикле, в начальный момент соприкосновения с холодной заготовкой температура пуансона понижается, а далее под влиянием выделяющейся теплоты от деформации и тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент возрастает. С увеличением скорости деформирования и степени деформации металла, температура увеличивается.

Штамповые стали, для холодного деформирования, должны иметь:

- теплостойкость не ниже $400 \div 450^{\circ}\text{C}$;
- способность противостоять действию удельных сил до $2000 \div 2200$ МПа в течение достаточно длительного времени. [76]

Считается, однако, что изменение сопротивления деформации штампуемых в холодную сталей в указанных выше пределах незначительно; так же незначительно влияние разогрева штампов на их прочность. Поэтому исследований тепловых явлений применительно к холодной объемной штамповке крайне мало (в отличие от горячей штамповки). В связи с этим мы вынуждены затрагивать работы в области тепловых процессов при горячей штамповке, в той или иной степени касающихся задач, поставленных в настоящем исследовании.

Температурные режимы ковки и штамповки и работы материала кузнечного инструмента, в решающей мере определяющие стойкость последнего, рассмотрены в ряде исследований. В трудах А. Н. Брюханова, Ю. А. Геллера, В. П. Северденко,

А. П. Гуляева, В. И. Залесского, Б. Ф. Трахтенберга, М. А. Тылкина, С. А. Довнара, Д. М. Корнеева, Л. М. Охрименко [36; 38; 39; 40] и других охвачен широкий круг вопросов, связанных с различными аспектами изучения температурных режимов деформации и их влияния на долговечность инструмента обработки металлов давлением.

Известно, что практически вся работа пластической деформации, а также работа, затрачиваемая на преодоление сил трения, превращается в теплоту. В результате деформируемая деталь и соприкасающиеся с ней области инструмента разогреваются. Температура штампа может быть определена экспериментально термопарами, смонтированными в тело штампа, или контактной термопарой, прижимаемой к его поверхности.

Первый метод позволяет установить температуру в заданных точках штампового кубика и ее изменение во времени. Это делает возможным построение температурных полей в теле штампов; установление температурно-временных параметров и амплитуды колебания температуры на заданном участке штампа. Хотя этот метод является весьма трудоемким и не всегда применимым в реальных производственных условиях, он пока остается единственным, определяющим достаточно точно температуру инструмента и позволяющим скорректировать расчетные данные о температурных полях.

Недостатком метода является нарушение температурных полей из-за наличия отверстий под термопару, которое в принципе может быть учтено, хотя ошибки, вызванные наличием отверстий, становятся заметными только в мелком инструменте (вставках).

Измерения с помощью контактных термопар дают значения температур поверхности штампов на доступных нерабочих участках, а на поверхности гравюры только через $2 \div 5$ с после удаления поковки. Поэтому такой метод не может дать полной картины распределения температур в теле штампа. Однако для корректировки расчетных температурных полей и уточнения значения неизвестных теплофизических параметров данный метод может оказаться весьма ценным, особенно если принять во внимание его простоту в условиях реальных производственных процессов.

Косвенные методы определения температуры, основанные на учете изменения микроструктуры или твердости материала штампа, позволяют построить температурные поля для некоторых средних температур всего процесса эксплуатации. Однако исходная твердость материала в той или иной точке объема практически мо-

жет быть найдена только на основе измерений контрольного экземпляра, а конечное значение ее зависит не только от температуры, но и от времени нагрева, наличия пластической деформации слоя и ряда других факторов. Поэтому найденная таким путем «средняя» температура может служить лишь для очень приближенной и неполной оценки температурного режима данного участка штампа.

С помощью экспериментальных методов измерения температуры штампа показано, что вид оборудования, форма гравюры и место измерения влияют не только на значение температуры, но и на форму температурно-временных зависимостей.

Распределение температуры в теле штампа и деформируемой детали может быть рассчитано на основе задачи о сопротивлении двух полуограниченных стержней с различной начальной температурой [4; 7; 8; 14; 42; 74].

В условиях массового и крупносерийного производства поковок на штамповочном оборудовании универсального типа можно повысить производительность труда на $8 \div 12\%$ и стойкость инструмента до 20% путем механизации и автоматизации технологического покрытия штампов. При этом технологическое покрытие способствует также и охлаждению инструмента. Поэтому такие технологические покрытия часто называют смазочно-охлаждающими жидкостями. Практика передовых отечественных заводов и иностранных фирм и предприятий показывает, что в промышленности применяют и испытывают большое число установок, устройств и систем для решения этого вопроса.

Установки для механизированного и автоматического нанесения технологических покрытий на кузнечные штампы состоят из всех или некоторых из перечисленных ниже элементов (узлов):

- 1) баков и устройств для размещения, обеспечения заданной кондиции и подачи исходных технологических покрытий;
- 2) устройств для предварительной подготовки и дозирования аэрозоли;
- 3) форсунок и распыскивателей технологических покрытий;
- 4) систем подачи форсунок и распылителей к штампам [59; 60; 77].

1.5 Основные выводы и постановка задач исследования

Основные выводы. Проведен анализ существующей литературы по тематике комбинированного выдавливания стальных деталей. Сделаны следующие основные выводы:

1. Установлено, что ранее не было уделено достаточного внимания изучению поведения фосфатного покрытия на границе деталь-инструмент: когда фосфатное покрытие перестает работать и появляются дефекты, в виде налипания металла детали на инструмент с последующими надрывами.

2. Недостаточно изучен механизм тепловыделения на границе деталь-инструмент, усреднено представленный разностью тепловыделения от пластической деформации заготовки и теплоотдачей в инструмент и оснастку.

3. Применяемые методы определения температуры на границе деталь – инструмент имели недостаточную точность, что не позволяло разграничить долю влияния тепловыделения от деформации заготовки и трения на границе, зависящее от смазки, подготовки поверхности инструмента и т.п.

4. Анализ поведения и применения смазок носит рекомендательно-экспериментальный характер без рассмотрения механизма их взаимодействия на границе инструмент-смазка-деталь в процессе силового воздействия и структурных превращений.

5. Отсутствуют данные по зависимости показателя трения на границе инструмент-деталь, ответственного за количество выделяемого тепла на границе инструмент-деталь, от типа процесса выдавливания и условий его протекания.

На основании проведенного обзора литературы сформулированы цель работы и задачи исследования.

Целью настоящей диссертационной работы является повышение геометрической точности стальных фосфатированных деталей при холодном комбинированном выдавливании путем научного обоснования температурного диапазона работоспособности фосфатного покрытия, выполняющего роль технологической смазки и наносимого на поверхность заготовки перед выполнением операции пластического формоизменения.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие **задачи исследования:**

1. Установить влияние деформационного взаимодействия на границе деталь – инструмент и пластической деформации заготовки на температуру разогрева фосфатного покрытия, определяющую его свойства и качество штампуемой детали «Корпус».

2. Определить среднюю температуру разогрева детали при ее деформировании операцией комбинированного выдавливания теоретически и экспериментально с

использованием прямого измерения температуры современным средством измерительной техники.

3. Установить температурный диапазон работоспособности технологического покрытия при комбинированном выдавливании детали «Корпус» теоретическим путем.

4. Разработать практические рекомендации по проектированию технологического процесса и выбору прессового оборудования, обеспечивающие качественное функционирование фосфатного покрытия и позволяющие изготавливать стальную деталь «Корпус», удовлетворяющие технологическим требованиям на производимый конечный продукт.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ФОСФАТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ГРАНИЦЕ ДЕТАЛЬ - ИНСТРУМЕНТ

2.1 Исследования слоя технологического покрытия

Обеспечение устойчивого, неразрывного слоя твердой смазки на границе деталь-инструмент в процессах ХОШ, при массовом производстве стальных деталей, является задачей, решение которой позволит повысить качество изделия, получаемого путём обработки давлением.

Одной из наиболее вероятных причин появления дефектов на поверхности деформируемой детали «Корпус» (рисунок 2.1.1) является разрушение фосфатного слоя или выгорание материала технологического покрытия (мыла) в результате нагрева слоев, прилегающих к поверхности контакта штампуемого материала с инструментом.

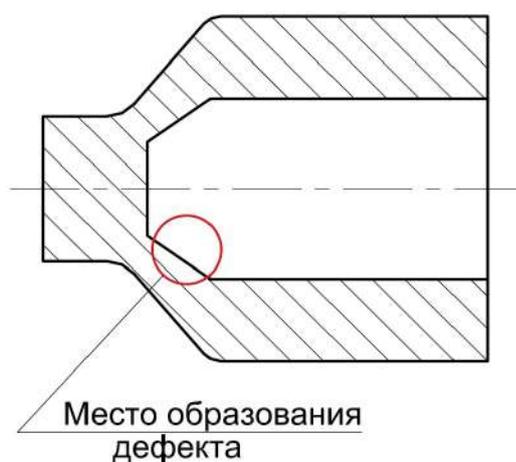


Рисунок 2.1.1 – Деталь «Корпус» с указанием места образования дефекта

Исследовано технологическое покрытие в месте образования дефекта (рисунок 2.1.1) на первой детали и двадцатой детали после выдавливания, методом микроструктурного анализа [68]. Образцы, перед просмотром на оптическом микроскопе с камерой DCM800, были прошлифованы и отполированы до шероховатости поверхности Ra0,40, а затем протравлены 20%-ной азотной кислотой. Результаты исследования приведены на рисунках 2.1.2 – 2.1.3. Толщина слоя технологического покрытия до выдавливания составляет 0,02 мм.

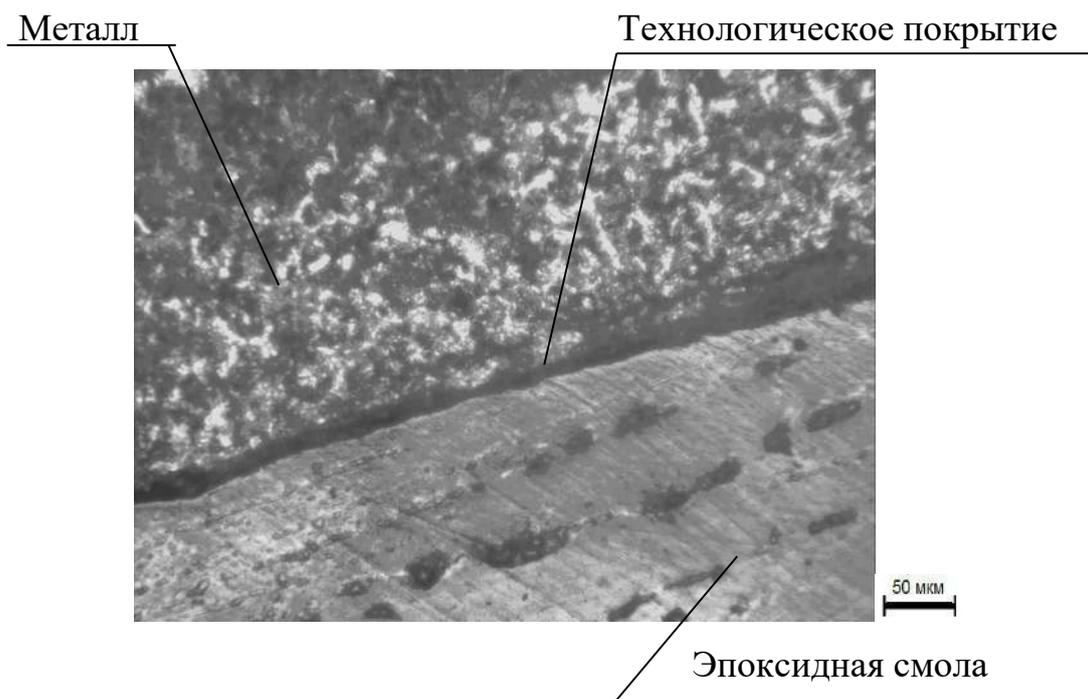


Рисунок 2.1.2– Технологическое покрытие на первой детали ($\times 200$)

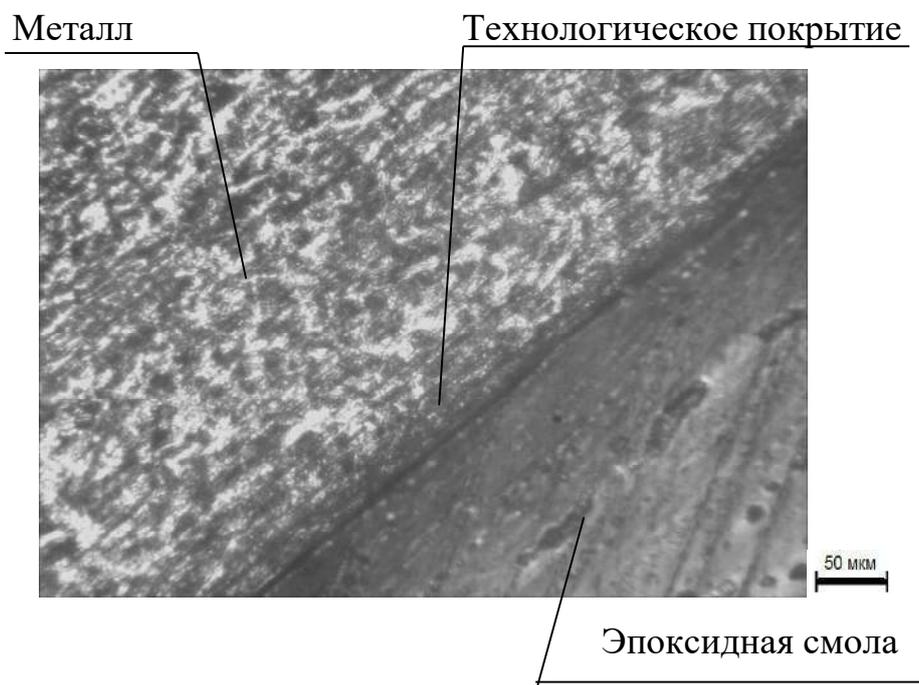


Рисунок 2.1.3– Технологическое покрытие на 20-ой детали ($\times 200$)

Был проведен эксперимент по измерению толщины технологического покрытия на границе деталь-инструмент, в месте образования дефекта, для 1-ой, 4-ой, 8-ой, 12-ой, 16-ой и 20-ой детали в эксперименте после выдавливания. Толщина тех-

нологического покрытия измерялась на оптическом микроскопе со шкалой измерения. Получение данных по температуре на поверхности детали (с использованием датчика, фиксирующего инфракрасное излучение) более подробно описано в главе 3.1.2. Данные по температуре и толщине технологического покрытия представлены в таблице 2.1.1 и на рисунке 2.1.4.

Таблица 2.1.1 - Данные по температуре и толщине технологического покрытия

№ детали в эксперименте	Температура, °C	Толщина технологического покрытия, мкм
1	65,3	19
4	76,7	17,7
8	87,9	15,9
12	90,6	12,3
16	92,6	11,1
20	95	8,2



Рисунок 2.1.4 – Диаграмма зависимости толщины технологического покрытия от температуры

Анализируя фотографии макрошлифов, можно констатировать, что изменения в поверхностном слое детали существуют. Фосфатированный слой становится тоньше с каждой последующей деталью. Технологическое покрытие сохраняется на поверхности детали при деформации и визуально не происходит его разрыва.

В тоже время можно предположить, что возникновение дефекта связано с налипанием материала поверхности детали, имеющей шероховатость, т.е. сочетание выступов и впадин. В качестве возможной гипотезы выдвигается следующее: высота выступов шероховатости может превышать толщину фосфатного слоя либо быть

сопоставимой с его толщиной. Это может приводить к точечному контакту между поверхностями двух металлических тел (деталь и инструмент) и, как следствие, к налипанию металла на границе деталь-инструмент; образованию задиров в тонком поверхностном слое и разрушению поверхностного слоя.

Данная гипотеза может быть проверена на основе физического и вычислительного эксперимента. Для проведения вычислительного эксперимента, например, в программе QFORM, необходимо получить дополнительные данные о зависимости показателя трения от температуры. Далее, определим данную зависимость в явном виде.

2.2 Определение температурной зависимости показателя трения на границе деталь-инструмент

2.2.1 Выбор метода исследования, допущения

При холодной обработке давлением происходит некоторый разогрев металла вследствие выделения теплоты от деформации и тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент. Поверхностные слои соприкасающихся материалов при обработке давлением изменяются в основном под действием значительных деформаций, развивающихся в тонком поверхностном слое, приводящих к его нагреву. Температуру деформации относят к числу важнейших факторов, влияющих на тепловыделение при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент [36]. В этом случае показатель трения зависит от значения температуры на границе деталь-инструмент.

Показатель трения технологического покрытия, характеризующий тепловыделение при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент при расчётах процессов объёмной штамповки, можно определить, используя метод осадки кольцевых образцов. При расчёте показателя трения по методу осадки кольцевых образцов можно применить инверсионное моделирование (метод постановки обратной задачи) или пользоваться диаграммой (рисунок 2.2.1.1) [30]. Как применение метода постановки обратной задачи, так и построение номограмм подразумевают решение теоретической задачи осадки кольцевого образца [19].

При использовании метода постановки обратной задачи варьируется показатель трения, пока геометрия образца при моделировании не сойдётся с данными, полученными при фактическом эксперименте осадки кольцевого образца [19].

Большое распространение при анализе технологических задач обработке давлением находит метод конечных элементов (МКЭ), который относится к современным методам численного анализа. Первое его применение связано с расчетом инженерных конструкций. Начиная с этого первого применения, МКЭ в течение короткого времени развился в самостоятельную область науки, получившую широкое распространение в решении граничных задач математики, физики и особенно механики сплошной среды. Быстрое развитие МКЭ шло наряду с прогрессом компьютерной техники и ее применением в различных областях науки и инженерной практики.

Метод конечных элементов включает различные подходы, в которых для определения напряжения, деформации и перемещения материал условно разбивают на отдельные элементы, соединенные в узловых точках. Применение этого метода может успешно проводиться как для жесткопластического материала, так и для упругопластического. Этот выбор, также, как и выбор конечного элемента, осуществляется, исходя из постановки задачи и рациональности использования того или иного подхода, описанного в МКЭ. Задание граничных условий и введение некоторых гипотез позволяет в значительной степени упростить поиск решения, хотя и в некоторой степени усредняет результат. Однако следует заметить, что для части процессов МКЭ может являться единственным методом, позволяющим достигать необходимого результата с достаточной степенью точности.

В качестве наиболее весомых преимуществ МКЭ можно привести следующие.

1. Свойства материалов смежных элементов не должны быть обязательно одинаковыми. Это позволяет применять метод к телам, состоящим из нескольких материалов.

2. Криволинейная область может быть аппроксимирована с помощью прямолинейных элементов или описана точно с помощью криволинейных элементов.

3. Размеры элементов могут быть переменными. Это позволяет укрупнить или измельчить сеть разбиения области на элементы, если в этом есть необходимость.

4. С помощью МКЭ не представляет труда рассмотреть граничные условия с разрывной поверхностной нагрузкой, а также смешанные граничные условия [55].

Указанные преимущества МКЭ могут быть использованы при составлении достаточно общей программы для решения частных задач определенного класса.

Одной из основных задач при использовании конечно-элементного анализа является построение сетки конечного элемента. С целью упрощения подготовки и проверки входных данных применяется автоматическое построение сетки, что стало

возможным благодаря достаточно высокой степени развития компьютерной техники и прикладного программного обеспечения. Кроме того, автоматизация позволяет уменьшить ошибки операторов, обеспечить регулярность сетки, облегчить использование других типов элементов, упростить параметрические исследования [55; 75].

Во втором методе необходимо сначала построить номограммы, представляющие собой зависимость изменения внутреннего диаметра образца от изменения высоты кольцевого образца при различных показателях трения. Номограммы можно получить при расчёте задачи об осадке кольцевого образца одним из известных математических методов, например, методом баланса мощности [70; 81; 82].

Был произведен расчет задачи осадки кольцевого образца методом баланса мощности, при этом использовали поле скоростей, в целом близкое к тому, что применяли А. Мейл и др. [81].

При осадке кольцевого образца характер течения материала определяется трением на контактных поверхностях. С увеличением показателя трения нейтральный слой смещается от центра образца к периферии. Нейтральный слой определяет положение границы раздела течения X , в которой радиальная компонента вектора скорости $v_\rho = 0$ при $\rho = X$. При $\rho > X$ металл течёт по оси ρ , при $\rho < X$ металл течёт против оси ρ , в сторону центра (рисунок 2.2.1.2). При этом нейтральный слой может находиться как в теле кольца ($R > X > r$), тогда часть металла будет течь по оси ρ , а часть против, за счёт чего внутренний диаметр кольца будет уменьшаться, так и вне тела кольца ($X < r$); тогда весь металл будет течь по оси ρ и внутренний диаметр кольца будет увеличиваться [19; 71].

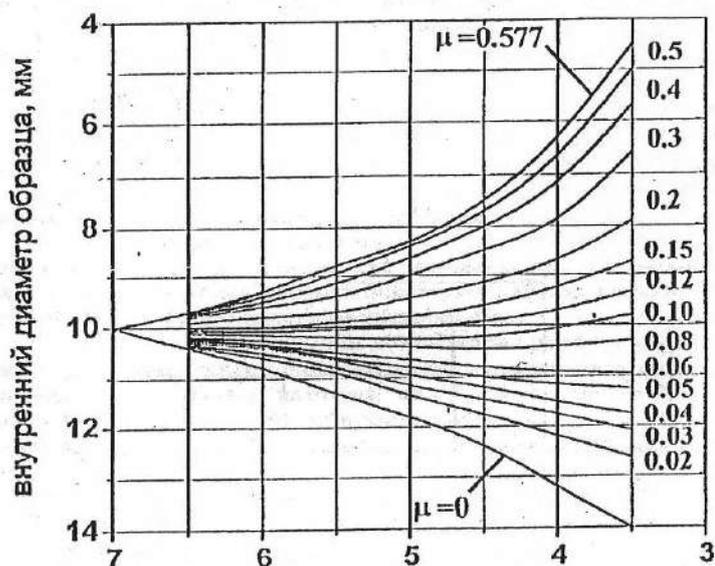


Рисунок 2.2.1.1 - Диаграмма для определения показателя трения

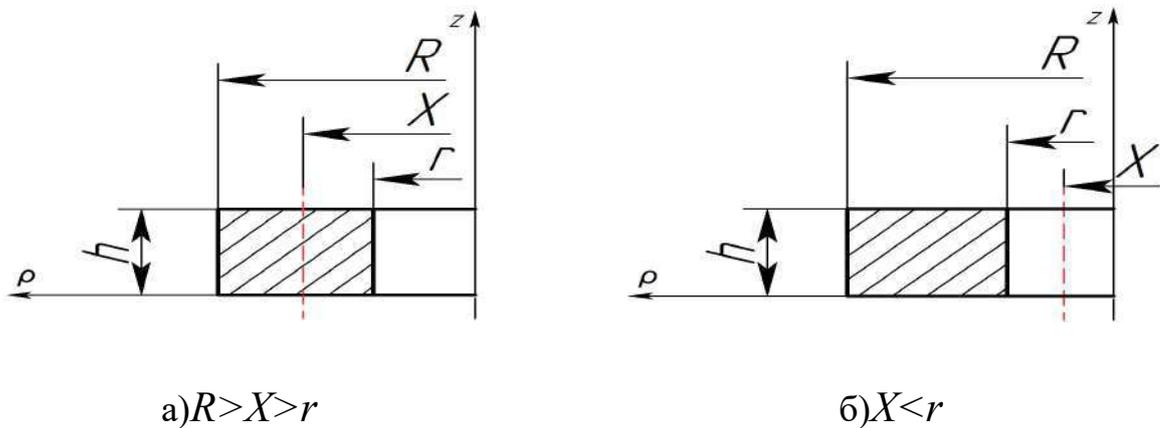


Рисунок 2.2.1.2 - Схема положения нейтрального слоя в кольцевом образце

Определим кинематически допустимое поле скоростей для данной задачи. Примем, что компонента скорости перемещения по оси z v_z линейно зависит от z . Кольцо осаживается с постоянной скоростью v , тогда $v_z(h) = -v$, и $v_z = -(vz)/h$, а компонента скорости деформации $\dot{\epsilon}_z = -v/h$. Далее из условия постоянства объёма

$$\dot{\epsilon}_z + V_\rho / \rho + \partial V_\rho / \partial \rho = 0, \quad \text{при } v_\rho(X) = 0, \quad (2.2.1.1)$$

находим компоненту скорости v_ρ по оси ρ , учитывая, что $v_\rho(X) = 0$: $v_\rho = -(v \cdot (X^2 - \rho^2)) / (2h\rho)$.

Далее можно определить компоненты скорости деформации

$$\dot{\epsilon}_\rho = (v(X^2 + \rho^2)) / (2h \cdot \rho^2); \quad \dot{\epsilon}_\theta = -(v \cdot (X^2 - \rho^2)) / (2h \cdot \rho^2).$$

Полная мощность пластической деформации может быть определена по выражению

$$N(X) = N_{вс} + N_{тп}, \quad (2.2.1.2)$$

где $N_{вс}$ – мощность внутренних сил пластической деформации; $N_{тп}$ – мощность сил контактного трения.

$$N_{вс} = 2\pi \int_0^h \int_r^R \dot{\epsilon}_{i1} \sigma_i \rho d\rho dz; \quad (2.2.1.3)$$

$$N_{mp} = 2\pi \frac{2m}{\sqrt{3}} \int_r^R |V_\rho| \sigma_s \rho d\rho, \quad (2.2.1.4)$$

где m – фактор трения; $\dot{\varepsilon}_i$ – интенсивность скоростей деформации, для осесимметричной задачи можно рассчитывается по выражению (2.2.1.5); σ_i – напряжение текучести материала.

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\varepsilon}_\rho - \dot{\varepsilon}_\theta)^2 + (\dot{\varepsilon}_\theta - \dot{\varepsilon}_z)^2 + (\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_\rho)^2} \quad (2.2.1.5)$$

Напряжение текучести σ_i может быть константой, тогда задача решается без учёта упрочнения, либо функцией от деформации $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$, тогда задача решается с учётом упрочнения.

Металл при свободном течении деформируется при соблюдении минимума мощности; тогда, минимизируя выражение (2.2.1.2) по X , можно определить положение границы течения, зная которое можно рассчитать внешний R и внутренний r радиус кольцевого образца.

Разделим решение задачи на n шагов, тогда приращение времени на каждом шаге можно определить по выражению

$$\Delta t = \frac{\Delta h}{V}, \quad (2.2.1.6)$$

где Δh – приращение изменения высоты.

По выражениям (2.2.1.7) и (2.2.1.8) можно рассчитать внешний R и внутренний r радиус кольцевого образца.

$$\begin{aligned} R_1 &= R_0 + V_\rho(R_0, X) \cdot \frac{\Delta h}{V}; R_2 = R_1 + V_\rho(R_1, X) \cdot \frac{\Delta h}{V}; \dots \\ R_n &= R_{n-1} + V_\rho(R_{n-1}, X) \cdot \frac{\Delta h}{V}; \end{aligned} \quad (2.2.1.7)$$

$$r_1 = r_0 + V_\rho(r_0, X) \cdot \frac{\Delta h}{V}; r_2 = r_1 + V_\rho(r_1, X) \cdot \frac{\Delta h}{V}; \dots$$

$$r_n = r_{n-1} + V_\rho(r_{n-1}, X) \cdot \frac{\Delta h}{V}, \quad (2.2.1.8)$$

где R_0 и r_0 – значения внешнего и внутреннего радиуса кольцевого образца до деформирования; $R_1, R_2, R_3 \dots R_n$ и $r_1, r_2, r_3 \dots r_n$ – значения внешнего и внутреннего радиуса кольцевого образца на каждом шаге расчёта (Приложение А).

Примем, что компонента скорости деформации по оси z равна:

$$\dot{\epsilon}_z = b + a \cdot (h/2 - z)^2, \quad (2.2.1.9)$$

где b и a – коэффициенты.

Тогда, интегрируя определим компоненту скорости

$$v_z = C + b \cdot z - (a \cdot (h - 2 \cdot z)^3) / 24,$$

где C – постоянная интегрирования, которую определим из условия, что при $z = 0$ $v_z = 0$.

Также коэффициента определим из условия, что при $z = h$ $v_z = -v$:

$$v_z = b \cdot z - (b \cdot h) / 2 - v / 2 + ((h - 2z)^3 \cdot (v + b \cdot h)) / (2h^3). \quad (2.2.1.10)$$

Компоненту скорости по оси ρ определим из условия постоянства объёма (2.2.1.1). Дифференциальное уравнение (2.2.1.1) будем решать с условием, что при $\rho = q + k \cdot (z - h/2)^2$ $v_\rho = 0$, где выражение

$$X(z) = q + k \cdot (z - h/2)^2 \quad (2.2.1.11)$$

определяет форму нейтрального слоя; q и k – коэффициенты.

Найденное выражение, определяющее компоненту скорости v_ρ по оси ρ , достаточно громоздкое, поэтому в тексте диссертации его не приводим. Стоит только отметить, что компонента v_ρ является функцией двух координат и трёх коэффициентов: $v_\rho = f(\rho, z, b, q, k)$, также как и компонента скорости деформации по оси ρ , найти

которую можно, взяв частную производную от v_ρ : $\dot{\varepsilon}_\rho = \partial V_\rho / \partial \rho = f(\rho, z, b, q, k)$. Зная компоненту скорости v_ρ , можно определить компоненту скорости деформации v_θ .

Далее разделим геометрию кольцевого образца на p горизонтальных слоёв. Полную мощность пластической деформации в каждом горизонтальном слое можно определить по выражению (2.2.1.3), а для верхнего и нижнего слоёв – по выражению (2.2.1.2). Интенсивность скоростей деформации определим по выражению:

$$\dot{\varepsilon}_{il} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\varepsilon}_{\rho 1} - \dot{\varepsilon}_{\theta 1})^2 + (\dot{\varepsilon}_{\theta 1} - \dot{\varepsilon}_{z 1})^2 + (\dot{\varepsilon}_{z 1} - \dot{\varepsilon}_{\rho 1})^2 + \frac{3}{2} \dot{\gamma}_{\rho z}^2}, \quad (2.2.1.12)$$

где $\dot{\gamma}_{\rho z}$ – компонента скорости сдвиговой деформации, которую определим из вы-

ражения
$$\dot{\gamma}_{\rho z} = \frac{\partial v_\rho}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial \rho}.$$

Таким образом, минимизируя по трём коэффициентам b , q и k мощность пластической деформации при осадке кольцевого образца как сумму мощностей в каждом из горизонтальных слоёв, можно по выражениям (2.2.1.7) и (2.2.1.8) рассчитать внешний R и внутренний r радиус кольцевого образца в каждом из p горизонтальных слоёв.

Высоту в центре слоя h_u определим по выражению:

$$h_{u1} = h_{u0} + v_z(R_0, h_{u0}, b_1) \cdot \frac{\Delta h}{v}, \quad h_{u2} = h_{u1} + v_z(R_1, h_{u1}, b_2) \cdot \frac{\Delta h}{v},$$

$$h_{un} = h_{un-1} + v_z(R_{n-1}, h_{un-1}, b_n) \cdot \frac{\Delta h}{v}, \quad (2.2.1.13)$$

где h_u – высота в центре каждого из p слоёв, n – количество шагов расчёта; например, примем $n=28$.

2.2.2. Формулы для расчета и результаты экспериментального исследования

Для проведения испытаний был изготовлен 21 кольцевой образец из стали 20 с наружным диаметром 20 мм, внутренним диаметром 10 мм и высотой 7 мм (рисунок 2.2.2.1).

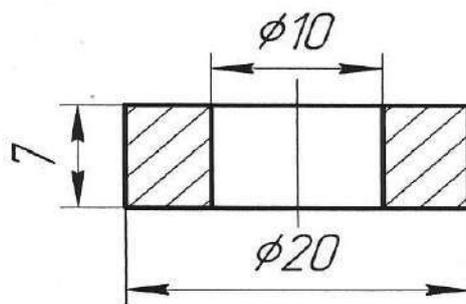


Рисунок 2.2.2.1 – Исходный кольцевой образец

На кольцевые образцы было нанесено технологическое покрытие (фосфатирование с омыливанием). Затем образцы выдерживали в муфельной печи с программатором USA V-95L-0918 (1 час) при разных температурах. Далее образцы остывали до комнатной температуры и были подвергнуты осадке на гидравлическом прессе ДО138Бдо высоты 3,5 мм (рисунок 2.2.2.2). Температура, которая возникала при осадке, не учитывалась.

После осадки измерили внутренний диаметр электронным штангенциркулем в двух перпендикулярных направлениях посередине образца, вверху и внизу кольца. В таблице 2.2.2.1 приведены данные измерений.

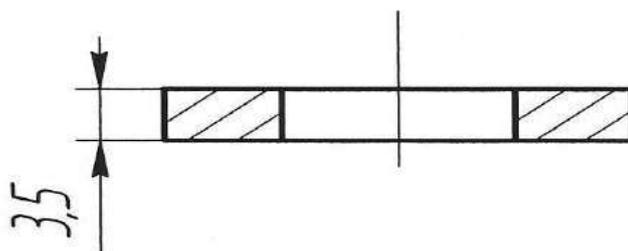




Рисунок 2.2.2.2 – Кольцевой образец после осадки.

Таблица 2.2.2.1 - Размеры внутреннего диаметра кольцевого образца

Температура предварительного нагрева в печи, t [°C]	100	125	150	175	200	225	250
Верхний \varnothing [мм]	11,1	11,1	10,7	10,5	10,2	9,8	9,6
Средний \varnothing [мм]	10,9	10,8	10,4	10,2	9,6	9,3	9,1
Нижний \varnothing [мм]	11,1	11,0	10,7	10,5	10,1	9,9	9,6

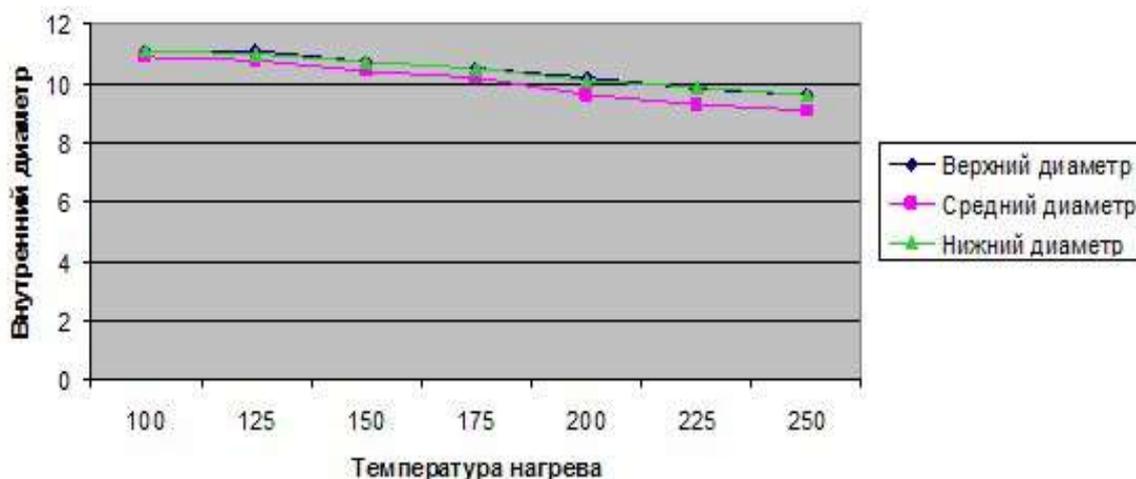


Рисунок 2.2.2.3– Зависимость внутренних диаметров кольцевого образца после осадки от температуры нагрева

При моделировании эксперимента показатель трения технологического покрытия менялся до тех пор, пока внутренний диаметр осажденного кольцевого образца не совпал с внутренним диаметром фактически осажденного кольцевого образца (рисунок 2.2.2.4, 2.2.2.5, 2.2.2.6). Так был определен показатель трения технологиче-

ского покрытия при разных температурах предварительного нагрева кольцевого образца (таблица 2.2.2.2, рисунок 2.2.2.7).

Чем выше была температура предварительного нагрева, тем выше был и показатель трения, так, например: при температуре $T=100^{\circ}\text{C}$ показатель трения $m=0,125$; при $T=175^{\circ}\text{C}$ $m=0,162$; при $T=250^{\circ}\text{C}$ $m=0,242$.

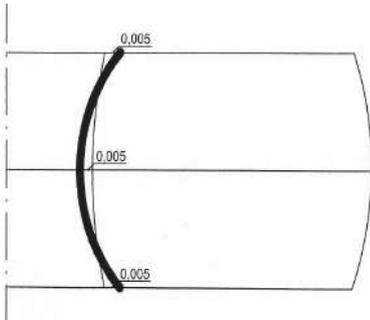


Рисунок 2.2.2.4

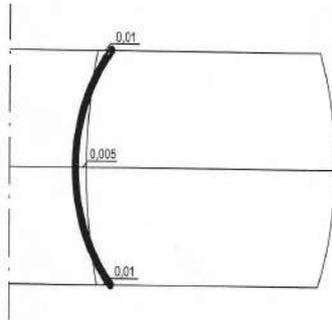


Рисунок 2.2.2.5

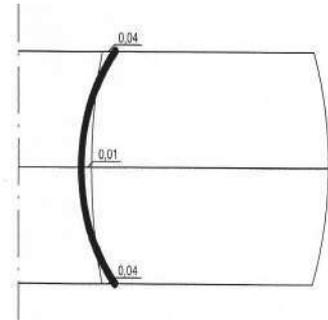


Рисунок 2.2.2.6

Рисунки 2.2.2.4, 2.2.2.5, 2.2.2.6 – Осаженный кольцевой образец при температурах $T=100^{\circ}\text{C}$; $T=175^{\circ}\text{C}$; $T=250^{\circ}\text{C}$ и показателях трения $m=0,125$; $m=0,162$; $m=0,242$ (| – граница фактического внутреннего диаметра, | – граница промоделированного внутреннего диаметра).

На рисунках 2.2.2.4, 2.2.2.5, 2.2.2.6 указана разница между фактически осаженным внутренним диаметром кольцевого образца и промоделированным.

Таблица 2.2.2.2 – Данные по температуре нагрева и показателю трения.

Температура нагрева	100	125	150	175	200	225	250
Показатель трения	0,125	0,135	0,15	0,162	0,168	0,225	0,242

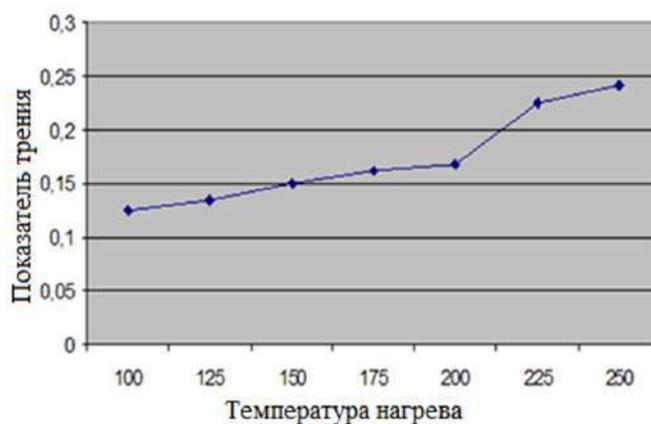


Рисунок 2.2.2.7 – График зависимости показателя трения от температуры нагрева

Данные, представленные на графике 2.2.2.7 будут далее применены в главе 3 для анализа исследуемой технологии обработки давлением с применением компьютерного имитационного моделирования в программе QFORM.

На рисунках 2.2.2.8 — 2.2.2.10 показано цветное отображение радиальной компоненты поля скоростей по сечению образца: красный цвет соответствует течению металла к периферии, синий — внутрь кольца. Граница между красным и синим полем будет являться нейтральным слоем (где радиальная компонента поля скоростей меняет свой знак).

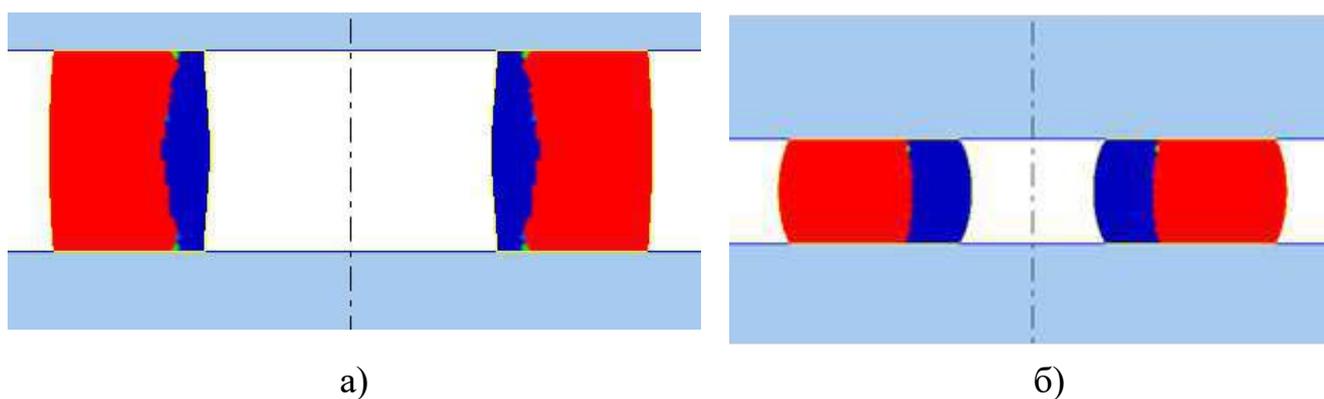


Рисунок 2.2.2.8 – Этапы осадки кольцевого образца при показателе трения $\mu=0,9$: а) 6,5 мм; б) 3,5 мм.

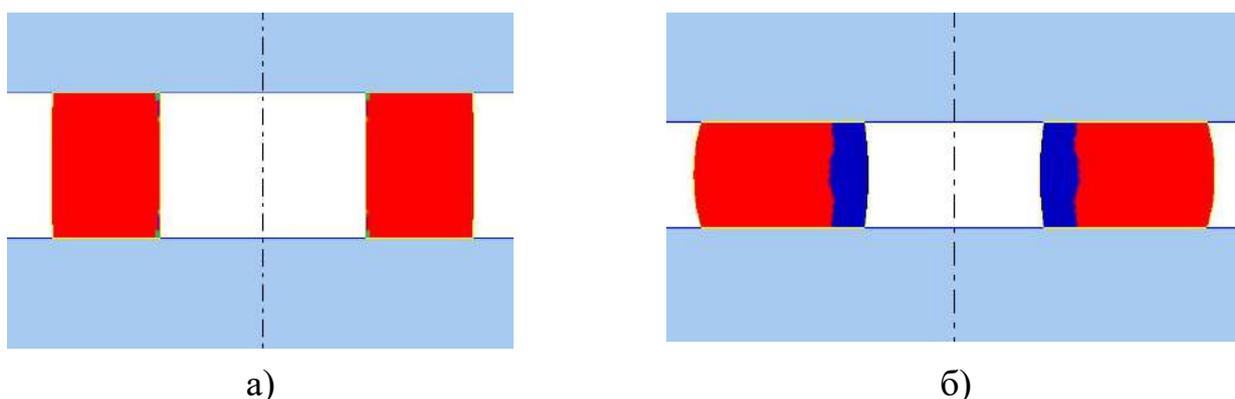


Рисунок 2.2.2.9 – Этапы осадки кольцевого образца при показателе трения $\mu=0,4$: а) 6,5 мм; б) 3,5 мм.

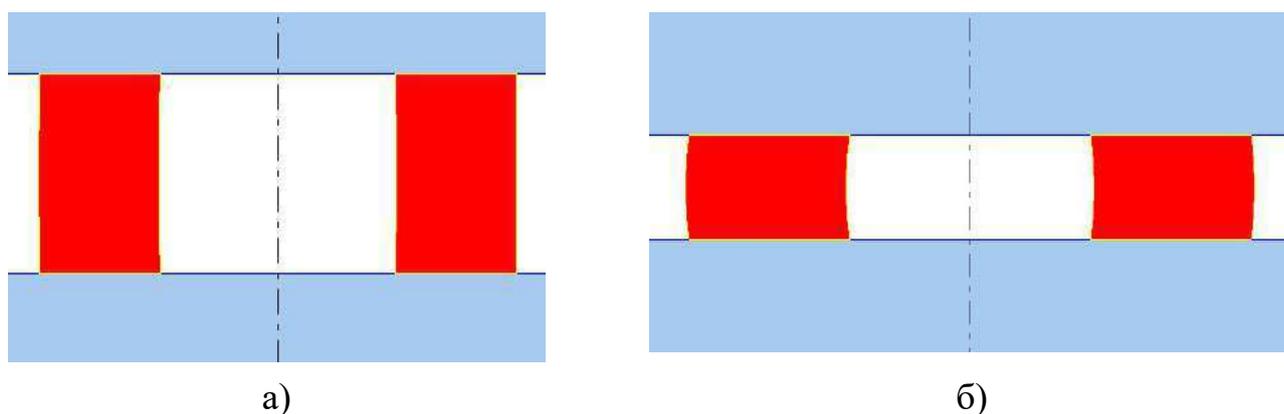


Рисунок 2.2.2.10 – Этапы осадки кольцевого образца при показателе трения $\mu=0,125$: а) 6,2 мм; б) 3,5 мм.

Допущение о форме нейтрального слоя является малоизученным. Большинство исследователей склоняется к справедливости гипотезы о нейтральном слое в форме цилиндрической поверхности, например, Авицур и др [3].

Как видно из рисунков 2.2.2.8 и 2.2.2.9, результаты моделирования показывают, что форма нейтрального слоя не является прямой линией. Однако при моделировании в QFORM определить аналитическую зависимость, описывающую форму нейтрального слоя, не представляется возможным. Эту задачу можно решить методом баланса мощности и определить функцию, отображающую форму нейтрального слоя [20].

2.3 Выводы к главе 2

Результаты экспериментального исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Выявлено, что с повышением температуры толщина фосфатного покрытия пропорционально уменьшается в результате выделения с поверхности компонентов покрытия. На 1-ой детали в партии толщина фосфатного покрытия уменьшится на 5% по сравнению с толщиной фосфатного покрытия на заготовке, а на 20-ой детали в партии толщина фосфатного покрытия уменьшается на 59%.

2. Результаты исследования показывают, что с повышением температуры увеличивается и показатель трения. При повышении температуры на 25°C, показатель трения в среднем увеличится на 2%.

3. Полученная зависимость показателя трения от температуры (см. Таблицу 2.2.2.2 и рис.2.2.2.7) может быть использована для дальнейшего компьютерного моделирования при исследовании технологии детали «Корпус» с применением программы QFORM.

ГЛАВА 3. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ РАЗОГРЕВА ДЕТАЛИ ПРИ ШТАМПОВКЕ

3.1. Исследование температуры разогрева детали при штамповке

3.1.1. Установление теплового эффекта деформации теоретическим путем

В процессе пластической деформации большая часть механической энергии (85 ÷ 93 %) переходит в тепловую, вследствие чего температура деформируемой заготовки повышается [63]. Повышение температуры зависит от количества затраченной энергии, теплоемкости, теплопроводности деформируемого металла и времени протекания процесса деформирования (скорости деформирования).

Повышение температуры в процессе холодного выдавливания без учета теплоотдачи в окружающую среду можно определить по формуле:

$$T = \frac{A}{F_0 h_0 \rho c},$$

где A – механическая работа деформирования; ρ , c – плотность и теплоемкость деформируемого металла соответственно; F_0 , h_0 – исходные размеры заготовки [40].

Определение средней температуры детали в конце штамповочного перехода (операции штамповки) проводили расчетным путем с последующей экспериментальной проверкой. При расчете были приняты следующие допущения.

1. Нагрев детали происходит в результате теплового эффекта деформации. Вся работа деформации обращается в теплоту.

2. Образовавшаяся теплота распределяется в детали равномерно, т.е. текущая температура T во всех элементах поковки одна и та же.

3. Тепловой поток от детали к инструменту определяется формулой Ньютона

$$Q = \alpha F_k (T - T_{ш}), \quad (3.1.1.1)$$

где α – коэффициент теплопередачи; $T_{ш}$ – средняя температура штампа; F_k – текущая площадь соприкосновения заготовки со штампом.

Как показывают исследования В.С. Миллера, коэффициент теплопередачи на контакте двух металлических тел существенно зависит от нормального давления на

поверхности контакта [43]. Эту зависимость с достаточно высокой степенью точности можно аппроксимировать формулой

$$\alpha = 770 \cdot q \text{ [Вт/м}^2\cdot\text{К]},$$

где q – среднее нормальное давление, МПа.

Среднюю температуру штампа определяли опытным путем (методику измерения средней температуры детали и инструмента см. ниже). Результаты измерений с достаточной точностью можно аппроксимировать зависимостью

$$T_{ш} = 20 + 55(1 - e^{-0,025 N}), \text{ (для матрицы)} \quad (3.1.1.2a)$$

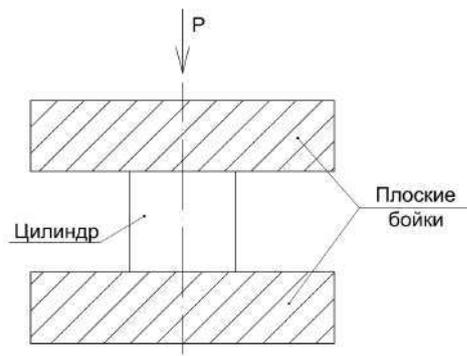
$$T_{ш} = 20 + 100(1 - e^{-0,033 N}), \text{ (для пуансона)} \quad (3.1.1.2б)$$

где N – номер детали с начала производства штамповки.

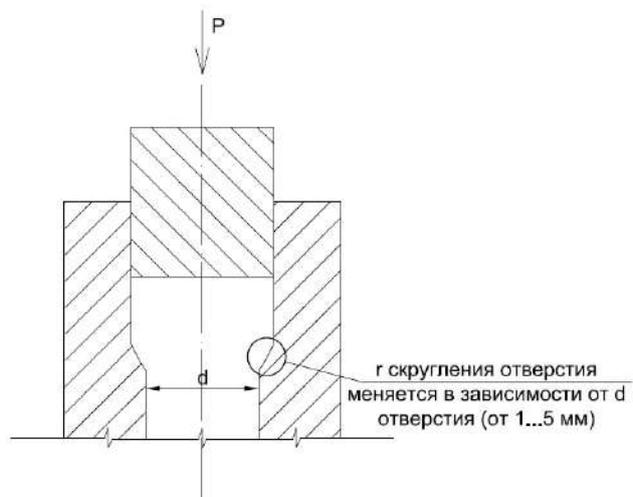
4. Поскольку операция фосфатирования с последующим омыливанием применяется только для производства деталей из малоуглеродистых и низколегированных сталей, интенсивность упрочнения (Интенсивность деформационного упрочнения, или коэффициент деформационного упрочнения, $q = ds / de$, определяет прирост напряжения на единицу деформации) принята для всех деформируемых материалов одной и той же, а предел текучести – разным, зависящим от марки материала.

5. В тех пределах, в которых находится температура детали, подвергающаяся холодной объемной штамповке (ниже температуры начала возврата), сопротивление деформации изменяется незначительно.

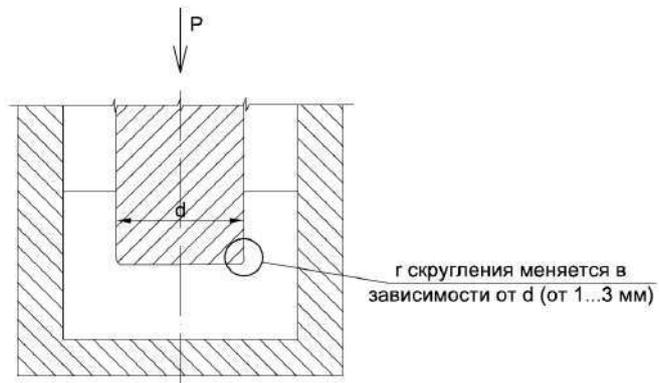
Для решения поставленной задачи были проведены расчеты на ЭВМ с помощью программы QForm-2D, основанной на методе конечных элементов, для трех основных схем деформирования: осадки в плоских бойках (рисунок 3.1.1.1 а), прямого выдавливания (рисунок 3.1.1.1 б) и обратного выдавливания (рисунок 3.1.1.1 в). В расчетах задавали различные исходные размеры заготовок, различные марки сталей, различные величины деформации; показатель контактного трения μ (рисунок 2.2.2.7) был принят равным 0,65 (показатель трения меняется прямопропорционально температуре). В результате по итогам расчетов строили графики по координатам «ход – деформирующая сила». На рисунках 3.1.1.2, 3.1.1.3, 3.1.1.4 показаны типовые графики для выбранных схем деформирования.



а) Осадка цилиндра в плоских бойках



б) Прямое выдавливание



в) Обратное выдавливание

Рисунок 3.1.1.1 – Схемы деформирования

Характеристики материала, принятые в расчетах: $\sigma_T=260$ МПа (предел текучести сталь 20), $A=1,28 \cdot 10^{-5}$ м²/с (температуропроводность), $\rho=7800$ кг/м³ (плотность), $c=500$ Дж/кг·К (теплоемкость), $\lambda=50$ Вт/м·К (теплопроводность).

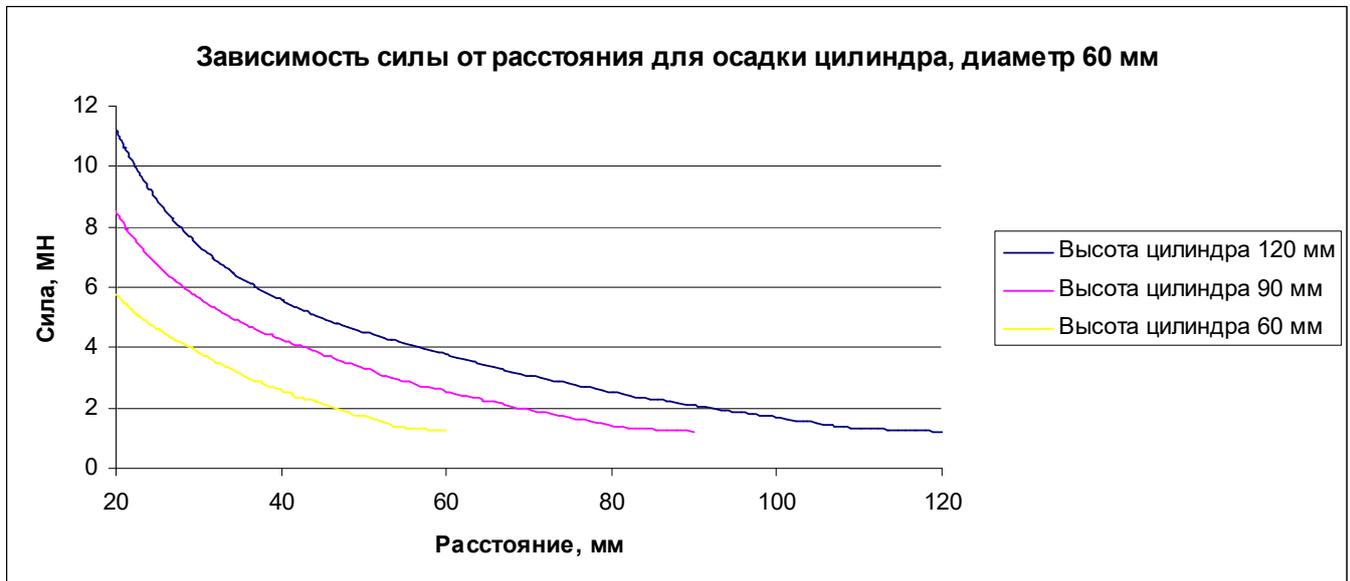


Рисунок 3.1.1.2 – Типовой график «ход – деформирующая сила» для операции осадка (цилиндр диаметром 60 мм)

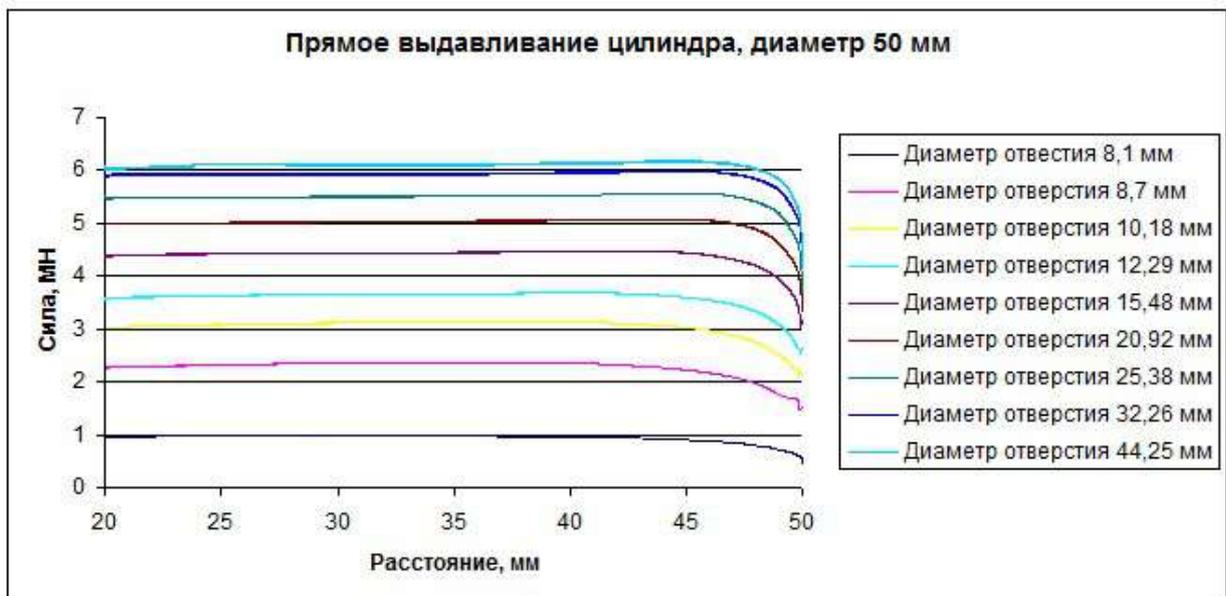


Рисунок 3.1.1.3 – Типовой график «ход – деформирующая сила» для операции прямое выдавливание (цилиндр диаметром 50 мм)

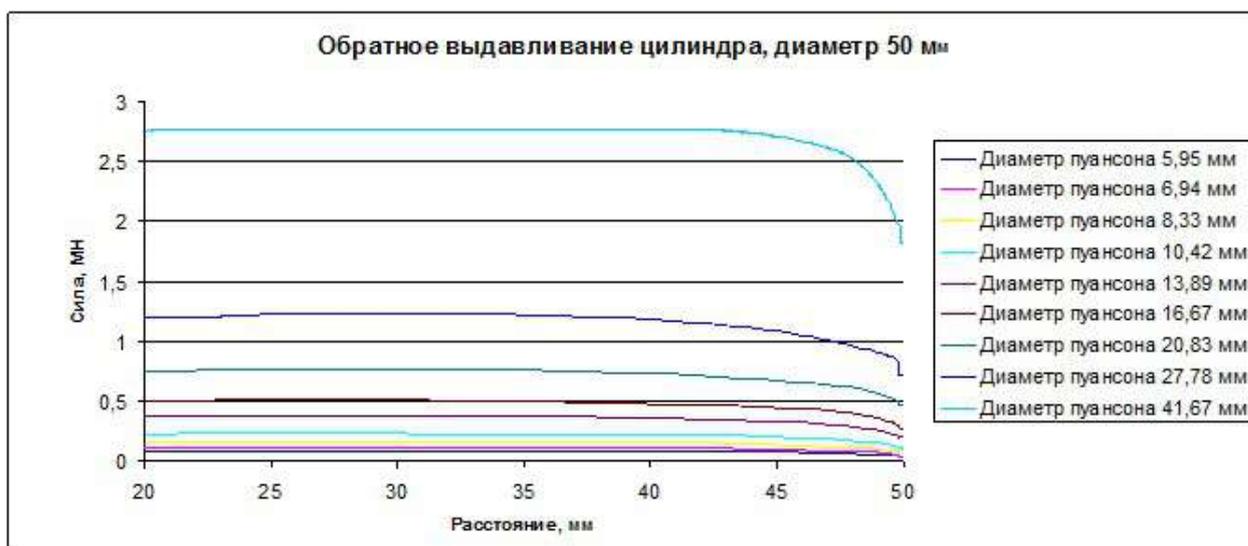


Рисунок 3.1.1.4 – Типовой график «ход – деформирующая сила» для операции обратное выдавливание (цилиндр диаметром 50 мм)

Осадка. Расчет средней температуры в конце процесса

Рассмотрим полученные результаты и порядок их обработки для указанных выше схем.

Полученные расчетные графики хорошо аппроксимируются аналитической зависимостью

$$P = \sigma_T F_0 (1 + \varepsilon)^{2,2},$$

где P – сила деформирования; σ_T – предел текучести стали; F_0 – начальная площадь поперечного сечения цилиндрической заготовки; $\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h}$ – показатель, отражающий осредненную деформацию детали; h_0 и h – начальная и текущая высота заготовки.

Мощность, развиваемая рабочим органом деформирующей машины,

$$N = P v,$$

где v – текущая скорость движения рабочего органа.

За время dt в детали в результате тепловыделения от деформации происходит повышение температуры dT_1 , равное

$$dT_1 = \frac{N dt}{c \rho V},$$

где V – объем детали;

$$V = F_0 h_0.$$

Одновременно температура детали изменяется на величину dT_2 в результате теплопередачи в штамп:

$$dT_2 = \frac{Qdt}{c\rho V} = \frac{\alpha F_k (T - T_u) dt}{c\rho V},$$

где $F_k = 2F$; F – текущая площадь поперечного сечения детали; $F = \frac{F_0 h_0}{h}$; F_k – поверхность контакта детали с верхней и нижней половиной штампа.

Таким образом, суммарное изменение температуры детали за время dt составляет

$$dT = dT_1 - dT_2. \quad (3.1.1.3)$$

После подстановки в формулу (3.1.1.3) значений dT_1 и dT_2 получаем дифференциальное уравнение, в котором роль функции играет температура, а независимого переменного – время:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\sigma_T F_0 v \left(1 + \ln \frac{h_0}{h}\right)^{2,2}}{c\rho V} - \frac{2\alpha(T - T_u)}{c\rho h}. \quad (3.1.1.4)$$

Это уравнение можно решить численно, если известны закон изменения текущей высоты детали h по времени, т.е. закон движения рабочего органа деформирующего пресса v .

Рассмотрим частные случаи холодной объемной штамповки по схеме осадки при различных скоростях деформации (гидравлический и кривошипный пресс).

1. Осадка на гидравлическом прессе. В этом случае с определенной погрешностью можно принять, что скорость деформирования v постоянна. Подобное условие практически выполняется, если номинальная сила пресса существенно превышает силу осадки. Тогда

$$h = h_0 - vt.$$

Если разбить ход пресса $S_{кон} = h_0 - h_{кон}$, где $h_{кон}$ – конечная высота поковки, на K этапов, то время каждого этапа будет $\Delta t = \frac{h_0 - h_{кон}}{K}$, и уравнение (3.1.1.4) можно решить одним из численных методов.

2.Осадка на кривошипном прессе. В этом случае скорость деформирования изменяется по закону

$$v = \omega R \left(\sin \alpha + \frac{\lambda \sin 2\alpha}{2} \right), \quad (3.1.1.5)$$

а рабочий ход пресса –

$$S = R \left[1 - \cos \alpha + \frac{\lambda(1 - \cos 2\alpha)}{4} \right], \quad (3.1.1.6)$$

где ω – угловая скорость вращения кривошипного вала; $\omega = \frac{\pi n}{30}$; n – число ходов

пресса в минуту; R – радиус кривошипа; $\lambda = \frac{R}{L}$; L – длина шатуна; α – угол поворота кривошипного вала.

Полный рабочий ход пресса

$$S_{кон} = h_0 - h_{кон},$$

где $h_{кон}$ – конечная высота детали.

Воспользовавшись соотношением (3.1.1.7), можно найти угол поворота кривошипа в момент начала процесса осадки

$$\alpha_{нач} = \arccos \left(-\frac{1}{\lambda} + \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} + 1 + \frac{2}{\lambda} - \frac{2S_{кон}}{\lambda R}} \right). \quad (3.1.1.7)$$

Процесс осадки заканчивается в момент $\alpha_{кон} = 0$.

Уравнение (3.1.1.4) решается методом Рунге – Кутты.

Прямое выдавливание. Расчет средней температуры в конце процесса

На рисунке 3.1.1.1б показана схема процесса, а на рисунке 3.1.1.3– типовые расчетные графики изменения деформирующей силы по ходу пуансона, которые можно аппроксимировать формулой

$$P = 2 F_0 \sigma_T \varepsilon,$$

где F_0 – площадь поперечного сечения выдавливаемой заготовки;

$$F_0 = \frac{\pi}{4} D^2;$$

ε – приближенная оценка деформации при прямом выдавливании; $\varepsilon = \ln \lambda$;

λ – вытяжка; $\lambda = \frac{F_0}{F}$; F – площадь поперечного сечения выдавливаемого стержня.

Площадь контакта детали с поверхностью штампа с некоторым приближением можно принять постоянной и равной начальной площади поверхности заготовки, а нормальное давление на этой поверхности равным давлению на пуансоне $q = \frac{P}{F_0}$.

На самом деле поверхность детали постепенно увеличивается по мере выдавливания металла из цилиндрической части матрицы; но нормальное давление на цилиндрической поверхности меньше, чем на торце пуансона, что компенсирует упомянутую выше погрешность.

Дальнейший расчет проводится по той же формуле, которая изложена выше для процесса осадки (формула 3.1.1.4).

Обратное выдавливание. Расчет средней температуры в конце процесса

На рисунке 3.1.1.1в показана схема процесса [71], на рисунке 3.1.1.4 – типовые расчетные графики изменения деформирующей силы по ходу пуансона, которые приближенно можно аппроксимировать формулой

$$P = 2,6 F_0 \sigma_T \varepsilon,$$

где F_0 – площадь поперечного сечения выдавливаемой заготовки;

$$F_0 = \frac{\pi}{4} D^2;$$

ε – приближенная оценка деформации при обратном выдавливании;

$$\varepsilon = \ln \lambda;$$

Λ – вытяжка;

$$\Lambda = \frac{F_0}{F_0 - F_n};$$

F_n – площадь поперечного сечения рабочей части пуансона.

Дальнейший расчет проводится по той же формуле, которая изложена выше для процесса осадки (формула 3.1.1.4).

3.1.2. Нахождение средней температуры детали экспериментально

Известно, что при нагреве матрицы фосфатное покрытие с мылом на заготовке работает все менее эффективно [75]. Нагрев в результате теплового эффекта от деформации при холодной объемной штамповке детали «Корпус» (рисунок 3.1.2.1) достигает $90 \div 100^\circ\text{C}$. Отмечено повышение силы формообразования до 1860 кН при нагреве по сравнению с силой деформирования заготовки при начальной температуре 20°C .



Рисунок 3.1.2.1 – Поковка «Корпус»

Для установления средней температуры детали были проведены эксперименты с использованием датчика, фиксирующего инфракрасное излучение, изготовленного фирмой MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GmbH & Co. KG (рисунок 3.1.2.2).

Диапазон измерений температуры данного датчика лежит в пределах от -20°C до $+150^{\circ}\text{C}$; шкала измерения 0,01 мм; оптическое разрешение равно 15:1; воспринимаемые длины волн находятся в пределах от 8 мм до 14 мм; время реагирования датчика 150 мс; контрольные размеры: длина 35 мм, диаметр 12 мм.

Для выдавливания пользовались гидравлическим прессом ($v=14$ мм/с) модели ДО138Б (рисунок 3.1.2.5). Измерения температуры проводили на 20 деталях после выдавливания (рисунок 3.1.2.4) в момент выталкивания (выталкивание производилось автоматически сразу после штамповки, из чего следует вывод о том, что существенных потерь температуры при измерении не было) детали из матрицы (масса матрицы с бандажом 6,650 кг), затем матрицу остужали в воде (до комнатной температуры). Всего было осуществлено 3 эксперимента измерений. На рисунке 3.1.2.3 показана схема штампа с установленным на нем датчиком.



Рисунок 3.1.2.2 – Датчик, фиксирующий инфракрасное излучение

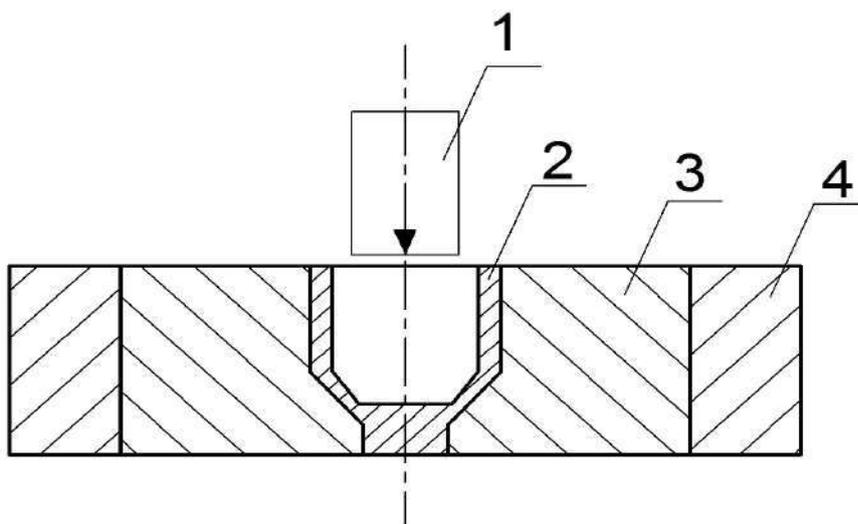


Рисунок 3.1.2.3 - Схема измерения температуры образца (1. Датчик 2. Деталь 3. Матрица 4. Бандаж).



Рисунок 3.1.2.4 – Фото детали после выдавливания



Рисунок 3.1.2.5 – Гидравлический пресс модели ДО138Б

Результаты измерений представлены в таблице 3.1.2.2 и на рисунке 3.1.2.6. Они свидетельствуют о том, что средняя температура детали при деформации увеличивается, но не превышает 100°C .

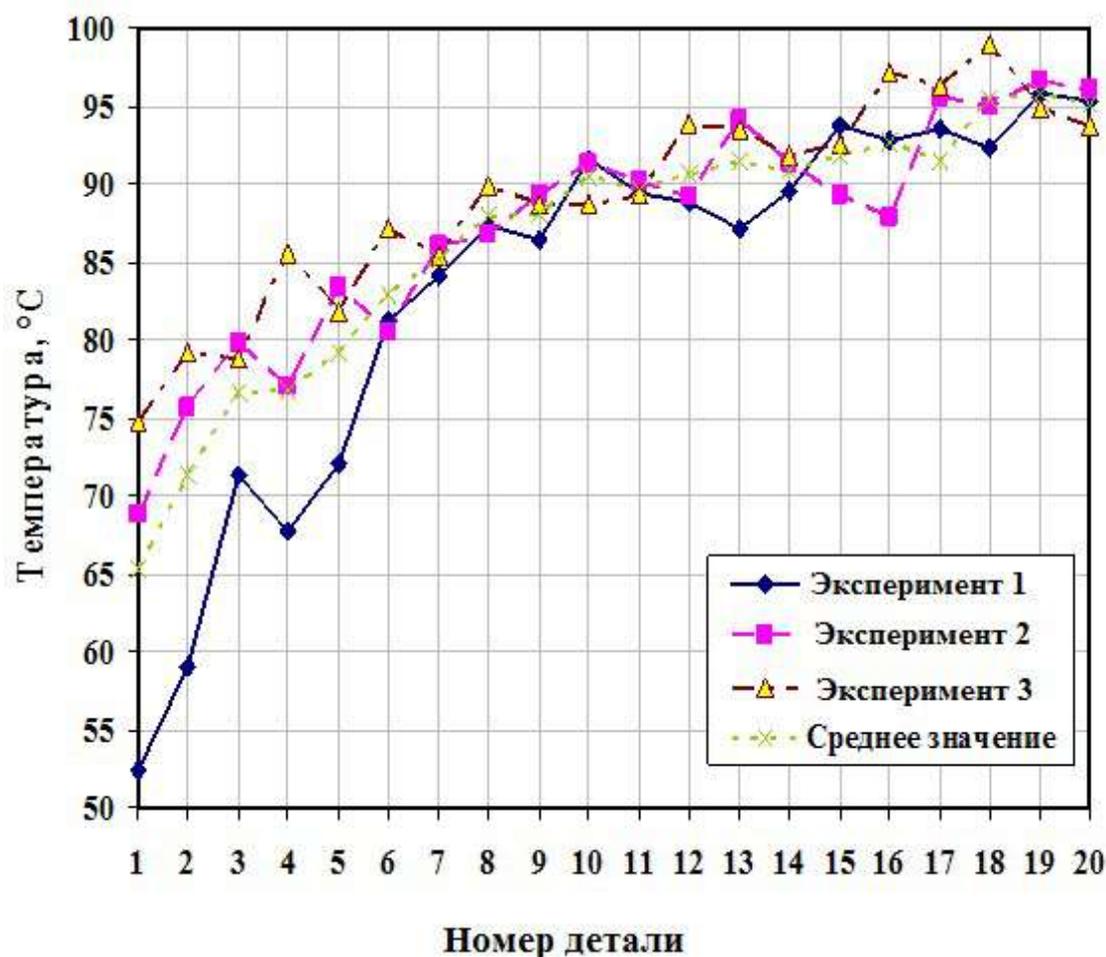


Рисунок 3.1.2.6– Средняя температура по 3-м экспериментам

При холодной объемной штамповке детали «Корпус» в результате теплового эффекта деформации повышается температура заготовки.

Поскольку увеличение температуры деформируемой детали в диапазоне 20°C ÷ 100°C не приводит к возрастанию сопротивления деформации, это может быть объяснено только некоторым ухудшением свойств фосфатного слоя. Однако такое ухудшение еще не приводит к полному его разрушению и образованию дефектов на поверхности детали.

Таблица 3.1.2.2 – Результаты измерения температуры после выдавливания

№ детали	Температура, °С			Средняя из 3 экспериментов	№ детали	Температура, °С			Средняя из 3 экспериментов
	Эксперимент 1	Эксперимент 2	Эксперимент 3			Эксперимент 1	Эксперимент 2	Эксперимент 3	
1	52,4	68,78	74,73	65,3	11	89,36	90,15	89,27	89,6
2	59,07	75,63	79,17	71,3	12	88,74	89,11	93,83	90,6
3	71,27	79,72	78,75	76,6	13	87,09	94,04	93,44	91,5
4	67,72	76,93	85,51	76,7	14	89,57	91,28	91,77	90,9
5	72,02	83,34	81,83	79,1	15	93,71	89,28	92,49	91,8
6	81,17	80,44	87,07	82,9	16	92,8	87,82	97,12	92,6
7	84,11	86,05	85,43	85,2	17	93,53	95,54	96,23	91,5
8	87,33	86,77	89,89	87,9	18	92,34	94,93	98,87	95,4
9	86,41	89,26	88,69	88,1	19	95,84	96,68	94,83	95,8
10	91,59	91,29	88,67	90,5	20	95,29	95,99	93,78	95

С помощью датчика также были произведены измерения температуры деталей «поршень колесный цилиндра переднего тормоза» при штамповке, заготовок диаметром 32; 50мм из стали 20; эти поршни применяются для: ВАЗ 2101 ÷ 2107 (поршень 01); ВАЗ 2108 ÷ 2199, ВАЗ 2110 (поршень 08); ВАЗ 2121, ВАЗ 21213 (поршень 21), изображенные на рисунках 3.1.2.7, 3.1.2.8, 3.1.2.9. Измеряли не только температуру детали после выталкивания из матрицы, как показано на рисунке 3.1.2.11, но и температуру матрицы (во время работы) и пуансона (на выходе из детали), рисунок 3.1.2.10.

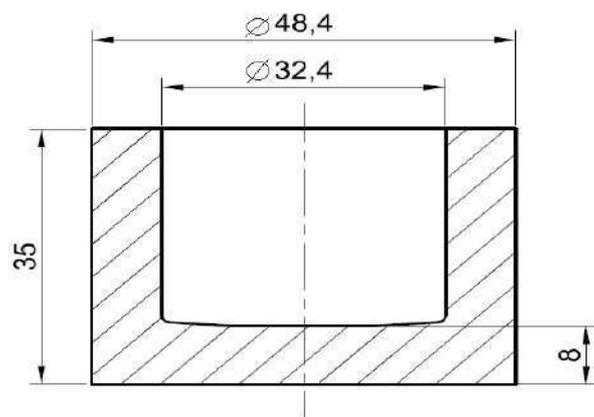


Рисунок 3.1.2.7– Поршень 01

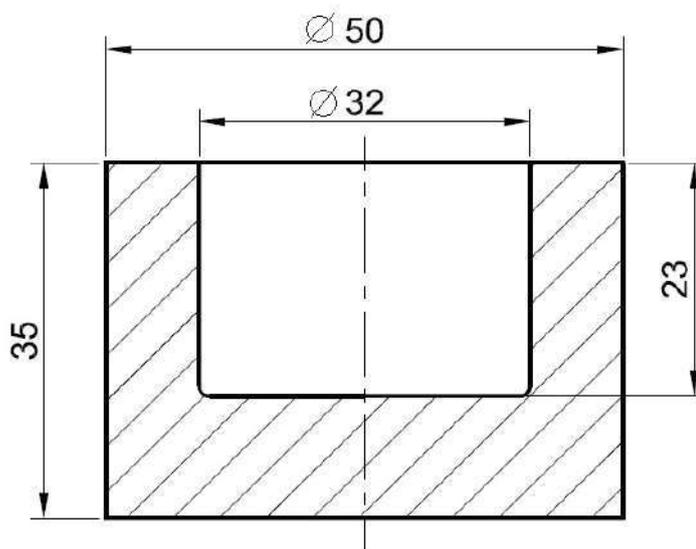


Рисунок 3.1.2.8– Поршень 08

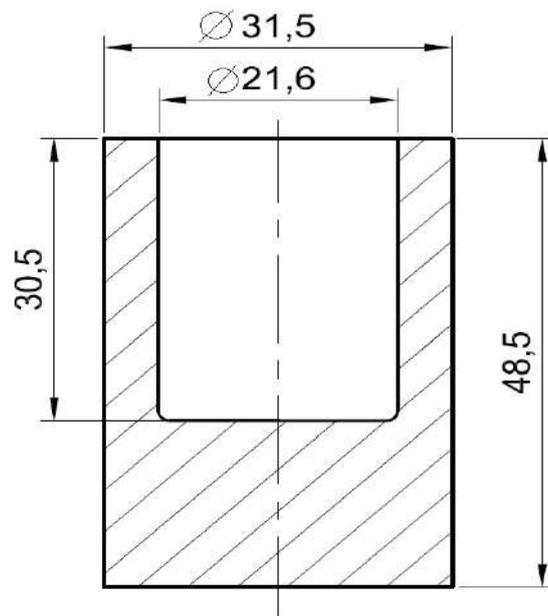


Рисунок 3.1.2.9 – Поршень 21

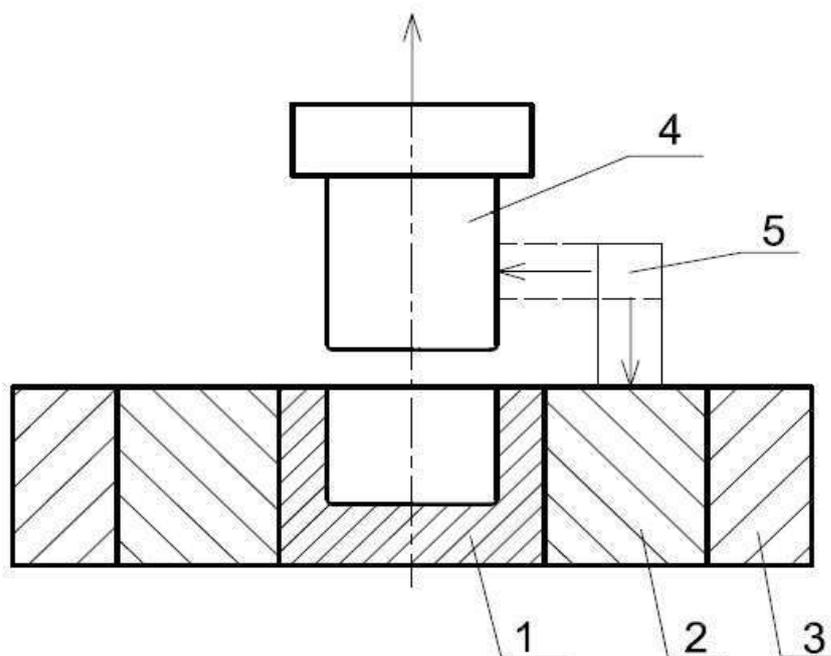


Рисунок 3.1.2.10 – Схема измерения температуры инструмента:
 1. Деталь «поршень». 2. Матрица. 3. Бандаж. 4. Пуансон. 5. Датчик.

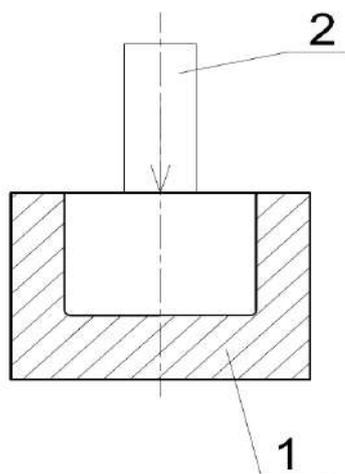


Рисунок 3.1.2.11 – Схема измерения температуры детали:

1. Деталь «поршень». 2. Датчик.

Заранее экспериментальным путем было установлено, после какой по счету детали может выйти из строя инструмент, поэтому каждый из видов поршней штамповался до этого предела. Поршень 01 – 40 шт.; поршень 08 – 50 шт.; поршень 21 – 70 шт.

Таблица 3.1.2.3 – Температура для поршня 08.

Порядковый номер детали	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Матрица	25	26	27	29	31	32	34	34	35	36
Пуансон	32	38	42	47	51	58	61	62	63	64
Деталь	96	98	106	108	115	115	116	116	117	118

Порядковый номер детали	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Матрица	38	40	40	41	41	42	43	45	45	46
Пуансон	65	66	67	68	70	71	71	73	73	73
Деталь	118	119	119	120	121	121	122	123	123	124

Порядковый номер детали	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Матрица	46	47	47	48	48	49	49	49	50	50
Пуансон	75	75	75	77	77	77	78	80	81	83
Деталь	125	125	126	127	127	126	127	128	129	128

Порядковый номер детали	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Матрица	50	51	51	51	51	52	52	52	53	53
Пуансон	84	86	87	88	88	88	89	90	90	90
Деталь	129	130	130	131	131	130	133	132	133	135

Порядковый номер детали	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Матрица	53	53	54	54	54	54	54	54	54	54
Пуансон	91	92	92	92	93	94	95	96	96	97
Деталь	135	134	135	136	137	137	137	138	138	137

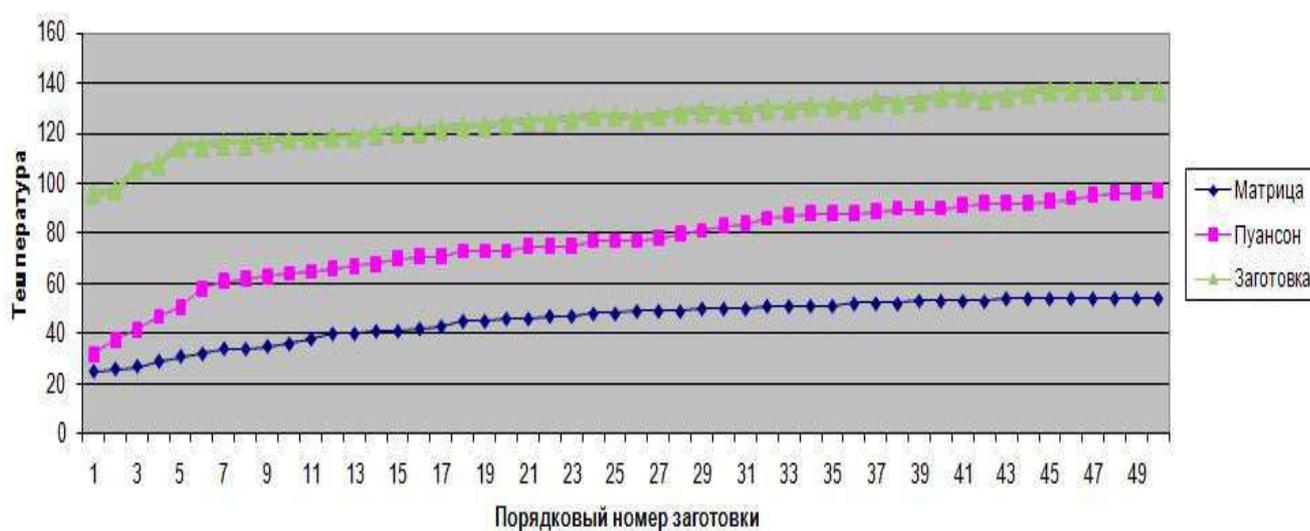


Рисунок 3.1.2.12 – по данным для поршня 08

Таблица 3.1.2.4 – Температура для поршня 01

Порядковый номер детали	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Матрица	25	26	27	30	31	32	33	33	34	35
Пуансон	47	53	62	72	80	87	90	92	95	97
Деталь	75	82	87	91	92	94	96	99	100	101

Порядковый номер детали	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Матрица	36	36	37	38	38	38	39	39	40	41
Пуансон	98	98	98	99	99	99	100	100	100	100
Деталь	102	102	103	104	104	105	105	105	106	106

Порядковый номер детали	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Матрица	42	43	44	44	44	44	45	45	45	46
Пуансон	101	101	102	102	102	103	103	104	104	104
Деталь	107	107	108	108	108	108	109	109	109	110

Порядковый номер детали	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Матрица	47	47	48	48	49	50	50	51	52	52
Пуансон	105	105	106	106	106	107	107	107	107	107
Деталь	110	111	111	112	113	113	114	114	114	114

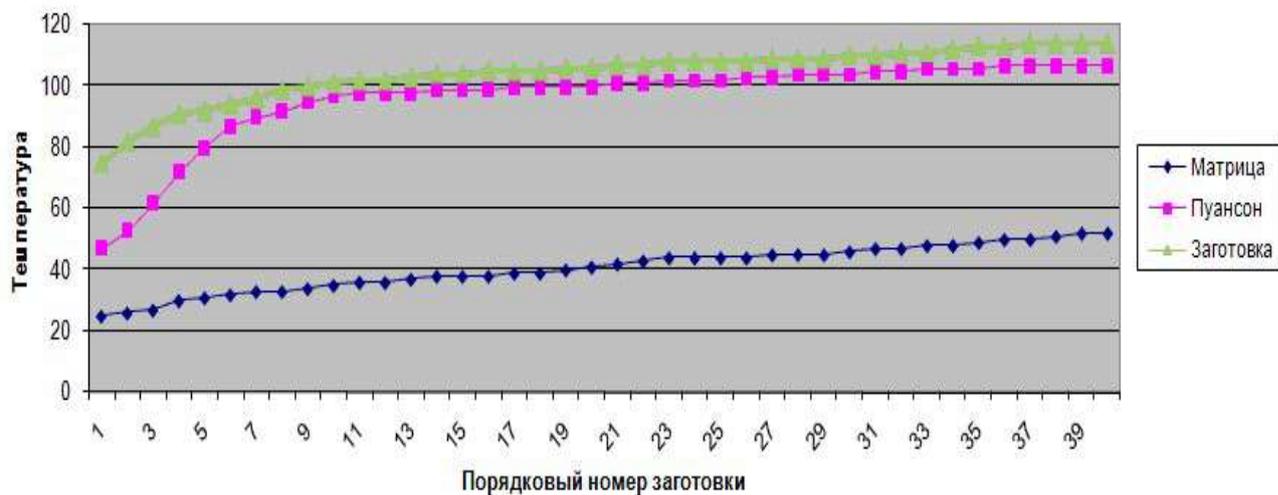


Рисунок 3.1.2.13 – по данным для поршня 01

Таблица 3.1.2.5 – Температура для поршня 21

Порядковый номер детали	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Матрица	21	22	22	22	23	23	23	23	24	24
Пуансон	38	47	51	51	52	52	53	53	54	54
Деталь	67	75	81	85	90	92	92	94	94	94

Порядковый номер детали	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Матрица	24	25	25	24	25	26	26	26	27	27
Пуансон	55	55	56	56	57	57	57	57	58	58
Деталь	95	95	96	96	96	97	96	97	98	98

Порядковый номер детали	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Матрица	28	28	29	29	29	29	30	30	30	31
Пуансон	58	58	59	59	59	59	60	60	60	61
Деталь	98	98	99	99	99	99	100	100	100	100

Порядковый номер детали	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Матрица	31	32	32	33	33	33	33	34	34	34
Пуансон	61	61	61	61	62	62	62	62	62	63
Деталь	101	101	102	102	102	103	103	103	103	104

Порядковый номер детали	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Матрица	35	35	35	35	35	36	36	36	37	37
Пуансон	63	63	63	64	64	64	65	65	65	66
Деталь	104	104	104	105	105	105	105	105	105	106

Порядковый номер детали	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Матрица	37	38	38	39	39	39	40	40	40	41
Пуансон	66	66	66	67	67	67	68	68	68	68
Деталь	106	106	107	107	108	109	109	110	110	110

Порядковый номер детали	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
Матрица	41	41	42	42	42	42	42	42	42	42
Пуансон	68	69	69	70	70	70	70	70	70	70
Деталь	110	111	111	112	112	112	112	112	112	112

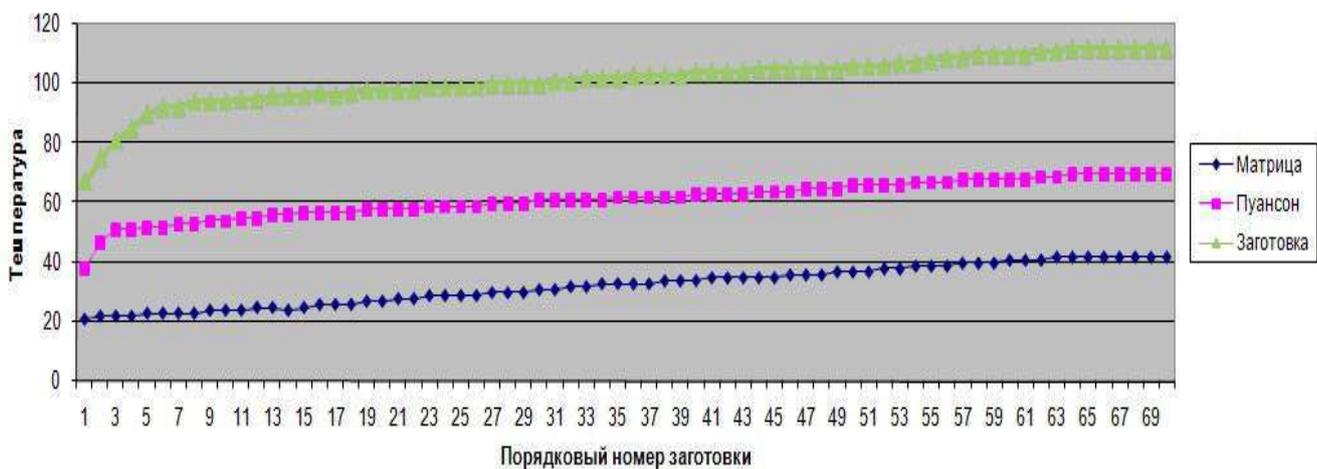


Рисунок 3.1.2.14 – по данным для поршня 21

3.1.3. Сопоставление результатов и выводы

Из сопоставления расчетных результатов средней температуры деталей «поршень колесный цилиндра переднего тормоза» после деформации с экспериментальными данными видно, что последнее в целом подтверждают теорию. Расхождения в некоторых случаях имеются, но не превышают 4,5 %.

При изучении эффективности работы технологического покрытия на водно-графитовой основе, используемых при горячей штамповке заготовок лопаток из жаропрочных сплавов [30; 57], температура на контакте деформируемого металла с инструментом в результате тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент может значительно (иногда на 300°C) превышать температуру при пассивном контакте двух нагретых тел. Вычисление фактической температуры на контакте, а также установление предельных значений температуры, выдерживаемых фосфатным покрытием, является задачей следующего этапа настоящего исследования.

После измерения температуры также были взяты первая и двадцатая деталь. Чтобы показать различия внутренней ответственной поверхности, предоставлен разрез детали. Как видно на рисунках 3.1.3.1 и 3.1.3.2, первая деталь выходит с чистой внутренней поверхностью, а двадцатая деталь уже выходит с вырывом металла на внутренней поверхности.



Рисунок 3.1.3.1 – Фрагмент детали «Корпус» без дефектов (1-ая деталь)



Рисунок 3.1.3.2 – Фрагмент детали «Корпус» с образовавшимся после штамповки браком (20-ая деталь)

Проведенные измерения температуры показывают, что температура детали не превышает предела работоспособности фосфатного слоя, установленного в главе 2 измерением показателя трения осадкой кольцевых образцов, предвари-

тельно подвергавшихся нагреву. По характеру брака видно, что дефект образовался из-за трения инструмента о деталь. Как видно из результатов эксперимента, фосфатный слой все-таки разрушается. Это позволяет сделать вывод о том, что на контакте инструмента и детали фактически получается другая температура, гораздо выше, при которой технологическое покрытие фосфатирование с омыливанием уже не работает, также присутствует высокое давление.

Так как точную температуру в тонком поверхностном слое детали в момент деформации измерить физически нельзя, то мы ее будем определять теоретически.

3.2. Определение температуры поверхностного слоя детали за счет тепловыделения на границе деталь-инструмент

Общая постановка задачи

При скольжении твердых тел друг по другу большая часть работы трения переходит в теплоту. Эта теплота отводится от поверхности за счет теплопроводности и излучения. Простой расчет показывает, что даже при умеренной скорости и незначительной нагрузке температура поверхности может достигать очень высоких значений. Обычными методами эту температуру измерить трудно. Если поместить в массу детали поблизости от трущихся поверхностей термопару, то она покажет незначительный прирост температуры частично из-за сравнительно большой их теплоемкости, но главным образом благодаря тому, что температура по мере удаления от трущейся поверхности быстро падает. Температуру поверхностей можно измерить, используя сами поверхности в качестве спая термопары. Если трущиеся поверхности изготовлены из различных металлов, то термо-э.д.с., возникающая при скольжении, служит мерилем температуры поверхности. Очевидно, что термоэлектрические эффекты и тепловыделение при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент возникают в одних и тех же точках непосредственного контакта между поверхностями. Поэтому подобные термоэлектрические измерения позволяют судить о температуре поверхностных слоев металлов в точках фактического контакта [30; 64]. Однако в нашем случае выполнить такие измерения технически очень трудно.

Повышение температуры металла оказывает существенное влияние и на его механические характеристики.

Из источника [64] следует, что нагрев углеродистой стали примерно до 100 °С несколько увеличивает пластичность и уменьшает сопротивление деформированию. Дальнейшее увеличение температуры примерно до 300 °С значительно уменьшает пластичность и увеличивает прочность. Это предположительно объясняется выпадением мельчайших частиц карбидов по плоскостям скольжения аналогично процессу старения. Дальнейшее увеличение температуры приводит к постепенному, но значительному уменьшению прочности. Изменение прочностных характеристик (твёрдости, предела текучести, предела прочности) с изменением температуры подчиняется экспоненциальной зависимости для металлов и сплавов, не имеющих физико-химических превращений в данном интервале температур (закон Курнакова). Математическая запись этого закона представлена в виде

$$p_{T1} = p_{T2} e^{\alpha(T_1 - T_2)},$$

где p_{T1} – значение прочностной характеристики при температуре T_1 ; p_{T2} – то же, при температуре T_2 ; α – температурный коэффициент, постоянный для данного металла (сплава), если в этом интервале температур в нем отсутствуют физико-химические превращения [40; 62].

Граничные условия при решении тепловых задач

1. Граничное условие первого рода состоит в задании распределения $t_{\text{тем}}$ по поверхности тела в любой момент времени, т.е.

$$T_{II}(\tau) = f(\tau),$$

где $T_{II}(\tau)$ – температура на поверхности тела.

2. Граничное условие второго рода состоит в задании плотности теплового потока для каждой точки поверхности тела как функции времени, т.е.

$$q_{II}(\tau) = f(\tau).$$

Простейший случай граничного условия второго рода состоит в постоянстве плотности теплового потока:

$$q_{II}(\tau) = q_C = \text{const}.$$

3. Обычно граничное условие третьего рода характеризует закон конвективного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой при постоянном потоке тепла (стационарное температурное поле). В этом случае количество теплоты, передаваемой в единицу времени с единицы площади поверхности тела

в окружающую среду с температурой T_C в процессе охлаждения ($T_{II} > T_C$), прямо пропорционально разности температур между поверхностью тела и окружающей средой, т.е.

$$q_{II} = \alpha (T_{II} - T_C),$$

где α – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплообмена ($вт/(м^2 \cdot К)$). Для процесса нагрева тела можно написать аналогичное соотношение, поменяв местами T_{II} и T_C . Коэффициент теплообмена численно равен количеству теплоты, отдаваемой (или получаемой) единицей площади поверхности тела в единицу времени при разности температур между поверхностью и окружающей средой в 1°C .

4. Граничное условие четвертого рода соответствует теплообмену тела с окружающей средой, когда температуры соприкасающихся поверхностей одинаковы.

$$T_{II}(\tau) = [T_C(\tau)]_{II}, -\lambda_c \left(\frac{\partial T_C}{\partial n} \right)_{II} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{II}.$$

Граничные условия тесно связаны друг с другом в том смысле, что определенный закон изменения температуры на поверхности тела обусловлен некоторым тепловым потоком, и наоборот [40].

Для выполнения поставленной задачи прибегнем к классическим решениям теории теплопроводности.

Принятые допущения

1. Так как толщина исследуемого слоя крайне мала (ее величина составляет около 0,02 мм [24; 36; 38]) по сравнению с остальными размерами реальных деталей, подвергаемых ХОШ, будем считать, что речь идет о распределении температуры в двух стержнях, соприкасающихся своими торцовыми поверхностями; боковая поверхность этих стержней имеет тепловую изоляцию (граничные условия четвертого рода).

2. На контактной поверхности действует постоянный тепловой поток (граничное условие второго рода).

Алгоритм расчета приращения температуры на границе деталь-инструмент

В реальных условиях величина теплового потока от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент может быть, как

постоянной, так и переменной; в последнем случае будем пользоваться ее средним за время деформации значением.

При действии постоянного теплового потока q_c на границе контакта двух тел, характеристика которых дана выше, приращение температуры в приконтактном слое детали может быть найдена согласно зависимости [40]

$$\Delta T(x, t) = \frac{K_{\mathcal{E}}}{1 + K_{\mathcal{E}}} \cdot \frac{2q_c}{\lambda} \sqrt{at} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}}, \quad (3.2.1)$$

где $K_{\mathcal{E}}$ – тепловая активность первого тела (материала детали) по отношению ко второму (материалу штампа);

$$K_{\mathcal{E}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}};$$

λ_1 и λ_2 – теплопроводность материала деформируемой заготовки и штампа соответственно; a_1 и a_2 – температуропроводность материала детали и материала штампа;

$$a_i = \frac{\lambda_i}{c_i \rho_i};$$

c_i, ρ_i – теплоемкость и плотность того и другого материала; t – время действия теплового потока; x – расстояние от поверхности соприкосновения двух тел;

$$\operatorname{ierfc} u = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} - u \operatorname{erfc} u ;$$

$$\operatorname{erfc} u = 1 - \operatorname{erf} u,$$

$\operatorname{erf} u$ – функция ошибок Гаусса;

$$\operatorname{erf} u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-u^2} du ;$$

$$\operatorname{erf} \frac{\sqrt{\pi}}{2} u = \frac{u}{1} - \frac{u^3}{1!3} + \frac{u^5}{2!5} - \dots$$

Значения функции $\operatorname{ierfc}u$ приведены также в справочной литературе [40].

С достаточной степенью точности можно принять, что $K_{\Sigma}=1$; это означает, что половина действующего на контактной поверхности теплового потока пойдет на нагрев штампа, а вторая половина на нагрев приконтактных слоев деформируемой детали.

Рассмотрим частные случаи холодной объемной штамповки, при разных скоростях деформации (гидравлический и кривошипный пресс):

- 1) осадка цилиндрического образца;
- 2) прямое выдавливание через коническую матрицу;
- 3) обратное выдавливание.

Осадка цилиндрического образца

Установим наиболее нагруженную в тепловом отношении точку деформируемой детали и среднюю величину теплового потока в этой точке. Очевидно, эта точка находится на торце детали. Удельный тепловой поток

$$q = v_{\rho} \cdot \mu \sigma_z \quad (3.2.2)$$

где v_{ρ} - радиальная составляющая скорости точек на контактной поверхности;

$$v_{\rho} = \frac{v\rho}{2h};$$

ρ – текущий радиус; σ_z – нормальное напряжение на торцевой поверхности.

При малом значении показателя трения, характерном для ХОШ стальных деталей, подвергнутых фосфатированию с омыливанием, примем, что касательное напряжение на торце $\sigma_{\rho z}$ пропорционально нормальному напряжению σ_z [69]:

$$|\sigma_{\rho z}| = |\mu \sigma_z| = \mu \sigma_s \exp \frac{2\mu \left(\frac{d}{2} - \rho \right)}{h}, \quad (3.2.3)$$

где σ_s – напряжение текучести деформируемого металла.

Выясним, до каких значений $\frac{d}{h}$ справедливо соотношение (3.2.3). В предельном случае при $\rho=0$ значение касательного напряжения $|\sigma_{\rho s}|$ достигнет половины напряжения текучести σ_s , т.е.

$$|\sigma_{\rho z}| = \mu \sigma_s \exp \frac{2\mu \left(\frac{d}{2} - \rho \right)}{h} = \mu \sigma_s.$$

Из последнего выражения следует, что формула (3.2.3) при $\mu=0,05$ остается справедливой до значений $\frac{d}{h} \geq 4\sigma$, т.е. практически для всех реальных случаев ХОШ.

Из формулы 3.2.2 видно, что тепловой поток прямо пропорционален радиальной скорости течения металла, которая максимальна на внешней поверхности детали. Таким образом, точка с наибольшей температурой будет находиться на внешнем радиусе контактной поверхности.

Теперь можно найти величину среднего значения теплового потока в опасной точке при осадке заготовки с размерами d_0 и h_0 до размеров d_k и h_k .

Пусть деформирование ведется на небольшой постоянной скорости (на гидравлическом прессе).

Тогда текущая высота детали $h=h_0-vt$; диаметр

$$d = d_0 \sqrt{\frac{h_0}{h_0 - vt}};$$

конечное время процесса $t_k = \frac{h_0 - h_k}{v}$.

Тепловой поток, действующий в опасной точке $\rho = \frac{d}{2}$:

$$q = \mu v (\sigma_T + A \varepsilon^n) d_0 \sqrt{\frac{h_0}{(h_0 - vt)^3}};$$

среднее значение теплового потока

$$q_c = \frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} q dt .$$

Здесь σ_T – предел текучести деформируемого металла; A и n – коэффициенты, характеризующие кривую упрочнения данного металла.

$$\sigma_s = \sigma_T + A\varepsilon^n;$$

ε – деформация детали; $\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h}$.

Если осадка ведется большой скорости деформирования (на кривошипном прессе), то при решении задачи о тепловыделении при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент и нахождении среднего значения теплового потока на поверхности детали можно, используя кинематические соотношения (3.1.1.5) и (3.1.1.6) (Приложение А).

Прямое выдавливание через коническую матрицу

В этом случае наиболее нагруженные в тепловом отношении точки поверхности детали будут очевидно проходить через коническую часть матрицы. Задача нахождения нормального напряжения на контактной конической поверхности весьма непростая; поэтому при расчете температуры в приконтактном слое детали ограничимся рассмотрением наиболее тяжелых условий деформирования.

Известно, что при прямом выдавливании стальных деталей из низкоуглеродистых и низколегированных сталей рекомендуемые относительные деформации не должны превышать 70%, что соответствует вытяжке $A=3,3$, а предельно допустимые удельные силы, действующие на инструмент – 2200 МПа, примем, что нормальное давление на контактной поверхности $\sigma_n=2000$ МПа, диаметр исходной заготовки $\varnothing=50$ мм, угол матричной воронки 45° (рисунок 3.2.2). Вытяжке $A=3,3$ соответствует диаметр выдавливаемого прутка $\varnothing=35$ мм. При скорости деформирования v_0 скорость скольжения деформируемого металла по матрице [61]

$$v_\rho = \frac{v \cos Q_1 R^2}{\rho^2}, \quad (3.2.4)$$

где ρ – текущий радиус точки на поверхности детали, скользящей по поверхности матрицы; R и r – радиусы поверхностей, отделяющих очаг деформации от жестких зон (исходного металла и выдавленного прутка соответственно); в нашем примере $R=50$ мм; $r=35$ мм.

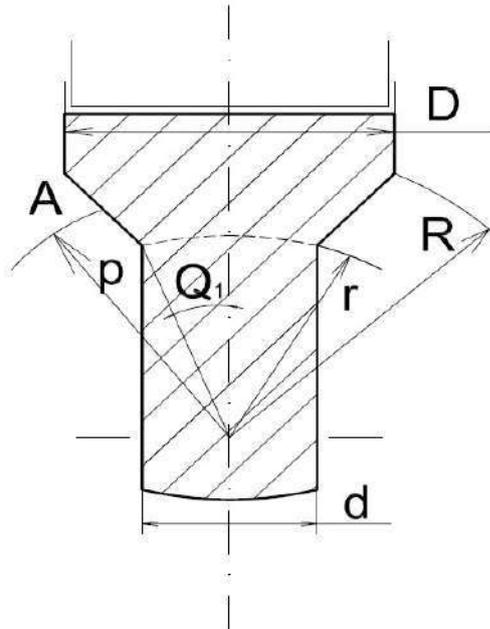


Рисунок 3.2.1 – Прямое выдавливание через коническую матрицу.

Среднее значение скорости скольжения

$$v_{cp} = \frac{\int_0^R v_{\rho} d\rho}{R - r} = v \cos Q_1 \frac{R}{r},$$

а время действия теплового потока (если пренебречь тепловыделением от трения при движении заготовки в цилиндрической части матрицы)

$$t_k = \frac{R - r}{v_{cp}}.$$

Среднее значение теплового потока определяется формулой (3.2.2) (Приложение А).

Обратное выдавливание

Аналогичный анализ выполняется и для операции обратного выдавливания, если взять за основу вместо зависимости (3.2.4) поле скоростей в очаге деформации для этой деформационной схемы [71].

Чтобы найти итоговую температуру в приконтактном слое детали, возникающую из-за теплового эффекта деформации, можно воспользоваться принципом суперпозиции, т.е. сложить начальную температуру заготовки T_0 с результатом

решения уравнений (3.1.1.4) и (3.2.1). На самом деле такая операция не совсем корректна, так как тепловыделение при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент, рассчитанное по формуле (3.2.1), уже учитывалось в соотношении (3.1.1.4). Однако вклад тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент в повышении средней температуры детали в показателе трения $\mu=0,05$, значение которое было принято в расчетах, весьма незначительно, и этой погрешностью вполне можно пренебречь (Приложение А).

Проведем расчет для каждой из вышеописанных операций и определим температуру на границе деформационного взаимодействия деталь-инструмент. При этом рассматриваем поведение трех материалов с разным пределом текучести (230 МПа; 260 МПа; 400 МПа). Расчеты проводятся для 1-ой детали в партии и 50-й детали. Так же представлен расчет и для 20-ой детали «Корпус», на которой образуется брак.

Расчет средней температуры детали на невысоких скоростях деформации при осадке на гидравлическом прессе.

На рисунке 3.2.2 показано изменение средней температуры детали при осадке на гидравлическом прессе со скоростью 10 мм/с, время осадки 10 с, $h_0=120$ мм, $d_0=60$ мм (d_0 – исходный диаметр заготовки), начальная температура заготовки T_0 принята равной 20°C (расчеты проведены для 1-ой поковки в эксперименте, температура штампа 20°C). Из приведенного графика видно, что конечная средняя по объему температура детали при средней деформации $\varepsilon=1,8$ не превышает 100°C. Время одного полного хода – 27,5 сек.

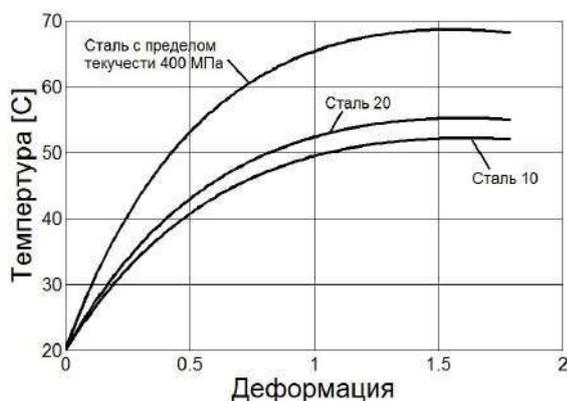


Рисунок 3.2.2 – Изменение температуры детали при осадке на гидравлическом прессе при деформации до 1,8 со скоростью 10 мм/с

При осадке на гидравлическом прессе со скоростью 10 мм/с, температура детали для материала $\sigma_T=400$ МПа составляет 68,14°С при деформации 1,8. Для детали из материала $\sigma_T=260$ МПа температура составляет 54,96°С при деформации 1,8. Для детали из материала $\sigma_T=230$ МПа температура составляет 52°С при деформации 1,8.

На рисунке 3.2.3 показано изменение температуры детали при осадке на гидравлическом прессе со скоростью 1 мм/с, время осадки 100 с, $h_0=120$ мм, $d_0=60$ мм (d_0 – исходный диаметр заготовки), начальная температура заготовки T_0 принята равной 20°С. Из приведенного графика видно, что конечная средняя по объему температура детали при средней деформации $\varepsilon = 1,8$ не превышает 100°С.

При осадке на гидравлическом прессе со скоростью 1 мм/с, температура детали для материала $\sigma_T=400$ МПа составляет 24,73°С при деформации 1,8. Для детали из материала $\sigma_T=260$ МПа составляет 23,45°С при деформации 1,8. Для детали из материала $\sigma_T=230$ МПа составляет 23,16°С при деформации $\varepsilon=1,8$.

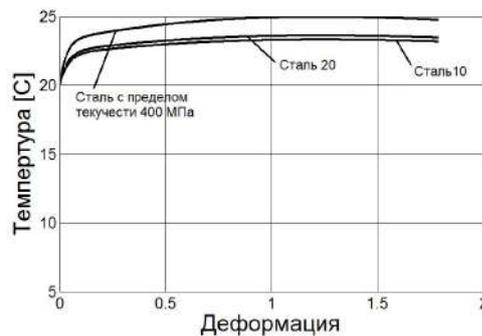


Рисунок 3.2.3 – Изменение температуры детали при осадке на гидравлическом прессе при деформации до 1,8 со скоростью 1 мм/с

Расчет средней температуры детали на больших скоростях деформации при осадке на кривошипном прессе.

При осадке на кривошипном прессе со скоростью 800 мм/с, с характеристиками $R=840$ мм, $\lambda=50$ Вт/м·К, $L=4$ м, $S_{кон}=20$ мм, $n=15$ ход/мин. Имеем график, показанный на рисунке 3.2.4.

Средняя температура детали для материала $\sigma_T=400$ МПа составляет 248,51°С, для материала $\sigma_T=260$ МПа составляет 171,95°С, для материала $\sigma_T=230$ МПа составляет 155,3°С при средней деформации $\varepsilon = 1,8$ (рисунок 3.2.4). Время одного полного хода – 4,0 сек.

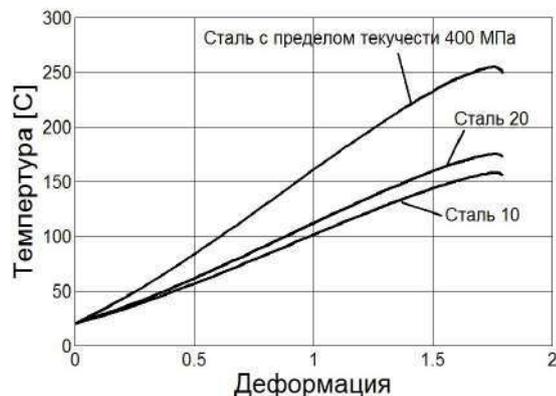


Рисунок 3.2.4 – Изменение температуры детали при осадке на кривошипном прессе при деформации до 1,8

Расчет температуры в критической точке из-за тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент на невысоких скоростях деформации, в процессе осадки на гидравлическом прессе

Вычислим значения температуры детали в опасной точке на глубине 0,02 мм при осадке на гидравлическом прессе с рабочей скоростью 10 мм/с заготовки с размерами $d_0=60$ мм; $h_0=120$ мм; $h_k=20$ мм (рисунок 3.2.5).

При скорости деформирования 10 мм/с, температура в опасной точке для материала $\sigma_T=400$ МПа составляет 31,1°С при деформации 1,8. Для детали из материала $\sigma_T=260$ МПа температура составляет 27,2°С при деформации 1,8. Для детали из материала $\sigma_T=230$ МПа температура составляет 26,4°С при деформации 1,8.

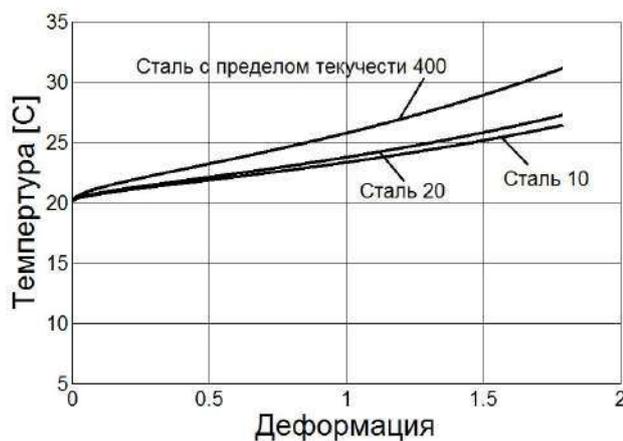


Рисунок 3.2.5 – Изменение температуры критической точки при осадке на гидравлическом прессе при деформации до 1,8, скорость деформирования 10 мм/с

Вычислим значения температуры детали в опасной точке на глубине 0,02 мм при осадке на гидравлическом прессе с рабочей скоростью 1 мм/с заготовки $d_0=60$ мм; $h_0=120$ мм; $h_k=20$ мм.

При осадке на гидравлическом прессе с рабочей скоростью 1 мм/с, температура детали для материала $\sigma_T=400$ МПа составляет 23,51°С при деформации 1,8. Для детали из материала $\sigma_T=260$ МПа температура составляет 22,28°С при деформации 1,8. Для детали из материала $\sigma_T=230$ МПа температура составляет 22,02°С при деформации 1,8 (рисунок 3.2.6).

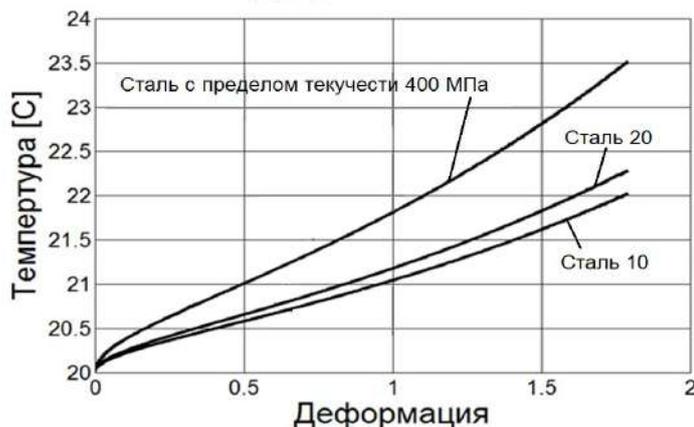


Рисунок 3.2.6 – Изменение температуры критической точки при осадке на гидравлическом прессе при деформации до 1,8 со скоростью 1 мм/с

Расчет температуры в критической точке из-за тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент на больших скоростях деформации, в процессе осадки на кривошипном прессе

При осадке на кривошипном прессе со скоростью 800 мм/с, с характеристиками n (количество оборотов)=15, R (радиус кривошипа)=840 мм, $\lambda=50$ Вт/м·К, L (длина шатуна)=4 м, $S_{кон}=20$ мм повышение температуры от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для стали $\sigma_T=400$ МПа составляет 79,34°С при деформации $\varepsilon=1,8$; для стали $\sigma_T=260$ МПа составляет 58,57°С; для стали $\sigma_T=230$ МПа составляет 54,12°С (рисунок 3.2.7).

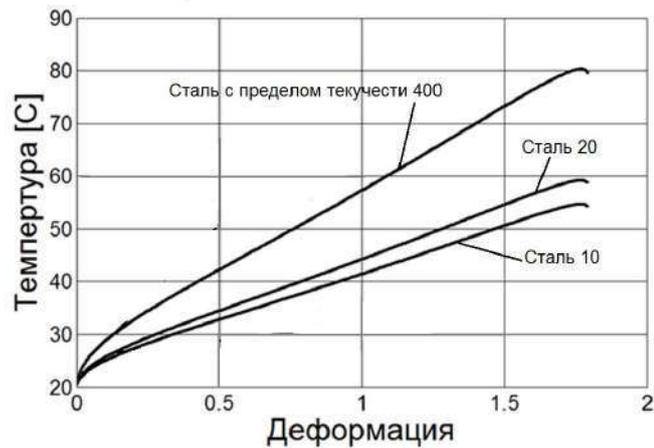


Рисунок 3.2.7 – Изменение температуры критической точки при осадке на кривошипном прессе со скоростью 800 мм/с при деформации до 1,8

В приложении Б представлены расчеты влияния скорости деформирования при осадке на гидравлическом прессе на приращение температуры в приконтактном слое на границе деталь-инструмент при деформировании трех материалов с различным пределом текучести.

Расчет средней температуры детали при прямом выдавливании, при разных скоростях деформации

При выдавливании на гидравлическом прессе со скоростью 10 мм/с, заготовка из стали $\sigma_T=400$ МПа, с исходным диаметром 50 мм и $\epsilon=0,7$ средняя температура детали повышается до 104,49°C; на кривошипном прессе – до 149,72°C (при $n=15$, $R=0,84$, $L=4$). При выдавливании на гидравлическом прессе заготовка из стали $\sigma_T=260$ МПа с исходным диаметром 50 мм и $\epsilon=0,7$ средняя температура детали повышается до 78,03°C; на кривошипном прессе со скоростью 800 мм/с до 105,45°C (при $n=15$, $R=0,84$, $L=4$). При выдавливании на небольших скоростях деформации заготовка из стали $\sigma_T=230$ МПа с исходным диаметром 50 мм и $\epsilon=0,7$ средняя температура детали повышается до 72,17°C (при скорости 10 мм/с); на большой скорости деформации до 95,88°C (при $n=15$, $R=0,84$, $L=4$).

Расчет температуры в критической точке из-за тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент, в процессе прямого выдавливания при разных скоростях деформации

При выдавливании на гидравлическом прессе со скоростью 10 мм/с, заготовка из стали с пределом текучести $\sigma_T=400$ МПа, с исходным диаметром 50 мм и

при средней деформации $\varepsilon=0,7$ температура в критической точке детали повышается до $28,62^{\circ}\text{C}$; на кривошипном прессе со скоростью 800 мм/с – до $39,66^{\circ}\text{C}$ (при $n=15, R=0,84, L=4$). При выдавливании на небольшой скорости деформации заготовка из стали $\sigma_T=260\text{ МПа}$, с исходным диаметром 50 мм и при $\varepsilon=0,7$ температура в критической точке детали повышается до $25,6^{\circ}\text{C}$ (при скорости 10 мм/с); на большой скорости до $32,78^{\circ}\text{C}$ (при $n=15, R=0,84, L=4$). При выдавливании на гидравлическом прессе со скоростью 10 мм/с , заготовка из стали $\sigma_T=230\text{ МПа}$, с исходным диаметром 50 мм и при $\varepsilon=0,7$ температура в критической точке детали повышается до $24,96^{\circ}\text{C}$; на кривошипном прессе со скоростью 800 мм/с , до $31,3^{\circ}\text{C}$ (при $n=15, R=0,84, L=4$).

В приложении Б представлены расчеты влияния скорости деформирования при прямом выдавливании на гидравлическом прессе на приращение температуры в приконтактном слое на границе деталь-инструмент при деформировании трех материалов с различным пределом текучести.

Расчет средней температуры детали при обратном выдавливании при разных скоростях деформации

Результаты расчетов таковы: при тех же размерах заготовки и той же деформации, что и при прямом выдавливании, для стали с пределом текучести $\sigma_T=400\text{ МПа}$ повышение температуры детали при штамповке на гидравлическом прессе составляет $64,44^{\circ}\text{C}$, а на кривошипном со скоростью 800 мм/с – $289,71^{\circ}\text{C}$ (при $n=15, R=0,84, L=4$). Для стали $\sigma_T=260\text{ МПа}$ повышение температуры детали при штамповке на гидравлическом прессе составляет $51,45^{\circ}\text{C}$, а на кривошипном со скоростью 800 мм/с – $199,68^{\circ}\text{C}$ (при $n=15, R=0,84, L=4$). Для стали $\sigma_T=230\text{ МПа}$, повышение температуры детали при штамповке на гидравлическом прессе составляет $48,58^{\circ}\text{C}$ (при скорости 10 мм/с), а на кривошипном со скоростью 800 мм/с – $180,12^{\circ}\text{C}$ (при $n=15, R=0,84, L=4$).

Расчет температуры в критической точке из-за тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент, в процессе обратного выдавливания при разных скоростях деформации

При обратном выдавливании на гидравлическом прессе со скоростью 10 мм/с , заготовка из стали с пределом текучести $\sigma_T=400\text{ МПа}$, с исходным диамет-

ром 50 мм и $\varepsilon=0,7$ температура в критической точке детали повышается на $52,08^{\circ}\text{C}$; на кривошипном прессе со скоростью 800 мм/с – на $118,84^{\circ}\text{C}$ (при $n=15$, $R=0,84$, $L=4$). При обратном выдавливании на гидравлическом прессе со скоростью 100 мм/с, заготовка из стали $\sigma_T=260$ МПа, с исходным диаметром 50 мм и $\varepsilon=0,7$ температура в критической точке детали повышается на $40,85^{\circ}\text{C}$; на кривошипном прессе со скоростью 800 мм/с – на $84,25^{\circ}\text{C}$ (при $n=15$, $R=0,84$, $L=4$). При обратном выдавливании на гидравлическом прессе со скоростью 10 мм/с, заготовка из стали $\sigma_T=230$ МПа, с исходным диаметром 50 мм и $\varepsilon=0,7$ температура в критической точке детали повышается на $38,45^{\circ}\text{C}$; на кривошипном прессе со скоростью 800 мм/с – на $79,84^{\circ}\text{C}$ (при $n=15$, $R=0,84$, $L=4$).

В приложении Б представлены расчеты влияния скорости деформирования при обратном выдавливании на гидравлическом прессе на приращение температуры в приконтактном слое на границе деталь-инструмент при деформировании трех материалов с различным пределом текучести.

Приведенные в настоящей главе примеры показывают, что итоговая температура фосфатного слоя может существенно превышать температуру его разрушения, что и объясняет появление на поверхности детали дефектов в виде задиров и понижение стойкости штампов.

Формулы расчетов для анализов процесса осадки, прямого и обратного выдавливания можно использовать также и для других деформационных схем: радиального выдавливания, вытяжки с утонением, комбинированных процессов.

В данном примере сводим деформацию к 1,0 во всех выше рассмотренных процессах и сравниваем результаты.

Исходные данные:

$h=120$ мм.

Осадка $d_0=60$ мм.

Обратное выдавливание $d_0=37$ мм.

Прямое выдавливание $d_0=50$ мм.

Предел текучести материала = 400 МПа

Показатель трения (для критической точки) = 0,05.

Начальная температура заготовки = 20°C .

Температура штампа для объемного типа расчета = 50°C .

Диаметр стержня для прямого и обратного выдавливания = 30 мм.

Угол на пуансоне при обратном выдавливании = 75° .

Угол на матрице при прямом выдавливании = 45°.

Гидравлический пресс (3МН):

1. Скорость = 14 мм/с.
2. Время процесса для осадки = 5,5 с.

Кривошипный пресс (6,3 МН):

1. Конечная высота заготовки для осадки = 43 мм.
2. Количество оборотов (n) = 15.
3. Радиус кривошипа (R) = 840 мм.
4. Длина шатуна (L) = 4000 мм.
5. Скорость = 800 мм/с.

Результаты расчетов сведены в таблице 3.2.1.

Таблица 3.2.1 – Результаты расчета повышения температуры в различных процессах ХОШ

Вид деформации	Скорость деформации	Тип расчета	Температура детали	Время процесса (с)	Суммарная температура
Осадка	14 мм/с	Деформация	107	5,5	114
		Тепловыделение на границе деталь-инструмент	27	5,5	
	800 мм/с	Деформация	160	0,3	190
		Тепловыделение на границе деталь-инструмент	49,3	0,31	
Обратное выдавливание	14 мм/с	Деформация	163,19	1,6	192
		Тепловыделение на границе деталь-инструмент	64,58	1,6	
	800 мм/с	Деформация	335	0,17	425
		Тепловыделение на границе деталь-инструмент	111	0,17	
Прямое выдавливание	14 мм/с	Деформация	130	0,4667	150
		Тепловыделение на границе деталь-инструмент	38,6	0,47	
	800 мм/с	Деформация	206	0,09	242
		Тепловыделение на границе деталь-инструмент	55	0,09	

Аналогичные расчеты для поковки под номером 50 в эксперименте дают следующие результаты.

Температуру штампа можно найти по формуле (3.1.1.2а и 3.1.1.2б).

Расчет средней температуры 50-ой детали в партии, в процессе осадки при небольших скоростях деформации

На рисунке 3.2.8 показано изменение средней температуры детали при осадке на гидравлическом прессе со скоростью 10 мм/с, время осадки 10 с, $h_0=120$ мм, $d_0=60$ мм (d_0 – исходный диаметр заготовки), начальная температура заготовки T_0 принята равной 20°C (расчеты проведены для 50-ой поковки в эксперименте, температуру штампа берем из таблицы 3.1.2.3).

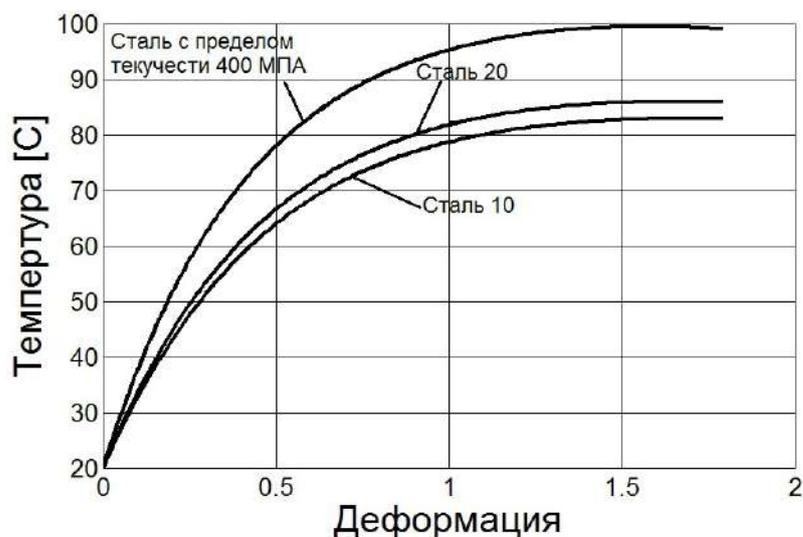


Рисунок 3.2.8 – Изменение температуры детали при осадке на гидравлическом прессе при деформации до 1,8 со скоростью 10 мм/с

При осадке на гидравлическом прессе со скоростью 10 мм/с, температура детали для материала $\sigma_T=400$ МПа составляет 99,07°C при деформации 1,8. Для детали из материала $\sigma_T=260$ МПа температура составляет 85,84°C при деформации 1,8. Для детали из материала $\sigma_T=230$ МПа температура составляет 82,85°C при деформации 1,8.

На рисунке 3.2.9 показано изменение температуры детали при осадке на гидравлическом прессе со скоростью 1 мм/с, время осадки 100 с, $h_0=120$ мм, $d_0=60$ мм (d_0 – исходный диаметр заготовки), начальная температура заготовки T_0 принята равной 20°C (расчеты проведены для 50-ой поковки в эксперименте, температуру штампа берем из таблицы 3.1.2.3).

При осадке на гидравлическом прессе со скоростью 1 мм/с, температура детали для материала $\sigma_T=400$ МПа составляет 55,73°C при деформации 1,8. Для детали из материала $\sigma_T=260$ МПа составляет 54,45°C при деформации 1,8. Для детали из материала $\sigma_T=230$ МПа составляет 54,16°C при деформации $\epsilon = 1,8$.

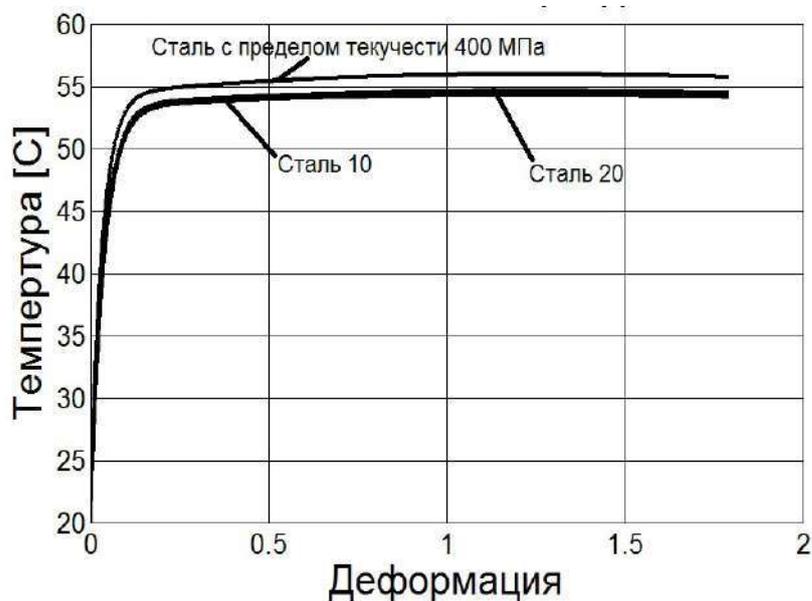


Рисунок 3.2.9 – Изменение температуры детали при осадке на гидравлическом прессе при деформации до 1,8 со скоростью 1 мм/с

Расчет средней температуры 50-ой детали в партии, в процессе осадки при большой скорости деформации

При осадке на кривошипном прессе со скоростью 800 мм/с, с характеристиками $R=840$ мм, $\lambda=50$ Вт/м·К, $L=4$ м, $S_{кон}=20$ мм, $n=15$ ход/мин, температура штампа составляет 51,9°C. Имеем график, показанный на рисунке 3.2.11.

Средняя температура детали для материала $\sigma_T=400$ МПа составляет 256,84°C, для материала $\sigma_T=260$ МПа составляет 179,5°C, для материала $\sigma_T=230$ МПа составляет 162,62°C при средней деформации $\epsilon=1,8$ (рисунок 3.2.10).

Температура в критической точке при осадке на гидравлическом со скоростью 10 мм/с и на кривошипном прессе со скоростью 800 мм/с остается такой же, как и для температуры штампа 20°C.

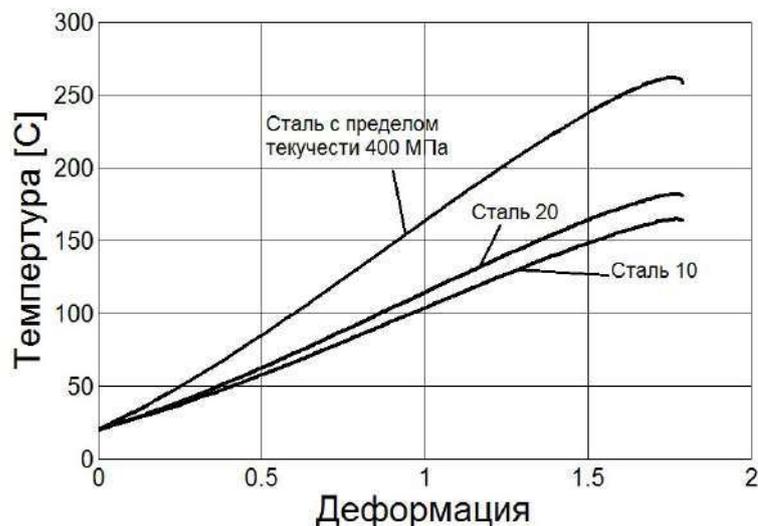


Рисунок 3.2.10 – Изменение температуры детали при осадке на кривошипном прессе со скоростью 800 мм/с при деформации до 1,8

В приложении Б представлены расчеты (для 50-ой детали в партии) влияния скорости деформирования при осадке на гидравлическом прессе со скоростью 10 мм/с на приращение температуры в приконтактном слое на границе деталь-инструмент при деформировании трех материалов с различным пределом текучести.

Расчет средней температуры 50-ой детали в партии, при прямом выдавливании при разных скоростях деформации

При выдавливании на гидравлическом прессе со скоростью 10 мм/с 50-ую поковка температура штампа составляет 51,9°C, заготовка из стали $\sigma_T=400$ МПа, с исходным диаметром 50 мм и $\varepsilon=0,7$, температуру штампа берем из таблицы 3.1.2.3, средняя температура детали повышается до 126,77°C; на кривошипном прессе со скоростью 800 мм/с – до 154,99°C (при $n=15$, $R=0,84$, $L=4$). При выдавливании на гидравлическом прессе со скоростью 10 мм/с, заготовка из стали $\sigma_T=260$ МПа с исходным диаметром 50 мм и $\varepsilon=0,7$ средняя температура детали повышается до 98,95°C; на кривошипном прессе со скоростью 800 мм/с, до 110,18°C (при $n=15$, $R=0,84$, $L=4$). При выдавливании на гидравлическом прессе со скоростью 10 мм/с, заготовка из стали $\sigma_T=230$ МПа с исходным диаметром 50 мм и $\varepsilon=0,7$ средняя температура детали повышается до 92,66°C; на кривошипном прессе со скоростью 800 мм/с, до 100,45°C (при $n=15$, $R=0,84$, $L=4$).

Температура в критической точке при прямом выдавливании на гидравлическом со скоростью 10 мм/с и на кривошипном прессе со скоростью 800 мм/с, остается такой же, как и для температуры штампа 20°C.

В приложении Б представлены расчеты (для 50-ой детали в партии) влияния скорости деформирования при прямом выдавливании на гидравлическом прессе со скоростью 10 мм/с на приращение температуры в приконтактном слое на границе деталь-инструмент при деформировании трех материалов с различным пределом текучести.

Расчет средней температуры 50-ой детали в партии, при обратном выдавливании при разных скоростях деформации

Результаты расчетов таковы: при тех же размерах заготовки, температуру штампа берем из таблицы 3.1.2.3 и той же деформации, что и при прямом выдавливании, для стали с пределом текучести $\sigma_T=400$ МПа повышение температуры детали при штамповке на гидравлическом прессе со скоростью 10 мм/с, составляет 97,93°C, а на кривошипном со скоростью 800 мм/с – 302,26°C (при $n=15$, $R=0,84$, $L=4$). Для стали $\sigma_T=260$ МПа повышение температуры детали при штамповке на гидравлическом прессе со скоростью 10 мм/с, составляет 84,94°C, а на кривошипном со скоростью 800 мм/с – 211,41°C (при $n=15$, $R=0,84$, $L=4$). Для стали $\sigma_T=230$ МПа, повышение температуры детали при штамповке на гидравлическом прессе со скоростью 10 мм/с составляет 82,06°C, а на кривошипном со скоростью 800 мм/с – 191,6°C (при $n=15$, $R=0,84$, $L=4$).

Температура в критической точке при обратном выдавливании на гидравлическом со скоростью 10 мм/с и на кривошипном прессе со скоростью 800 мм/с, остается такой же, как и для температуры штампа 20°C.

В приложении Б представлены расчеты (для 50-ой детали в партии) влияния скорости деформирования при обратном выдавливании на гидравлическом прессе со скоростью 10 мм/с, на приращение температуры в приконтактном слое на границе деталь-инструмент при деформировании трех материалов с различным пределом текучести.

Расчет температуры для 20-ой детали «Корпус»

Деталь изготавливалась из стали 20, наружный диаметр 46 мм, внутренний диаметр 34 мм. Температура штампа составила для 20 детали 55,0°C. Хотя деталь изготавливается методом комбинированного выдавливания, но брак происходит

на поверхности, которая получается методом обратного выдавливания, поэтому сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент при скорости 14 мм/с и деформации 0,8 составит: $102,07+54,0=156,07^{\circ}\text{C}$, что выше температуры, при которой технологическое покрытие фосфатирование с омыливанием работает достаточно эффективно, поэтому и образуется брак [71].

3.3 Выводы к главе 3

1. Получено дифференциальное уравнение, численное решение которого позволяет найти среднее значение температуры в конце процесса деформирования в основных технологических операциях – с учетом теплоотдачи в штамп. Экспериментальные измерения температуры детали, выполненные с помощью датчика, фиксирующего инфракрасное излучение, подтвердили расчеты, проведенные с помощью полученных зависимостей.

2. Установлено, что образование дефектов в виде задиров и налипания металла происходит в результате повышения температуры в тонком поверхностном слое фосфатного покрытия выше критической в результате тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент.

3. Теоретически определена температура тонкого контактного слоя в момент деформации как сумма тепловыделений от трения и пластической деформации металла, с помощью соотношений теории теплопроводности.

ГЛАВА 4. МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТА НА СТАЛЬНОЙ ДЕТАЛИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ

4.1 Исходные данные и допущения, принятые при построении математической модели

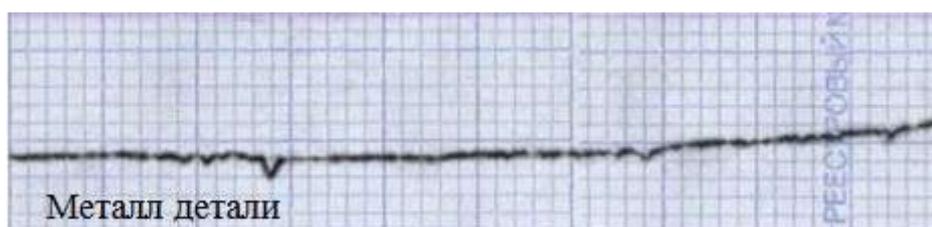
Для исследования механизма образования дефекта на стальной поверхности проводили эксперименты по изучению образования налипания металла и последующих вырывов на поверхности детали «Корпус» получаемой холодной штамповкой.

Материал детали – сталь 20. Деталь штампуется в 2 перехода. Первая технологическая операция и вторая не совмещены в единый последовательный процесс и выполняются в разное время. Дефект возникает на второй операции. Расчеты проводятся в программе Q-form V8 (лицензия № R4-U1788-220914U086, договор от 11.09.2014 № 110914). Протяженность исследуемой поверхности детали «Корпус», на которой образуется дефект, составляет 6 мм (рисунок 4.1.1).



Рисунок 4.1.1 – Место образования дефекта

Выявлено практически, что дефект начинает образовываться с 20 детали в эксперименте. Замеры шероховатости исследуемой поверхности детали «Корпус», выполненные с применением прибора профилограф-профилометр «Калибр 170311», показали, что поверхность имеет следующий профиль (рисунок 4.1.2).



а – 1-я деталь в эксперименте



б – 20-я деталь в эксперименте

Рисунок 4.1.2 – Действительный профиль поверхности детали «Корпус» на длине 11,78 мм

Одной из возможных причин образования дефекта может являться повышение температуры тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент, связанное со снижением антифрикционных свойств технологического покрытия (фосфатирование с омыливанием). Технологический процесс фосфатирования представлен в статье автора [72].

С учетом наблюдаемых на практике закономерностей можно предположить, что к 20-ой операции условия штамповки доходят по некоторому параметру до предела, после которого антифрикционные свойства технологического покрытия резко снижаются. Как известно, технологические покрытия для холодной штамповки на водной основе чувствительны к повышению температуры. Следовательно, необходимо провести эксперимент по определению температуры на пуансоне после каждой операции.

Исходные данные по температуре инструмента представлены для детали «Поршень», так как нет физической возможности произвести замер температуры инструмента для детали «Корпус». Обе детали – «Поршень» и «Корпус» – изготавливаются методом холодного обратного выдавливания; материал обеих деталей – сталь 20. При изготовлении детали «Корпус» проводили измерение температуры непосредственно самой детали. При изготовлении детали «Поршень» проводили измерение температуры, как детали, так и инструмента (матрицы и пуансона). Так как детали схожи между собой по геометрии (рисунок 3.1.2.1 и 3.1.2.8 по диссертации) и по массе (масса детали «Корпус» – 480 ± 5 г; масса детали «Поршень» – 430 ± 10 г), то температуру инструмента для изготовления детали «Корпус» принимаем равной температуре инструмента для детали «Поршень». Результаты данного эксперимента приведены в таблице 4.1.1 (измерения проводили на поверхности инструмента, контактирующей с местом образования дефекта на детали).

Таблица 4.1.1 – Данные эксперимента

Порядковый номер детали	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Экспериментальные данные, °С	20	53	62	72	80	87	90	92	95	97	98	98	98	99	99	99	100	100	100	100

Из эксперимента видно, что уже примерно с 10-ой операции температура на пуансоне стабилизировалась и составляет примерно 100 °С, что близко к критической для технологического покрытия, однако не превышает ее. При этом нужно учитывать, что замеры в эксперименте проводили через некоторое время после окончания штамповки, тогда как температура на инструменте непосредственно в момент формоизменения нам по-прежнему остается неизвестной. Рассчитать температуру на инструменте непосредственно при деформировании можно при помощи компьютерного моделирования.

Убедимся в верности расчетов, верифицируя данные моделирования на основании сравнения температуры после штамповки, измеренной при проведении эксперимента. Иными словами, при моделировании нужно воспроизвести весь процесс штамповки: непосредственно деформирование и межоперационное остывание инструмента. Результаты сравнения эксперимента и моделирования показаны на графике (рисунок 4.1.3).

Исходные данные для моделирования [17; 21]:

- теплопроводность (воздух) – 20 Вт/(м·К);
- удельная теплоемкость (воздух) – 439 кДж/кг·К;
- время 1-ой операции – 30 сек.;
- время остывания пуансона между операциями – 18 сек.;
- удельная теплоемкость стали – 494 кДж/кг·К;
- удельная теплоемкость стального инструмента – 360 кДж/кг·К;
- теплопроводность (между инструментом и воздухом) – 7.9 Вт/(м·К).

Как видно из рисунка 4.1.3, расчеты дают удовлетворительную точность, а, следовательно, основываясь на данных расчетах можно оценить температуру пуансона в процессе штамповки, в момент начала штамповки (с учетом межоперационного остывания пуансона) и в момент окончания штамповки.

Из рисунка 4.1.4 видно, что самая высокая температура на пуансоне в процессе деформации возникает на поверхности, под которой образуется дефект. Чтобы по-

нать динамику изменения температуры на пуансоне, удобно вывести графики температуры исследуемой области (над дефектом) на начало операции штамповки, окончание операции и разницу температур между окончанием предыдущей операции и началом следующей.

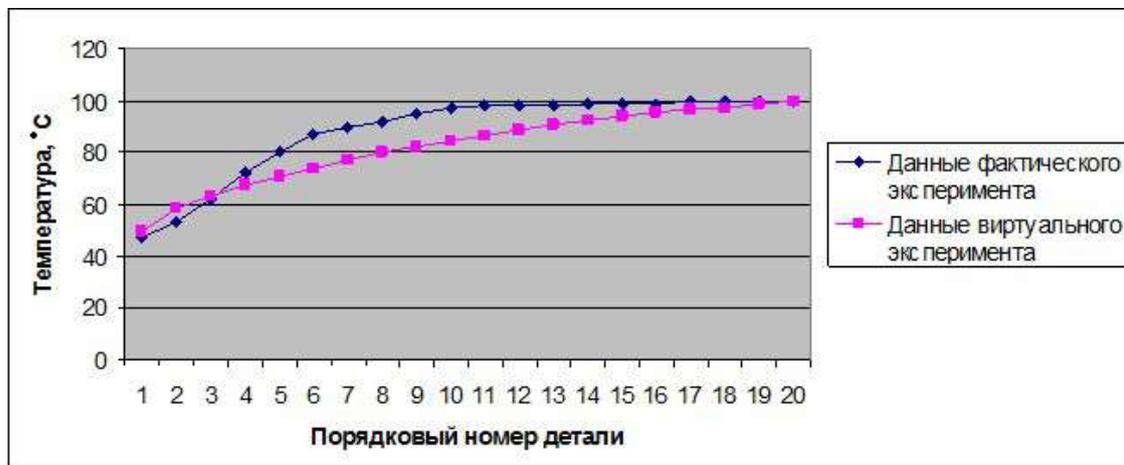


Рисунок 4.1.3 – Зависимость температуры на инструменте (пуансон) от порядкового номера в эксперименте штампованной детали «Поршень» (с учётом времени остывания на воздухе перед измерением)

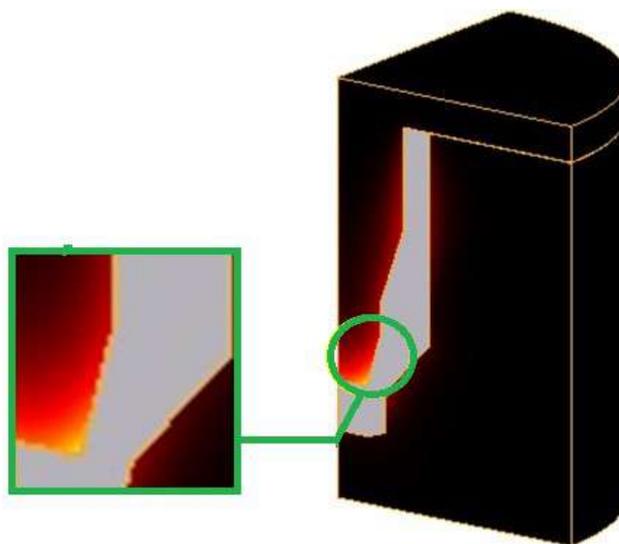


Рисунок 4.1.4 – Температура на пуансоне в момент штамповки

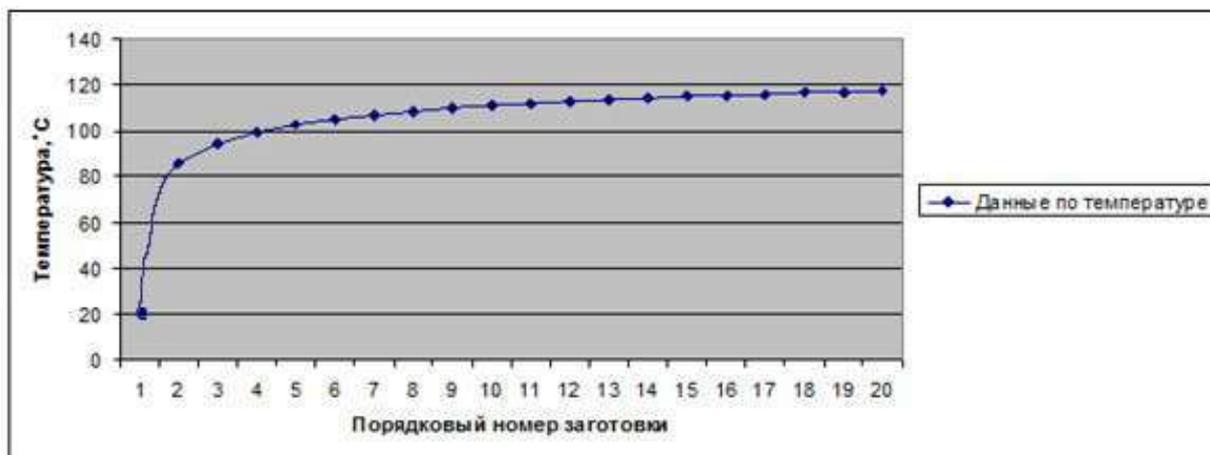


Рисунок 4.1.5 – Температура инструмента в начале рабочего хода

Как видно из рисунков 4.1.5, 4.1.6 и 4.1.7, в промежутке между 12 и 20 деталью эксперимента процесс межоперационного остывания пуансона стабилизируется: на момент начала операции температура составляет приблизительно 118 °С, в процессе штамповки пуансон нагревается приблизительно до 145 °С и затем остывает приблизительно на 30 – 40 °С. Для технологических покрытий на водной основе температура инструмента выше 140 °С является уже выше рекомендуемой. Жидкая составляющая будет интенсивно выкипать, слой технологического покрытия будет неравномерным, антифрикционные свойства резко снизятся. Неравномерность технологического покрытия может также приводит к налипанию с последующим вырывом.

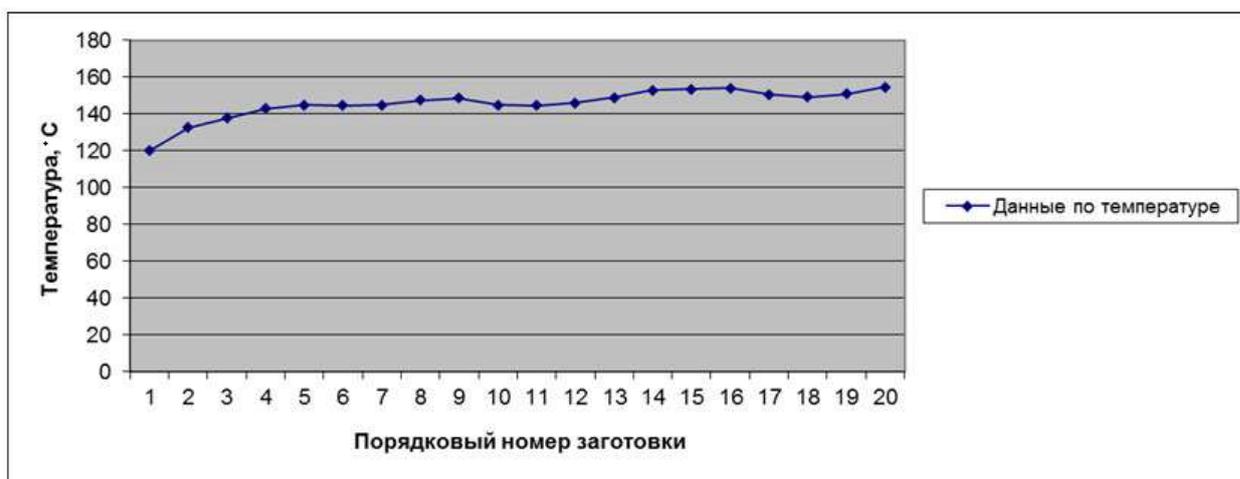


Рисунок 4.1.6 – Температура инструмента в конце рабочего хода



Рисунок 4.1.7 – Изменение температуры пуансона между операциями

Предположим, что именно налипание с последующим вырывом металла является причиной возникновения дефекта.

На рисунке 4.1.8 представлено распределение интенсивности напряжений и среднего напряжения в детали при формообразовании 1-й, 10-й и 20-й заготовки. Анализ результатов (см. рисунок 4.1.8) позволяет сделать вывод о том, что при моделировании нашей задачи на макроуровне определяется температура от деформации и напряжение, а дальнейшее моделирование на микроуровне позволяет определить механизм образования дефекта.

Анализируя все полученные результаты моделирования в системе Q-form V8 (см. рисунок 4.1.1- 4.1.8) можно сделать следующие выводы.

1. Исходя из полученных результатов (см. рисунок 4.1), в том месте, где возникает дефект после штамповки, на внутренней поверхности детали «Корпус» (см. рисунок 4.1.8), наблюдается и самая высокая температура при формоизменении заготовки.

2. Температурные условия работы инструмента (пуансона) стабилизируются к штамповке 20-й заготовки (см. рисунок 4.1.5 и 4.1.6).

3. Наблюдается качественное схождение результатов расчетов в программе Q-form V8 с результатами, полученными при расчете по предложенной в главе 3 модели, основанной на методе баланса мощности, что подтверждает работоспособность предлагаемой модели.

4. Выполнить количественную оценку работоспособности разработанной в данной работе модели (см. главу 3), основываясь на результатах моделирования в программе Q-form V8, не представляется возможным, если моделирование проводится на макроуровне, т.е. без учета действительной шероховатости поверхности заготовки. Для количественной оценки работоспособности, предлагаемой в диссер-

тационной работе, модели требуется проведение компьютерного моделирования задачи о течении материала на микроуровне, т.е. с учетом шероховатости поверхности.

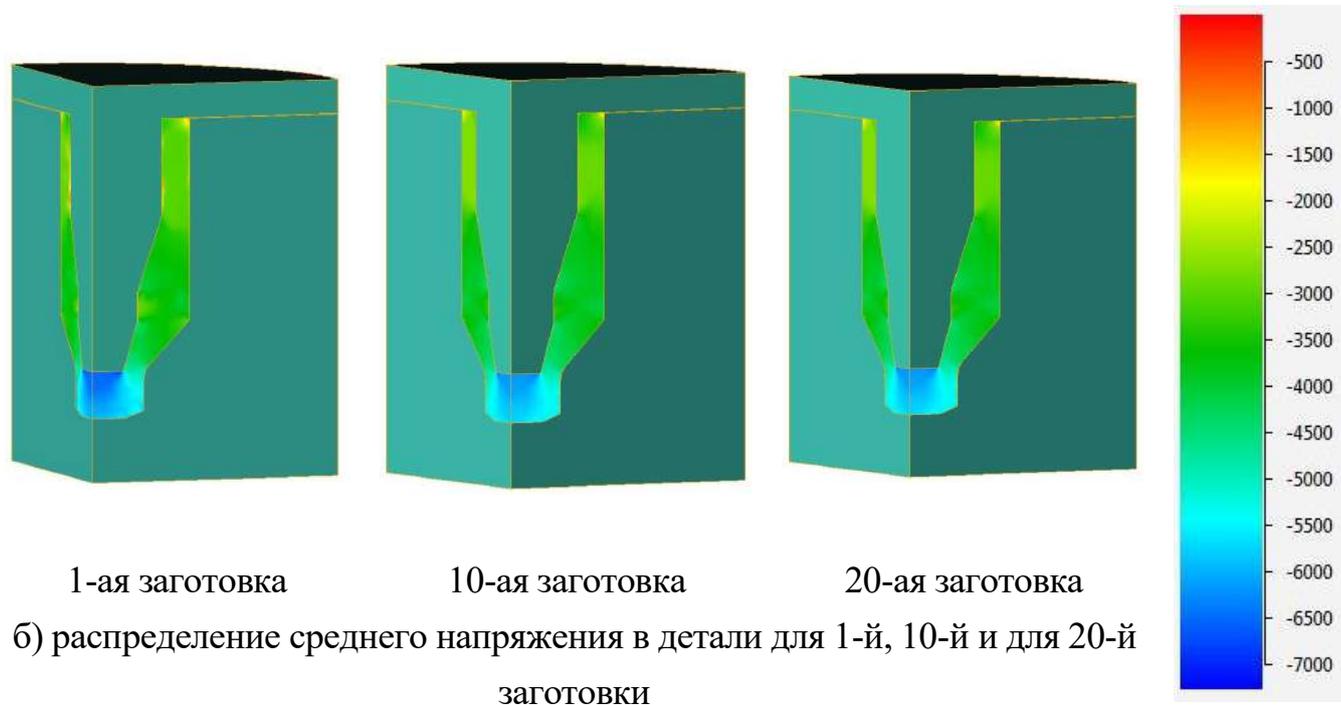
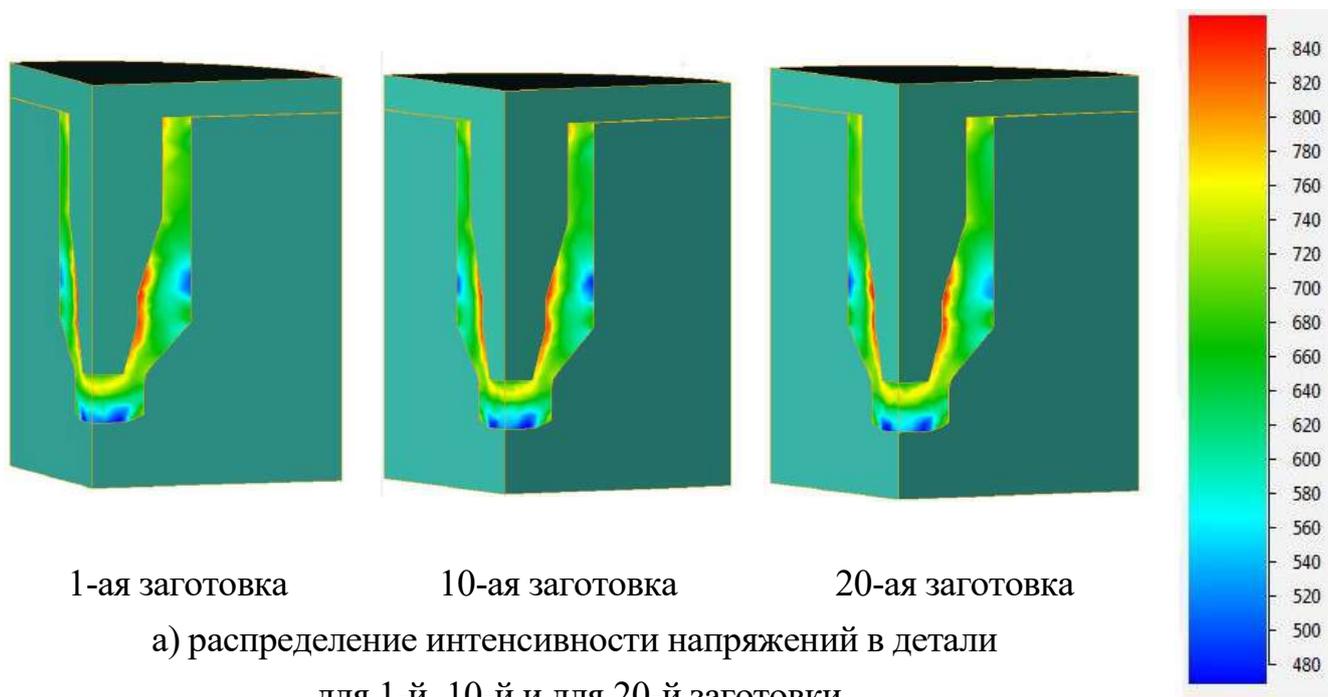


Рисунок 4.1.8 – Распределение интенсивности напряжений и среднего напряжения (МПа) на пуансоне и в детали при формообразовании 1-й, 10-й и 20-й заготовки

Рассмотрим механизм дефекта, вызванный неравномерностью технологического покрытия на поверхности. На рисунке 4.1.9 схематично показана возможная картина неравномерного распределения технологического покрытия: в некоторые выступы шероховатости детали попадает вещество технологического покрытия, в некоторые – нет. При этом сам профиль шероховатости выполнен в соответствии со значениями, приведенными в ГОСТ 2789-73 для шероховатости $Ra\ 3,2$. Шероховатость пуансона ($Ra\ 0,4$) не учитываем, т.к. она существенно меньше шероховатость детали.

Известно, что шероховатостью поверхности называют совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами на базовой длине [15].

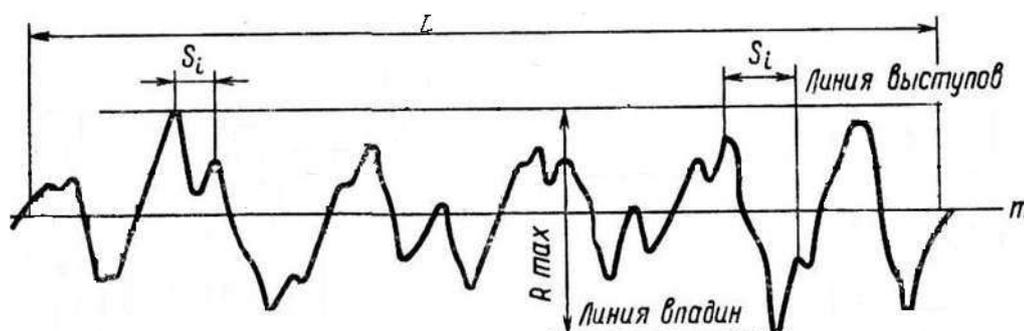


Рисунок 4.1.9 – Схематичное изображение шероховатости: R_{\max} – полная высота профиля; S_i – среднее значение шага местных выступов профиля в пределах базовой длины; L – базовая длина, используется для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности; m – средняя линия профиля (базовая линия, имеющая форму номинального прошлого и проведенного так, что в пределах базовой длины среднеквадратическое отклонение профиля до этой линии было минимальным)

Для инструмента (пуансона), используемого при изготовлении детали «Корпус», конструкторской документацией предусмотрено среднее арифметическое из абсолютных значений отклонение профиля в пределах базовой длины $Ra\ 0,4$; соответственно полная высота профиля $R_{\max} = 0,4$ мкм [15]. Завершающей операцией при изготовлении пуансона является полирование. Чистовому полированию при среднем арифметическом отклонении профиля $Ra = 0,4$ соответствует 5 качество. Тогда в соответствии с ГОСТ 2789-73 базовая длина составляет 0,25 мм, или 250 мкм.

Средний шаг местных выступов варьируется от 0,002 мм (2 мкм) до 12,5 мм (12500 мкм) и выбирается самостоятельно (ГОСТ 2789-73, таблица 4). Рекомендуется назначать средний шаг местных выступов по величине меньшим, чем базовая длина. Если рассматривать примерно 70-80% от базовой длины, то средний шаг местных выступов составит либо 0,16 мм (160 мкм), либо 0,2 мм (200 мкм). Чем выше средний шаг выступа, тем поверхность наименее шероховата и наоборот.

Для самой же детали «Корпус», параметры шероховатости поверхности выбираются исходя из вышеописанных рекомендаций. Конструкторской документацией на деталь «Корпус» предусмотрено среднее арифметическое отклонение профиля Ra 3,2; соответственно полная высота профиля $R_{max} = 3,2$ мкм.

Рассматриваем формообразующую операцию, выполняемую за счет выдавливания материала из-под инструмента (пуансона); среднее арифметическое отклонение профиля Ra 3,2 соответствует 7 качеству. В соответствии с ГОСТ 2789-73 базовая длина составляет 0,8 мм, или 800 мкм. Средний шаг местных выступов для детали «Корпус» варьируется в том же диапазоне значений, что и для инструмента (пуансона). Если, так же как и для инструмента, рассматривать примерно 70-80% от базовой длины, то средний шаг местных выступов составит либо 0,5 мм (500 мкм), либо 0,63 мм (630 мкм).

Протяженность исследуемой поверхности детали «Корпус», на которой образуется дефект, составляет 6 мм (рисунок 4.1.10).

В зонах непосредственного контакта инструмента с заготовкой возникает пластическая деформация выступов шероховатости. Впадины, содержащие технологическое покрытие, являются своеобразными резервуарами (карманами), удерживающими ее. Технологическое покрытие, расположенное во впадинах, оказывает распирающее воздействие, и на сдерживающих ее выступах возникают значительные напряжения [56; 80; 83].

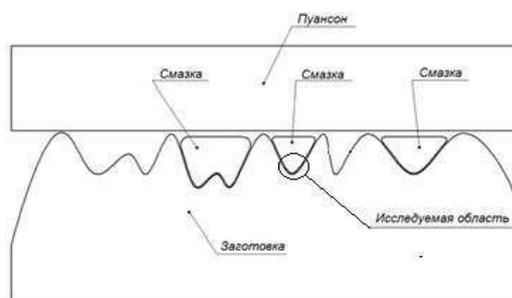


Рисунок 4.1.10 – Схематическое представление фрагмента поверхности детали «Корпус»

Для оценки возможности дефекта воспользуемся деформационным критерием разрушения материала и оценим его значение в области впадины профиля шероховатости (рисунок 4.1.9). Деформационный линейный критерий разрушения [33] определяется по выражению:

$$\Psi = \int_0^{\varepsilon_k} \frac{d\varepsilon}{d\varepsilon_p(k)} \leq 1, \quad (4.1.1)$$

где Ψ – степень использования запаса пластичности.; ε_k – накопленная деформация к концу процесса деформирования; ε_p – накопленная деформация к моменту разрушения при постоянном во время испытания показателе напряженного состояния; k – показатель напряженного состояния; ε – накопленная деформация. Известно, что если Ψ меньше 1, то разрушение материала отсутствует; если Ψ больше 1, то происходит его разрушение.

На рисунке 4.1.11 представлена схема моделирования. На рисунке 4.1.12 представлены результаты моделирования.

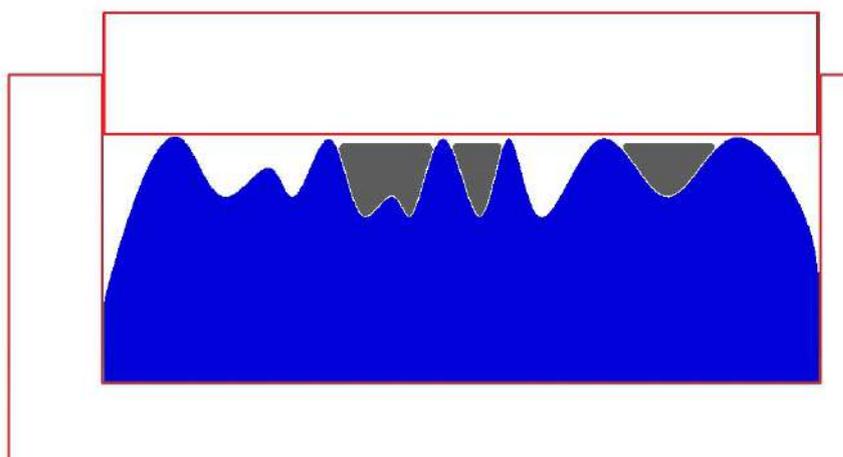


Рисунок 4.1.11 – Схема моделирования

Исходные данные для моделирования:

- материал заготовки – сталь 20;
- коэффициент Пуассона – 0,4999;
- время деформирования – 3 с;
- модуль Юнга – 2030×10^8 Па.

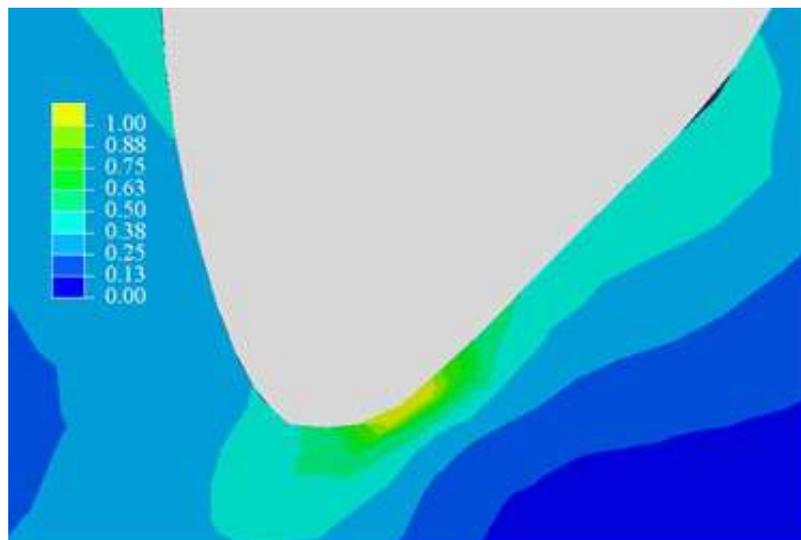


Рисунок 4.1.12 – Поле распределения степени использования запаса пластичности

Из рисунка 4.1.12 видно, что у основания выступа степень использования запаса пластичности равна единице, что свидетельствует о высокой вероятности образования трещины и последующем разрушении материала: скалывания выступа шероховатости.

Интересно также сравнить расчеты деформационного критерия с классической оценкой прочности на основе напряжений. На рисунке 4.1.13 представлено поле распределения интенсивности напряжений в очаге деформации.

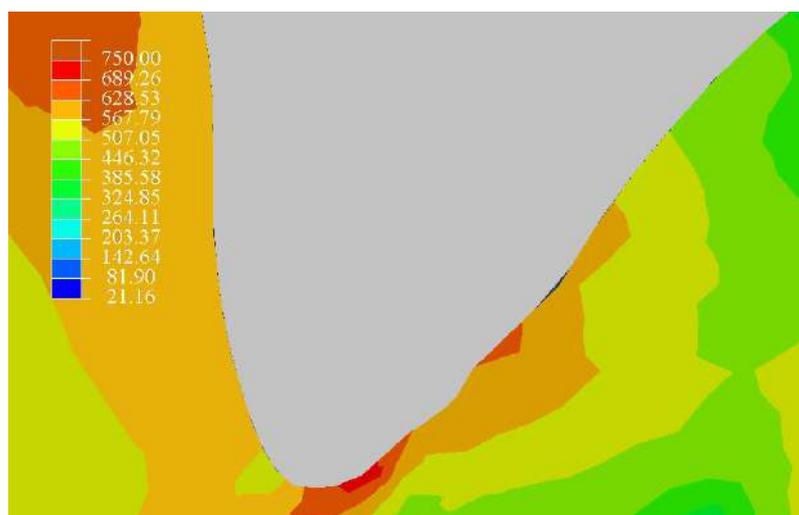


Рисунок 4.1.13 – Поле интенсивности напряжений

В основании выступа интенсивность напряжения равна 740 МПа, что превышает значение предела прочности на разрыв стали 20 ($\sigma_B = 470$ МПа). Для обоснованности применения такой оценки необходимо убедиться, что в исследуемой области преобладают растягивающие напряжения. На рисунке 4.1.14 показано поле показателя напряженного состояния. Известно, что показатель напряженного состояния – это безразмерная величина, применяемая для количественной оценки напряженного состояния. Показатель напряженного состояния может быть рассчитан с применением формулы по выражению [32]:

$$k = \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_i}, \quad (4.1.2)$$

где σ_{cp} – среднее нормальное напряжение; σ_i – интенсивность напряжений.

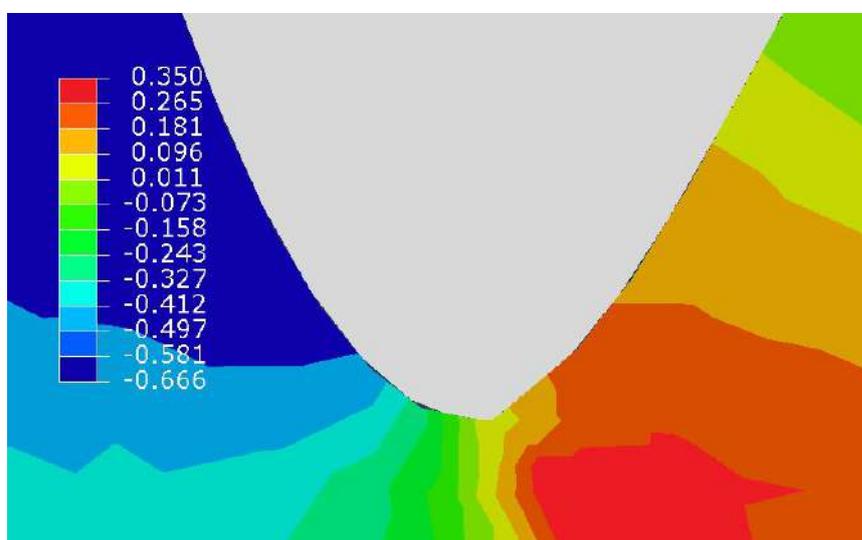


Рисунок 4.1.14 – Поле распределения показателя напряженного состояния.

Положительное значение показателя напряженного состояния свидетельствует о преобладании растягивающих напряжений [51].

4.2 Расчет силы деформирования для производства стальной детали

Расчет производился для выявления зависимости силы от угла конической поверхности пуансона для разных показателей трения технологического покрытия.

Для решения поставленной задачи были проведены расчеты на ЭВМ с помощью программы QForm-2D, основанной на методе конечных элементов, для разных углов конической части пуансона (рисунок 4.2.1) и для разных показателей

трения технологического покрытия. Температура инструмента принималась для 20-й детали в эксперименте.

Исходные данные:

- материал пуансона – 9ХС;
- углы пуансона – 110, 115, 120, 125, 130;
- показатели трения технологического покрытия - 0,05; 0,2; 0,5; 0,9;
- тип оборудования – пресс гидравлический.

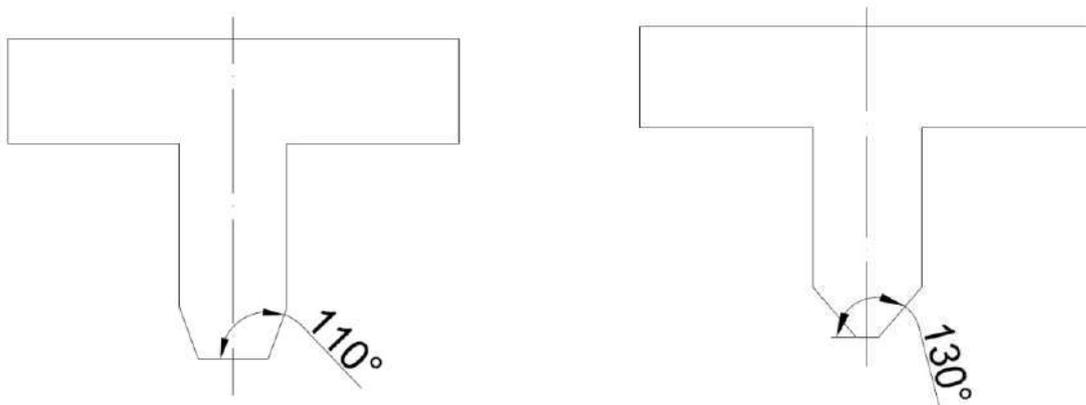


Рисунок 4.2.1 – Пример замера угла конической поверхности пуансона.

Угол конической поверхности пуансона при изготовлении детали «Корпус» равен 120°. Показатель контактного трения $\mu = 0,05$, что соответствует значениям, указываемым различными исследователями для штамповки стальных деталей при фосфатировании с последующим омыливанием. В результате по итогам расчетов, представленных в таблице 4.2.1, построен график по координатам «деформирующая сила - угол» рисунок 4.2.2.

Таблица 4.2.1.

Показатель трения \ Угол пуансона	0,05	0,2	0,5	0,9	Переменный показатель
110	0,95	1,003	1,08	1,2	1,02
115	0,94	0,99	1,06	1,18	1,001
120	0,93	0,97	1,04	1,16	0,995
125	0,926	0,96	1,035	1,155	0,991

130	0,925	0,955	1,03	1,15	0,99
-----	-------	-------	------	------	------

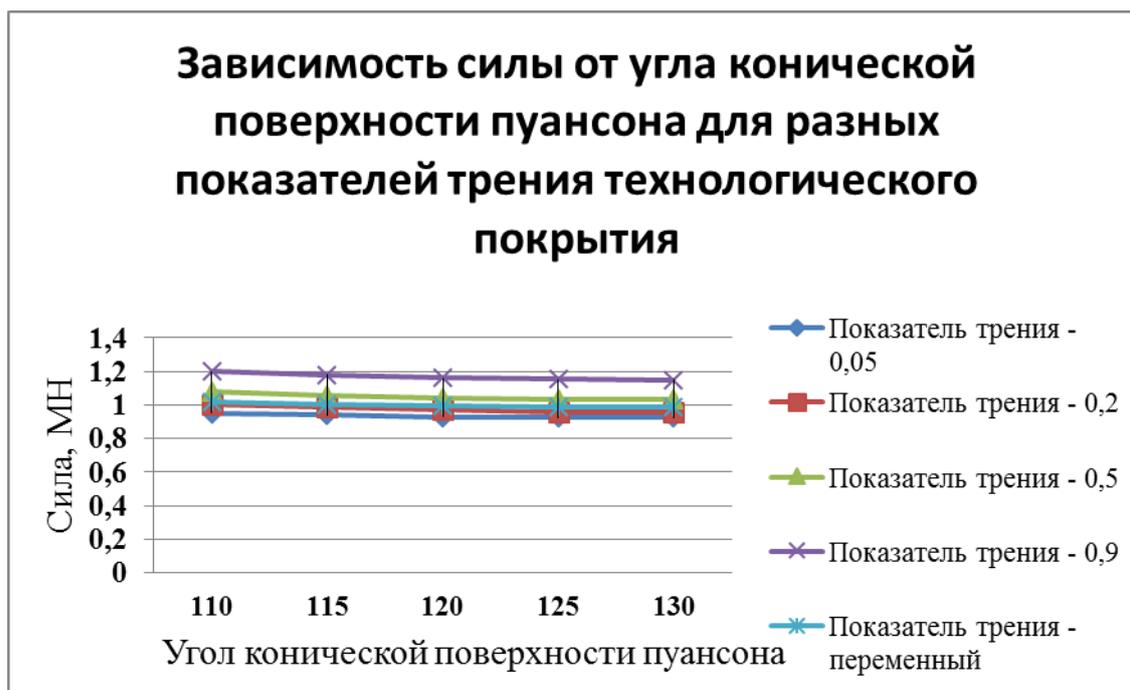


Рисунок 4.2.2 – Зависимость силы деформирования от угла пуансона, для разных показателей трения.

Для расчета показателя трения необходимо использовать методику представленную в главе 2.

С увеличением угла конической поверхности пуансона сила деформирования уменьшается. С увеличением показателя трения, увеличивается и сила деформирования.

4.3 Выводы к главе 4

1. Установлено, что важнейшей составляющей работоспособности фосфатного покрытия при критических температурах является возможность удержания жидкой составляющей покрытия в неровностях поверхности металла, обеспечивающее работоспособность на границе деталь-инструмент.

2. Предложен механизм возникновения дефекта налипания металла на границе деталь-инструмент, заключающийся в возникновении жидкой компоненты технологического покрытия при нагреве поверхностного слоя, приводящее к ухудшению адгезии фосфатного покрытия с поверхностью заготовки. Мероприятия для предотвращения разрушения технологического покрытия представлены в главе 5.

3. Установлено, что значение силы деформирования определяется геометрической формой пуансона, при увеличении угла конической поверхности пуансона сила деформирования уменьшается.

ГЛАВА 5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ДЕТАЛИ «КОРПУС»

5.1. Стальная деталь «Корпус»

5.1.1. Область применения детали «Корпус»

Стальная деталь «Корпус» разрабатывается и применяется для кумулятивных зарядов. Кумулятивный заряд – это заряд взрывчатого вещества с конической, сферической или клинообразной выемкой, действие которого основано на кумулятивном эффекте. Кумулятивные заряды широко применяются во взрывных технологиях перфорации, резания, разрушения материалов и конструкций. Кумулятивные заряды в промышленности, делятся на две группы: пробивающие и режущие. Пробивающие заряды представляют собой компактные осесимметричные кумулятивные заряды с кумулятивной выемкой в форме конуса или полусферы, покрытой металлической облицовкой. При взрыве кумулятивных зарядов этого типа формируется высокоскоростная кумулятивная струя. Режущие кумулятивные заряды представляют собой удлиненные заряды взрывчатого вещества, имеющие удлиненную (клиновидную или полуцилиндрическую) кумулятивную выемку, покрытую металлической или металлополимерной облицовкой. При взрыве таких зарядов в результате схлопывания облицовки формируется плоская кумулятивная струя (кумулятивный нож), которая и разрезает преграду [34].

Кумулятивные заряды подразделяют на два типа - герметичные и обычные.

Герметичные кумулятивные заряды:

- предназначены для применения в составе негерметичных перфораторов;
- способны выдерживать наружное гидростатическое давление до 100 МПа и температуру до 200°С;
- осколки элементов зарядов после взрыва в скважине не должны препятствовать и осложнять дальнейшую эксплуатацию скважины, при этом количество шлама

(осколков корпусов и крышек) является одной из характеристик данного типа зарядов.

Обычные кумулятивные заряды:

- предназначены для применения в герметичных одноразовых и многоразовых перфораторах;
- способны выдерживать температуру до 200°C;
- фугасное воздействие на корпус перфоратора после взрыва кумулятивного заряда не должно приводить к деформации и разрушению корпуса, затрудняющим дальнейшую эксплуатацию скважины.

По эффективности и характеру пробития кумулятивные заряды подразделяют по ГОСТ Р 55777-2013 на заряды:

- ГП (глубокое пробитие) - относительно глубокий канал в породе при небольшом диаметре пробитого отверстия в обсадной колонне;
- БО (большое отверстие) - небольшой канал в породе при большом диаметре отверстия в обсадной колонне;
- ГХ (хороший канал) - большое входное отверстие со значительной глубиной канала.

5.1.2. Технические требования к стальной детали «Корпус»

Технические требования к детали «Корпус»:

1. Планируемая заготовка – круг горячекатаный $\varnothing 48$ мм из стали 20 по ГОСТ 1050-88, состояние поставки – круг длиной 6 м.п.
2. Типоразмеры деталей «Корпус» 50, 46, 45, 38. С переменной толщиной стенки 5, 4, 3 мм.
3. Базовая технология выдавливания должна быть разработана для производства осесимметричной стальной детали «Корпус» с наружным $\varnothing 47,6$ мм и внутренним $\varnothing 24,9$ мм. с возможностью распространения технологии для производства всех типоразмеров по п.2.
4. Шероховатость детали «Корпус» - $Ra 3,2$ по ГОСТ 2789-73.
5. Планируемая производительность, не менее - 180 шт. в час.

2. Обеспечить стойкость инструмента не менее 3000 штамповок без промежуточной полировки рабочих поверхностей инструмента.
3. Обеспечить минимальное число переходов.
4. Разнотолщинность штамповки не более 0,5 мм.

5.2. Проектирование технологического процесса изготовления стальной детали «Корпус»

Проектирование нового технологического процесса комбинированного выдавливания стальных деталей начинаем с определения количества переходов и расчета технологической силы. На каждом переходе определяем степень деформации, форму, размеры, величины удельных и полных сил.

Поверочный расчет силы выдавливания выполняем по рекомендациям Г.А. Навроцкого [73]. Силу при деформации принимаем по манометру 23 МПа. Тогда удельная сила равно:

$$p = \frac{P}{F} \cdot 1,3;$$

где P – сила при деформации; 1,3 – коэффициент запаса;

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot d^2;$$

где d – внутренний диаметр.

Удельная сила равна 61,5 МПа. Учитывая, большое перемещение и тип производства (серийный), то выбираем гидравлический пресс.

Далее определяется степень деформации [37] Деталь «Корпус» изготавливается методом комбинированного выдавливания, поэтому считаем степени деформации для прямого и обратного выдавливания. Степень деформации для прямого выдавливания составит 0,4, а для обратного 0,5. Обе степени деформации не превышают допустимую степень деформации по ГОСТ 25.503-97, а, следовательно, деталь должна выдавливаться за 1 технологический переход.

Моделируем процесс комбинированного выдавливания стальной детали «Корпус» за 1 технологический переход (рисунок 5.2.1) в программе QForm-2D.

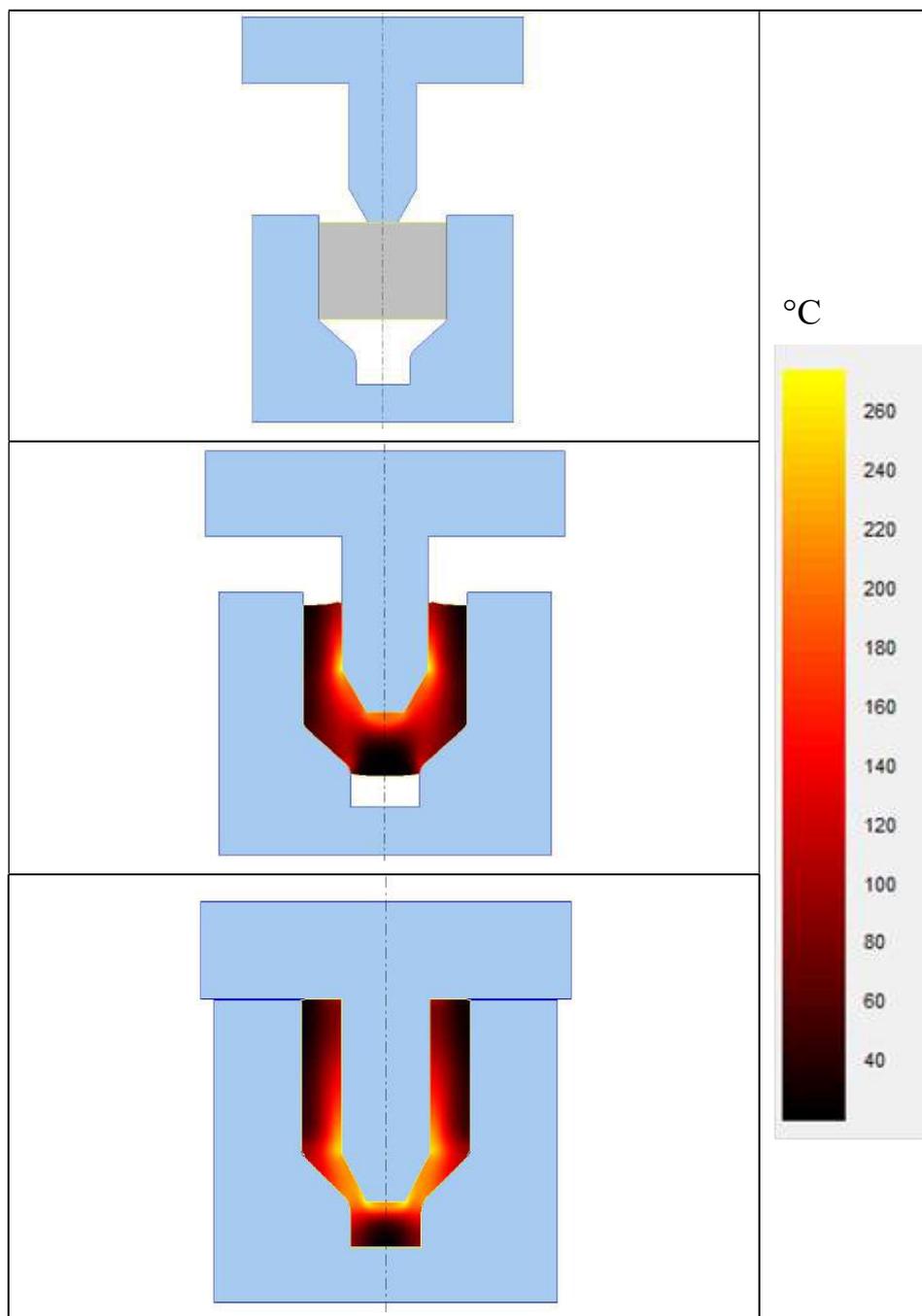


Рисунок 5.2.1 – Выдавливание детали «Корпус» в программе QForm-2D за 1 технологический переход

Как показывают произведенные расчеты в программе QForm-2D, температура на границе деталь инструмент (на конусной поверхности детали $220\div 260^{\circ}\text{C}$) превышает рабочую температуру технологического покрытия. Следовательно, стальную деталь «Корпус» изготовить за 1 технологический переход не представляется возможным.

Моделируем изготовление детали «Корпус» за 2 технологических перехода.

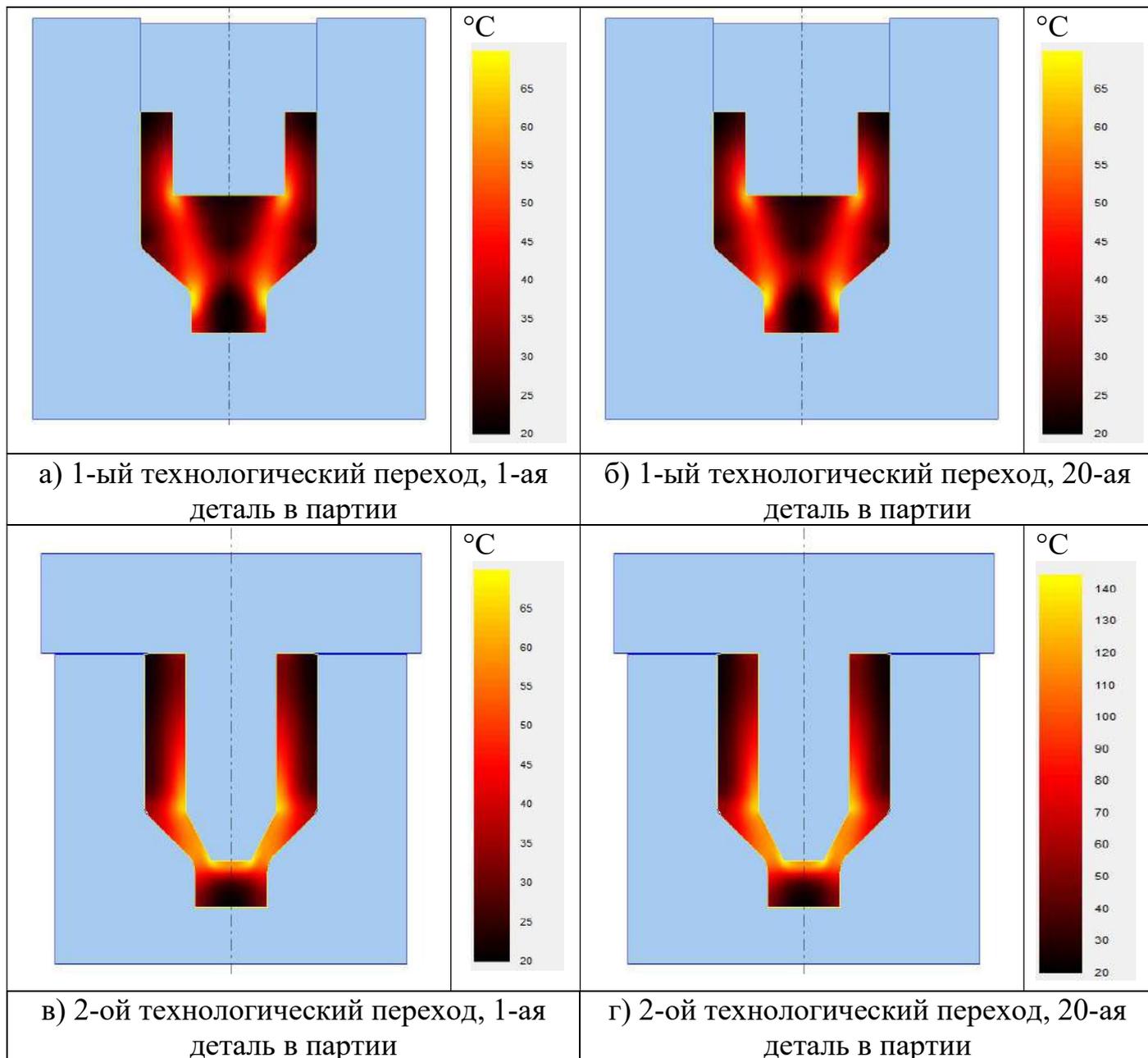


Рисунок 5.2.2 – Выдавливание детали «Корпус» в программе QForm-2D за 2 технологических перехода

На рисунке 5.2.2 показано распределение температуры при штамповке детали «Корпус» за два технологических перехода. Как показывает моделирование, температура на втором технологическом переходе на 20-ой детали составляет 140°C. При штамповке опытной партии деталей «Корпус» возникает дефект налипания металла с последующим вырывом частей металла. Происходит это на втором технологическом переходе на 20-ой детали (рисунок 3.1.3.2). Моделирование не учитывает температуру от трения на границе деталь-инструмент. Так же экспе-

риментом подтверждено, что температура инструмента стабилизируется к 18-20 детали (рисунок 3.1.2.12 - 3.1.2.14).

Главными недостатками существующего способа изготовления стальной детали «Корпус» является:

1. Низкая стойкость инструмента. Из эксперимента выявлено, что стойкость штампа для комбинированного выдавливания составляет 20 штук изготовленных деталей между перешлифовками. Что существенно уменьшает производительность.

2. Увеличение бракованных изделий, за счет налипания металла и задиров, в следствии возникновения высоких температур в критических точках при которых разрушается технологическое покрытие.

Как показывают изложенные выше расчеты и проведенные эксперименты, это происходит из-за высокой температуры на контакте. Температура увеличивается со временем работы инструмента. Так как перед каждым переходом инструмент и деталь не успевают остыть до комнатной температуры (в серийном производстве), то следует внести в технологию процесса еще один дополнительный переход (рисунок 5.2.4). Таким образом, штамп будет работать меньшее время при каждой операции, а, следовательно, и температура не будет доходить до того предела, на котором появляется дефект.

Технологический маршрут изготовления детали «Корпус» из стали 20, ГОСТ 1050-88, включает следующие операции.

1. Отрезка заготовки из прутка $\varnothing 48$ мм (масса $480 \text{ гр} \pm 5 \text{ гр.}$)
2. Отжиг заготовки при температуре 950°C , время отжига - 3,5 часа.
3. Нанесение фосфата.
4. Омыливание.
5. Сушка.
6. Выдавливание детали (1 технологический переход).
7. Нанесение фосфата.
8. Омыливание.
9. Сушка.
10. Выдавливание детали (2 технологический переход (дополнительный)).
11. Нанесение фосфата.
12. Омыливание.
13. Сушка.
14. Выдавливание детали (3 технологический переход).

15. Обработка детали резанием.

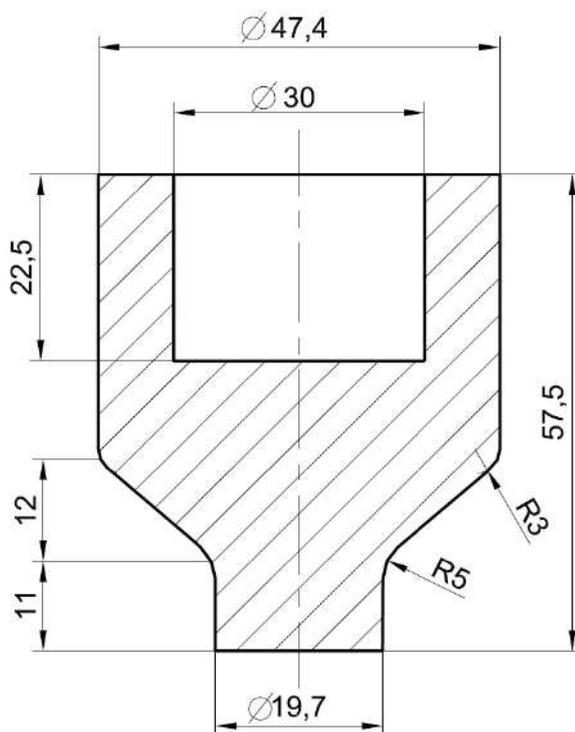


Рисунок 5.2.3 – 1 технологический переход

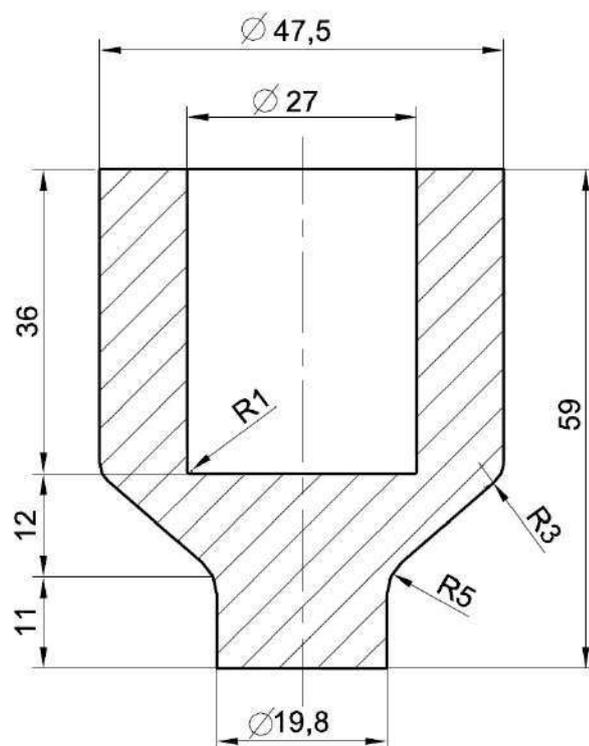


Рисунок 5.2.4 – 2 технологический переход (дополнительный)

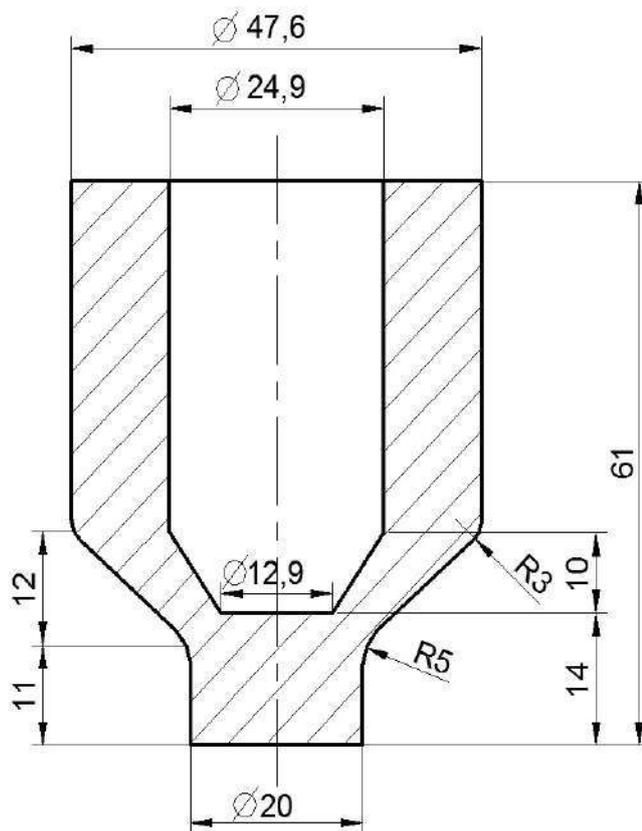
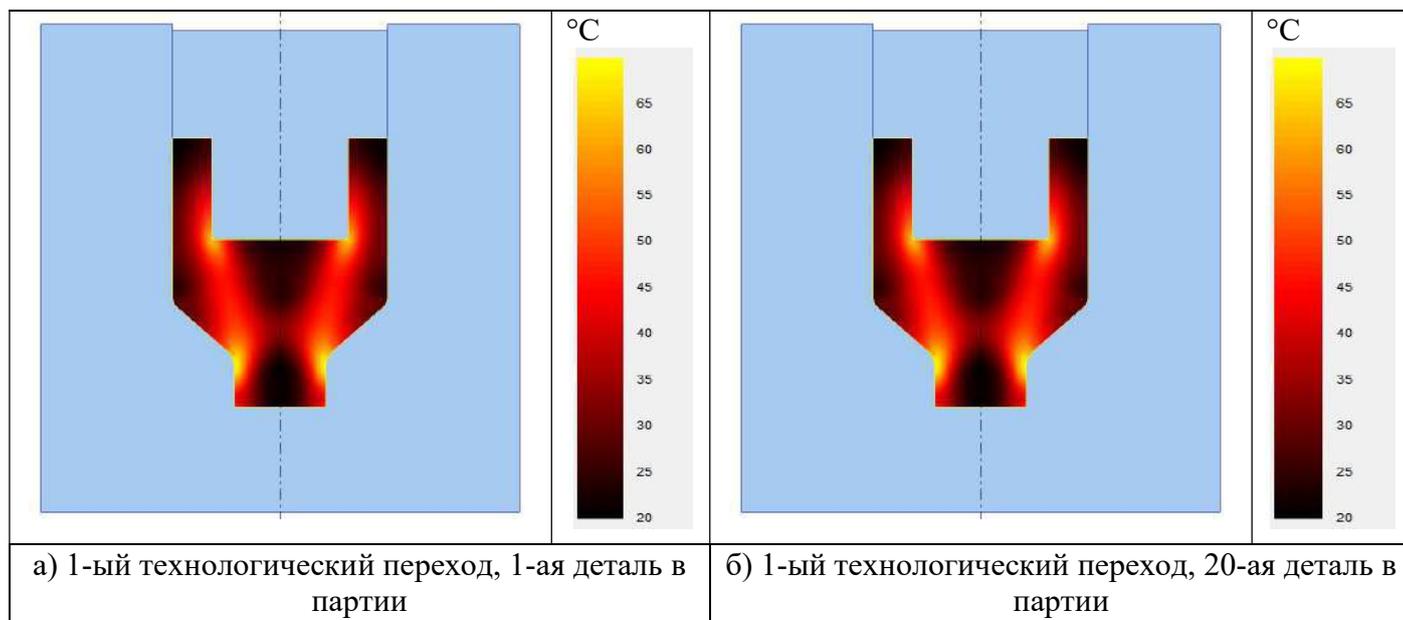


Рисунок 5.2.5 – 3 технологический переход

Размеры штампа по переходам определяются исходя из размера заготовки полученной на предыдущем переходе и желаемой формы штамповки.



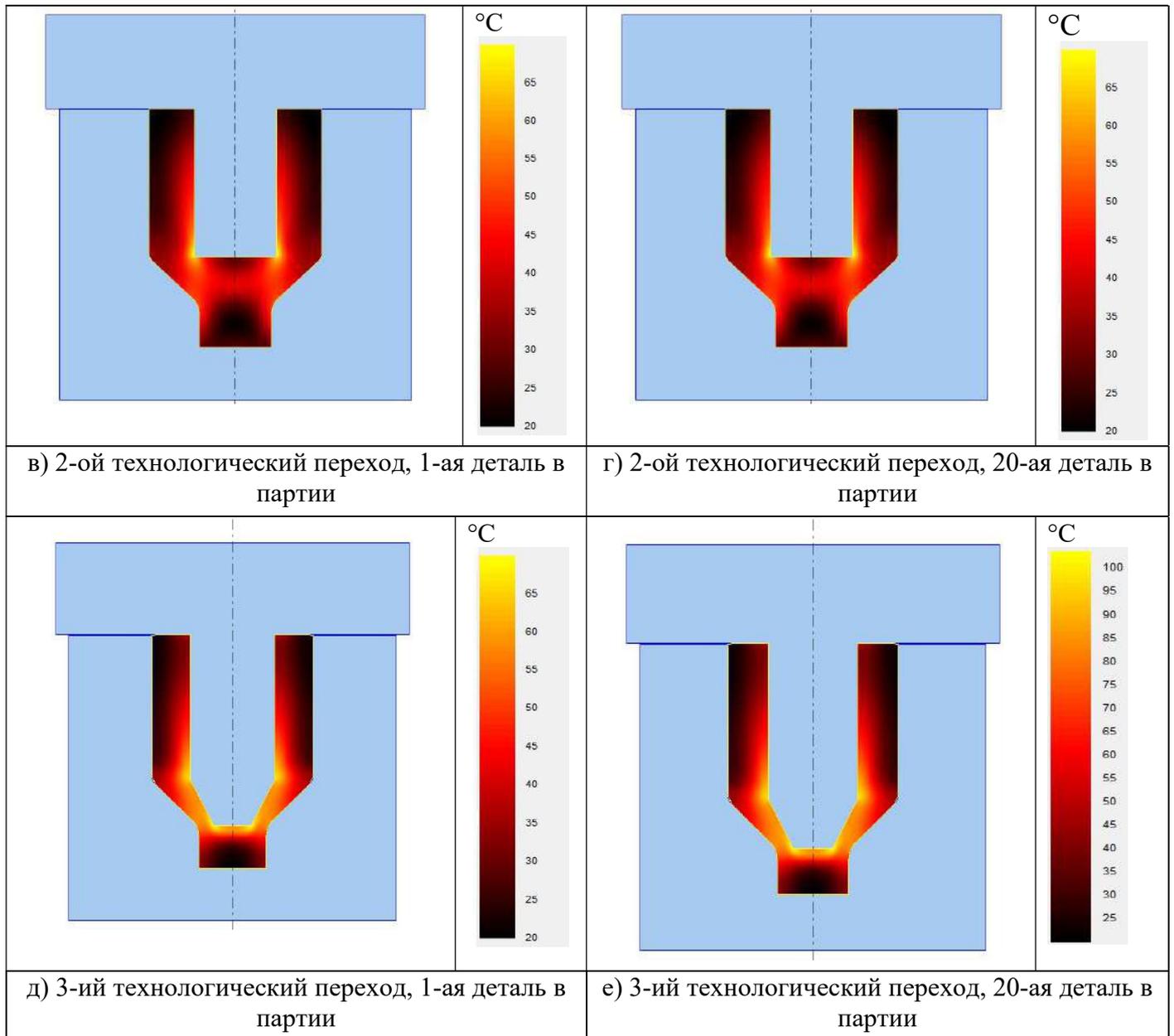


Рисунок 5.2.6 – Выдавливание детали «Корпус» в программе QForm-2D за 3 технологических перехода

На рисунке 5.2.6 показано распределение температуры при штамповке детали «Корпус» за три технологических перехода. Как показывает моделирование, температура на третьем технологическом переходе на 20-ой детали составляет 107°C. Далее был проведен фактический эксперимент, партия (20 шт.) деталей «Корпус» была изготовлена за 3 технологических перехода. Результаты эксперимента представлены на рисунке 5.2.7.



Рисунок 5.2.7 – Внутренняя коническая часть 20-й детали «Корпус» в партии после 3-го технологического перехода

По представленным в главе 3 формулам произведены расчеты температуры для 3-х разных процессов ХОШ, для материалов с разными пределами текучести, а также для прессов с различной скоростью перемещения ползуна. Результаты расчета температуры представлены в таблице 5.2.1

Таблица 5.2.1.

Предел текучести σ_T , МПа	Скорость V , мм/с	Температура ΣT , °С	Процесс
1	2	3	4
400	1	28,24	Осадка
	10	79,25	
	800	307,85	
260	1	25,73	
	10	62,18	
	800	210,52	
230	1	25,18	
	10	58,39	
	800	189,42	
400	1	35,83	Прямое выдавливание
	10	113,11	
	800	169,38	
260	1	32,33	
	10	83,63	
	800	118,23	
230	1	28,11	
	10	77,13	
	800	107,18	

Окончание таблицы 5.2.1

1	2	3	4
400	1	33,95	Обратное выдавливание
	10	96,52	
	800	388,55	
260	1	25,42	
	10	72,3	
	800	263,93	
230	1	23,18	
	10	67,03	
	800	239,96	

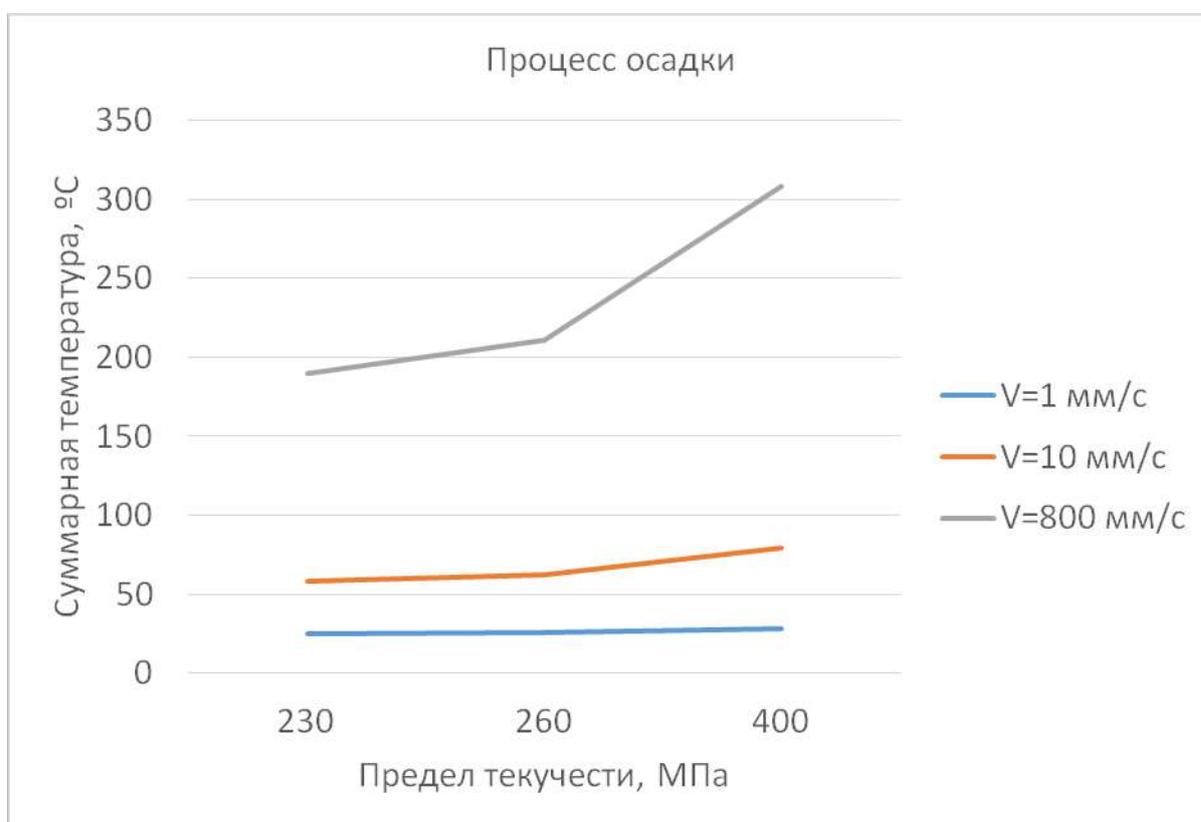


Рисунок 5.2.8 –Зависимость температуры от скорости прессового оборудования и предела текучести материала для процесса осадки

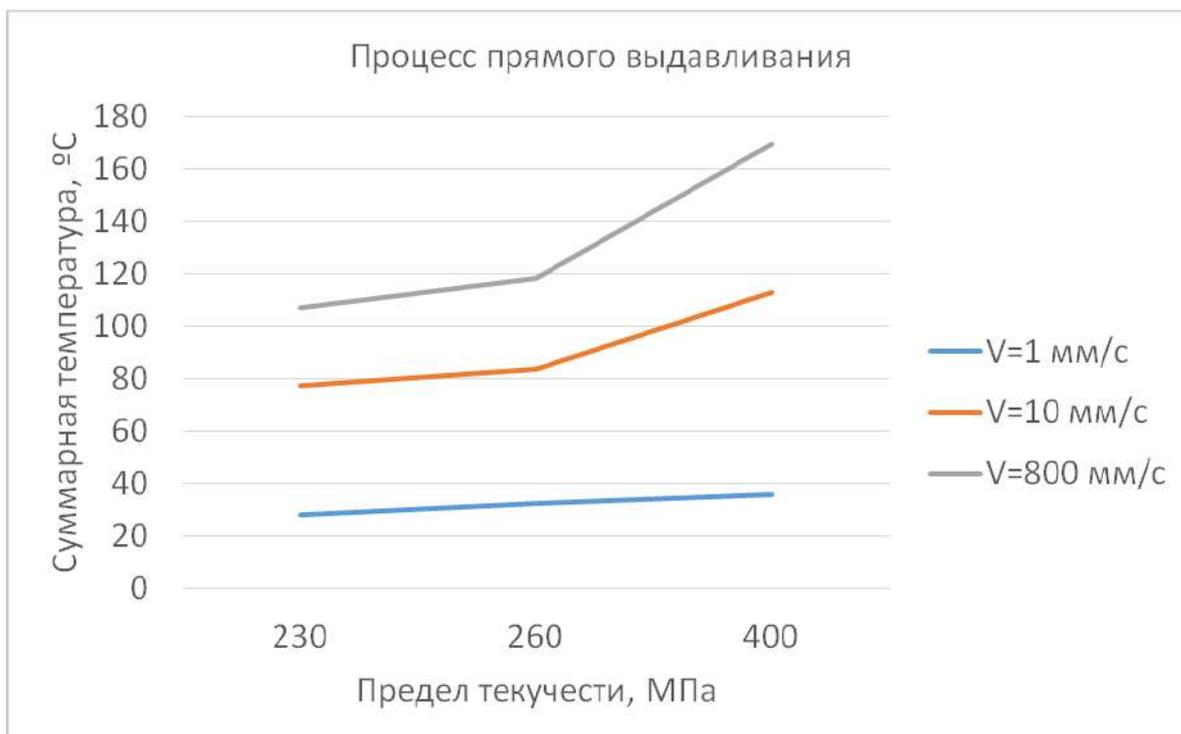


Рисунок 5.2.9 – Зависимость температуры от скорости прессового оборудования и предела текучести материала для процесса прямого выдавливания

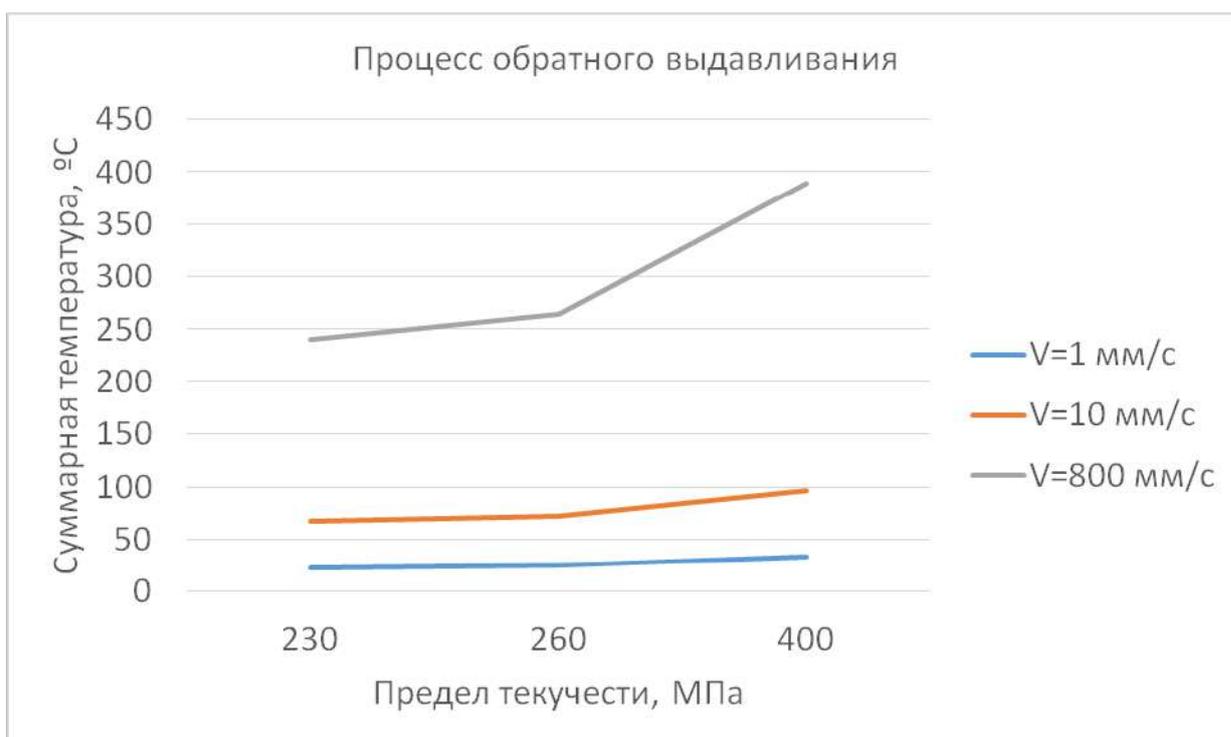


Рисунок 5.2.10 – Зависимость температуры от скорости прессового оборудования и предела текучести материала для процесса обратного выдавливания

По графикам, представленным на рисунках 5.2.8; 5.2.9; 5.2.10 можно сделать следующий вывод: суммарная температура зависит от процесса ХОШ, в процессе обратного выдавливания наблюдается самая высокая суммарная температура, а для процесса прямого выдавливания наблюдается наименьшая суммарная температура. Так же по графикам можно определить температуру в зависимости от свойств материала, скорости оборудования и типа процесса (осадка, прямое и обратное выдавливание).

5.3 Внедрение разработанного технологического процесса на предприятии

Разработанный технологический процесс был внедрен в условиях промышленного производства на предприятии ООО «Вектор» (г. Реутов).

Результаты работы приняты к внедрению с целью повышения качества и увеличения производительности осесимметричных стальных деталей «Корпус», а также с целью увеличения экономического эффекта. Примеры изготовленных изделий представлены на рис. 5.3.1 и 5.3.2.



Рисунок 5.3.1 – Деталь «Корпус» после 3-го технологического перехода



Рисунок 5.3.2 – Деталь «Корпус» после обработки резанием

5.4 Выводы к главе 5

1. Разработан технологический процесс комбинированного выдавливания стальной детали «Корпус» $\varnothing 48$ мм на базе гидравлического прессы усилием 300 тс, обеспечивающий коэффициент использования металла свыше 0,7, разнотолщинность штамповки не более 0,5 мм и производительность 180 штамповок в час.

2. С использованием предложенной методики построены графические зависимости определения температуры на границе деталь-инструмент в зависимости от предела текучести материала, типа процесса и скорости деформирования для процессов осадки, прямого и обратного выдавливания, которые позволяют определить температуру, и могут быть использованы технологами на производстве.

3. Установлено, что при реализации предлагаемого трехпереходного процесса комбинированного выдавливания температура составит 107°C , что подтверждается результатами моделирования в QForm.

4. Результаты исследований использованы на ООО «Вектор» (г. Реутов) при разработке технологического процесса изготовления детали «Корпус». Рекомендован дополнительный переход, в результате реализации предложенной рекомендации шероховатость уменьшилась с $Ra_{6,3}$ до $Ra_{3,2}$, отклонения формы и размеров уменьшилось с 0,7 мкм до 0,5 мкм, увеличилась стойкость инструмента, без образования задиров и составит 3000 деталей, что соответствует требованиям детали «Корпус».

5. Отдельные результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе Московского Политехнического Университета для бакалавров и магистрантов направления «Машиностроение» с профилем подготовки «Машины и технология обработки материалов давлением».

Заключение

В работе **решена актуальная научно-техническая задача**, заключающаяся в теоретическом и экспериментальном обосновании температурного диапазона работоспособности покрытия при холодном комбинированном выдавливании стальных заготовок. Основные результаты и выводы, полученные при подготовке диссертационной работы:

1. Установлено влияние деформационного взаимодействия на границе деталь – инструмент и пластической деформации заготовки на температуру разогрева фосфатного покрытия, определяющую свойства и повышение качества штампуемой стальной детали «Корпус». Количество тепловыделения на границе деталь - инструмент составляет 27% и достигает 35% от общего тепловыделения.

Дополнительное тепловыделение повышает температуру технологического покрытия и приводит к его разрушению и образованию дефектов налипания, задигов.

2. Определена средняя температура разогрева детали «Корпус» при деформировании операцией комбинированного выдавливания теоретически и экспериментально с использованием прямого измерения температуры современным средством измерительной техники. Она составляет $95^{\circ}\text{C} \pm 7^{\circ}\text{C}$.

Эксперимент подтверждается расчетами по установленным аналитическим зависимостям. Максимальное расхождение теории и эксперимента составляет 6%.

3. Установлен температурный диапазон работоспособности технологического покрытия при комбинированным выдавливании детали «Корпус» теоретическим путем.

Разработанные аналитические зависимости для нахождения среднего значения температуры в конце процесса комбинированного выдавливания, включающего: осадку, прямое и обратное выдавливание – с учетом теплоотдачи в штамп, а также с учетом типа оборудования и скорости деформирования, показывают работоспособность технологического покрытия до температуры 150°C .

4. Разработаны практические рекомендации по проектированию технологического процесса и выбору прессового оборудования, обеспечивающие качественное функционирование фосфатного покрытия и позволяющие изготавливать стальную

деталь «Корпус», удовлетворяющую техническим требованиям к производимому конечному продукту.

5. Результаты исследований использованы на ООО «Вектор» (г. Реутов) при разработке технологического процесса изготовления детали «Корпус». Рекомендован дополнительный переход, в результате реализации предложенной рекомендации шероховатость уменьшилась с $Ra_{6,3}$ до $Ra_{3,2}$, отклонения формы и размеров уменьшилось с 0,7 мкм до 0,5 мкм, увеличилась стойкость инструмента, без образования задиров и составит 3000 деталей, что соответствует требованиям детали «Корпус». Экономический эффект от внедрения предложенных мероприятий составляет 450 тыс. руб. в год.

Отдельные результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе.

Перспективы дальнейшей разработки.

Метод расчёта температуры от деформации и тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент можно применить и на другие технологические операции холодной объемной штамповки, а именно: вытяжка с утонением, радиальное выдавливание.

Список литературы

1. А.Е. Киреева, В.Д. Кухарь, О.Н. Митин. Технологические особенности получения конических кумулятивных облицовок. //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №11, Часть №2, 2016, с. 258 – 264.
2. А.М. Дмитриев, А.Л. Воронцов. Теория выдавливания ступенчатых стержней. //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. 2004. № 2. с. 86 – 108.
3. Авищур Б., Хан Я., Мори М. Анализ комбинированного прямого и обратного прессования. // Конструирование и технология машиностроения. Пер. с англ. М.: Мир, 1974, № 4, с. 54 – 61.
4. Амиров М.Г., Лернер П.С., Пикулин В.А., Хыбемяги А.И. Технология изготовления штампов для холодной высадки и методы повышения их стойкости. М.: Машиностроение, 1988. -55 с.
5. Артес А.Э. Холодная объемная штамповка на универсальных прессах. // Учеб.пособие. М.: Машиностроение 1987. - 61 с.
6. Банкетов А.Н., Бочаров Ю.А. и др. Кузнечно-штамповочное оборудование. Учебник для машиностроительных вузов. М. Машиностроение, 1982. - 576 с.
7. Бельский Е.И. Стойкость кузнечных штампов. Издательство «Наука и техника». Минск, 1975. – 239 с.
8. Бельский Е.И., Томилин Р.И. Повышение стойкости штампов при объемной штамповке. Редакция научно-технической литературы. Минск, 1962. – 199 с.
9. Бережной В.Л. Трение, неравномерность деформации и дефектообразование при прессовании. М.: Машиностроение, 1977. – 79 с.

10. Боровик П. В. Новые подходы к математическому моделированию технологических процессов обработки давлением: монография / П. В. Боровик, Д. А. Усатюк, – Алчевск: ДонДТУ, 2011. – 299 с.
11. В.Д. Кухарь, А.Е. Киреева. Обоснование выбора исходных заготовок при штамповке облицовок кумулятивных зарядов малого калибра с переменной толщиной стенок. //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №10, 2018, с. 187 – 192.
12. В.Д. Кухарь, А.Е. Киреева, О.Н. Митин. Исследование процесса выдавливания полуфабриката кумулятивных облицовок из мерных прутковых заготовок. //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №11, Часть №1, 2017, с. 292 – 298.
13. В.Д. Кухарь, А.Е. Киреева, О.Н. Митин. Оценка силовых режимов штамповки заготовок кумулятивных облицовок малого калибра. //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №12, Часть №2, 2017, с. 23 – 28.
14. В.Д. Кухарь, А.Е. Киреева, О.Н. Митин. Штамповка поковок для получения конических облицовок с последующей обработкой резанием. //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №11, Часть №2, 2016, с. 297 – 304.
15. В.И. Анухин. Допуски и посадки. Учебное пособие. — 5-е изд. — СПб.: Питер, 2012. — 256 с.: ил. — ISBN: 978-5-496-00042-0.
16. В.И. Платонов, А.В. Черняев, В.А. Булычев, А.А. Пасынков. Оценка влияния относительных размеров трубных заготовок на технологические параметры изометрического обратного выдавливания. //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №4, 2013, с. 28 – 36.
17. В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. Теплопередача. Учебник для вузов, изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1975 – 488 с.

18. В. Р. Каргин. Экспериментальное исследование процессов деформации при обработке давлением. / Самара, СГАУ. 2010. – 49 с.
19. Воронков В.И., Хамидулина А.А. (Прасолова А.А.), Калпин Ю.Г., Соболев Я.А. Зависимость эффективности технологической смазки (фосфатирование с омыливанием) от температуры разогрева деформируемого металла. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №10 (ч. 2), 2014, с. 126 – 137.
20. Воронков В.И., Хамидулина А.А. (Прасолова А.А.), Калпин Ю.Г., Соболев Я.А. Исследование зависимости изменения формы нейтрального слоя кольцевого образца при осадке от фактора трения. // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. №9. с. 26 – 31.
21. Гневашев Д.А., Петров П.А., Филиппов Ю.К. и др. Моделирование выдавливания осесимметричной детали с помощью системы QFORM 2D/3D. // Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства). №12, 2003, с. 26–28.
22. Головин В.А., Евстратов В.А., Рудман Л.И. и др. Холодная и полугорячая объемная штамповка на прессах. / М.: НИИМАШ, 1982. - 73 с.
23. Григорян Н.С., Акимова Е.Ф., Ваграмян Т.А. Фосфатирование: учебное пособие для студентов высших учебных заведений // М.:Машиностроение, 2008 – 138 с.
24. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. М.: Машиностроение, 1982. – 312 с.
25. Гун Г.Я., Полухин П.И., Полухин В.П. и др. Пластическое формоизменение металлов. М.: Металлургия, 1968. – 416 с.
26. Дерягин Б.В. Что такое трение. М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 230 с.
27. Евстифеев В.В. Научное обоснование, обобщение и разработка новых технологий холодной объемной штамповки: дисс. док.техн. наук: спец. 05.02.09/ В.В. Евстифеев; – М.: МГТУ им. Баумана, 1994. – 422 с.

28. Евстифеев В.В., Осинных В.Я. Методика выбора варианта технологического процесса холодной объемной штамповки. – Омск, 1973. – 74 с.
29. Исаченков Е.И. Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением. М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
30. Калпин Ю.Г. Разработка обобщенной теории и технологии объемной изотермической штамповки: дисс. док.техн. наук: спец. 05.02.09/ Ю.Г. Калпин; - М.: МАМИ - 1986. - 352 с.
31. Калпин Ю.Г., Филиппов Ю.К., Беззубов Н.Н. Оценка деформационной способности металлов в процессах холодной объемной штамповки// Технология, оборудование, организация и экономика машиностроительного производства. – 1988. – Вып. 10. – с. 1 – 16.
32. Калпин Ю.Г., Филиппов Ю.К. и др.: «Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением» 2007. - 76 с.
33. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Москва: Металлургия, 1986. - 689 с.
34. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. – М.: Янус–К, 1996. 395 – 398 с.
35. Крагельский И.В., Виноградова И.Э. Коэффициенты трения. Справочное пособие, изд.2. М. 1962. – 222 с.
36. Крагельский И.В. Трение и износ. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
37. Кроха В.А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации/М.: Машиностроение, 1968. – 131 с.
38. Леванов А.Н., Колмогоров В.Л и др. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1976. – 416 с.
39. Лыков А.В. Теория теплопередачи. М., Машгиз, 1952. –392 с. с ил.

40. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М: Высшая школа. 1967. – 600 с.
41. М.В. Грязев, С.Н. Ларин, А.В. Черняев. Предельные возможности формообразования при обжиге трубной заготовки в матрице конической формы. //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №7, Часть №1, 2016, с. 3 – 9.
42. Матвеев А.С., Кочетков В. А. Справочник кузнеца. / под ред. В.Ф. Безъязычного. М.: Машиностроение, 2011. - 360 с.
43. Миллер В.С. Контактный теплообмен в элементах высокотемпературных машин.// Киев.: «Наукова думка», 1966. – 163 с.
44. Мишунин В.А. Теория и практика процесса холодного выдавливания. М.: Машиностроение. 1993. – 320 с.
45. О.Н. Митин, В.Д. Кухарь, А.Е. Киреева. Анализ силовых режимов процесса съема цилиндрического стакана с рифленого пуансона. //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №1, 2014, с. 76 – 81.
46. О.Н. Митин, В.Д. Кухарь, А.Е. Киреева. Технологии изготовления цилиндрических заготовок с внутренними рифлениями. //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №10, 2013, с. 327 – 334.
47. Оленин Л.Д. Исследование процесса холодного комбинированного выдавливания: дисс. канд. техн. наук: спец. 05.02.09/ Л.Д. Оленин; – М.: МАМИ - 1967. – 167с.
48. Охрименко Я.М., Кравченко Н.А., Смирнова Ю.В. и др. Температура в поверхностном слое инструмента при пассивном контакте со штампованной лопаткой, Известия высших учебных заведений // Черная металлургия, №7, 1975, с. 116 –118.
49. Охрименко Я. М., Кравченко Н.А., Смирнова Ю.В. и др. Температура в приконтактной зоне штампа при штамповке лопаток из жаро-

прочных сплавов. Известия высших учебных заведений // Черная металлургия, 1974, №3, с. 61 – 64.

50. Потапенко К.Е., Пеньков И.В., Воронков В.И., Петров П.А. и др. Исследование контактного трения при горячей пластической деформации сплава АВ // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. – № 6, с. 18 – 21.

51. Прасолова А.А., Куликов М.А., ЭльдибИбрахимСаад Ахмед (IbrahimSaadAhmed), Воронков В.И. Анализ возникновения дефекта на поверхности холодноштампованной детали «Корпус» при помощи компьютерного моделирования. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №5, 2019, с. 269 – 276.

52. Прасолова А.А. Проектирование технологического процесса изготовления стальной детали «Корпус» В сборнике: Молодежь и XXI век - 2021. Материалы XI Международной молодежной научной конференции. В 6-ти томах. Отв. редактор М.С. Разумов. Курск, 2021. С. 120-123.

53. Прасолова А.А., Соболев Я.А, Петров П.А. Расчет силы деформирования при холодном комбинированном выдавливании стальных заготовок. Третья международная научно-техническая конференция, посвященная 120-летию со дня рождения член-корреспондента АН СССР Павлова Игоря Михайловича «ПАВЛОВСКИЕ ЧТЕНИЯ». Москва. 27-28 мая 2021 г./ Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2021 с. 95 – 96.

54. Ренне И.П., Подливаев Ю.В. Исследование технологических возможностей закрытой прошивки высокопрочных алюминиевых сплавов // Кузнечно-штамповочное производство. № 5, 1976, с. 9–12.

55. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. // М.:Издательство «МИР» 1979. - 392 с.

56. Сережкин М.А. Совершенствование технологического процесса вытяжки деталей из алюминиевого сплава АД1: дисс. канд. техн. наук: спец. 05.02.09/ М.А. Сережкин; -М.: МГТУ им. Баумана, - 2018. - 134с.

57. Смирнова Ю. В., Я. М. Охрименко и др. Влияние СОЖ на стойкость тяжелонагруженных штампов // Кузнечно-штамповочное производство, №10, 1978, с. 31 – 33.
58. С.С. Яковлев, В.И. Платонов, А.Н. Исаева, М.В. Ларина. Предельные степени деформации при изометрическом обратном выдавливании анизотропных трубных заготовок. //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №3, 2013, с. 513 – 521.
59. С.С. Яковлев, Д.В. Дудка. Предельные возможности операции обратного выдавливания трубных заготовок из анизотропных материалов. //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №2, 2011, с. 471 – 478.
60. С.С. Яковлев, К.С. Ремнев. Математическая модель осесимметричного деформирования толстостенных трубных заготовок из анизотропного материала. //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №4, 2011, с. 36 – 47.
61. Степанский Л.Г. Расчёты процессов обработки металлов давлением.// М.: "Машиностроение", 1979. – 215 с.
62. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. Издание 4-е, перераб. и доп. М., Машиностроение, 1977. – 423 с.
63. Субич В.Н., Шестаков Н.А., Демин В.А. и др. Расчет и проектирование технологических процессов объемной штамповки на прессах. Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2003. – 188 с.
64. Тарновский И.Я., Леванов А.Н., Поксеваткин М.И. Контактные напряжения при пластической деформации. М.: Metallurgy, 1966. – 280 с.
65. Темкин И.В. Применение графита и дисульфида молибдена в качестве твердых смазок. // М.:Отд-ние ВНИИЭМ по науч.-техн. информации. 1966. – 26 с.

66. Теория обработки металлов давлением/ И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго и др. – М.: Металлургиздат, 1963. – 672 с.
67. Теория тепломассообмена / С.И. Исаев, И.А. Кожинов, В.И. Кофанов и др. Москва: Высшая школа. 1979. – 495 с.
68. Унксов Е.П., Джонсон У. и др. Теорияковки и штамповки. Учеб.пособие М.: Машиностроение, 1992. - 720 с.
69. Унксов Е.П., Сафаров Ю.С. Экспериментальные исследования контактных напряжений при прессовании в плоском контейнере. В сб. Повышение прочности и долговечности машин. М.: ЦНИИТМАШ, 1969, 110, с. 22–45.
70. Фаворский В.Е. Холодная штамповка выдавливанием.– 2-е изд., перераб. и доп. М.; Л.: Машиностроение, 1966. – 160 с.
71. Фиглин С.З., Бойцов В.В., Калпин Ю.Г. и др. Изотермическое деформирование металлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
72. Хамидулина А.А. (Прасолова А.А.) Влияние числа штампованных заготовок на конечную температуру детали. // Известия МГТУ «МАМИ». № 2(16), 2013, т. 2. с. 202 – 205.
73. Хамидулина А.А. (Прасолова А.А.) Повышение эффективности процессов холодной объемной штамповки стальных деталей с фосфатным покрытием за счет оптимизации теплового режима работы штампов. // Технология металлов. 2015. №11. с. 30-34.
74. Хыбемяги А.И. Холодное выдавливание рельефных полостей технологической оснастки М.: Машиностроение. 1981. – 79 с.
75. Холодная объемная штамповка. Справочник / Под ред. Г.А.Навроцкого, В.А.Головина, А.Ф.Нистратова. М.: В Машиностроение, 1973. – 496 с.
76. Холодная штамповка. Справочник / Л.Л. Григорьев, К.М. Иванов, Э.Е. Юргенсон; под ред. Л.Л. Григорьева. – СПб. : Политехника, 2011. – 665 с.

77. Шнейберг В.М., Акаро И.Л. Кузнечно-штамповочное производство Волжского автомобильного завода. М.: Машиностроение, 1977. – 304 с.
78. Шофман Л.А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки: М.: Машиностроение, 1964. – 375 с.
79. Я.А. Соболев, Ю.К. Филиппов, А.В. Рагулин, А.В. Молодов. Исследование различных типов смазки при холодном обратном выдавливании. //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №2, 2012, с. 166 – 170.
80. Kunio Hayakawa. Effect of Workpiece Surface Topography on Friction in Cold Forging Using Environmentally-Friendly Lubricant. *KeyEngineeringMaterials* 767:157-162. April 2018 with 19 Reads.
81. Male A.T., Depierre V. The Validity of mathematical solutions determining friction from ring compression test. // *Trans. ASME J. Lubr. Technol.* 92 (1970), pp. 389–397.
82. T. Robinson, H. Ou*, C.G. Armstrong Study on ring compression test using physical modeling and FE simulation. *Journal of Materials Processing Technology.* 153–154 (2004) 54–59.
83. Ye Zhang, Zhigang Wang, Yasuharu Yoshikawa, Wenzheng-Dong. Experimental investigation on friction law under starved lubrication in metal forming. International Conference on the Technology of Plasticity, ICTP 2017, 17-22 September 2017, Cambridge, United Kingdom.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
КОД ПРОГРАММЫ

Расчет осадки кольца без учета упрочнения материала.

```

function kolco_r()
disp('!!!НАЧАЛО РАСЧЁТА!!!')
Rb=10; Rm=5;
Rb0=Rb; Rm0=Rm;
for k=1:1:18
% Исходные данные
dh=0.2; V=2;
G=10; % можно менять - это предел текучести
h0=7;
h=h0-dh*(k);
Ez=-V/h;
m=0.7; % можно менять - это фактор трения (от 0 до 1)
% радиусы
Rb=Rb+Vr(Rb,fminbnd(@Nf,0,Rb)).*(dh./V); Rm=Rm+Vr(Rm,fminbnd(@Nf,0,Rb)).*(dh./V);
% Минимизация
S(k,1)=fminbnd(@Nf,0,Rb);
Rbo(k,1)=Rb;
Rmo(k,1)=Rm;
ho(k,1)=h;
No(k,1)=Nf(fminbnd(@Nf,0,Rb));
end
disp('исходные данные:')
disp('внешний|внутренний|высота|фактор трения')
disp([Rb0,Rm0, h0, m])
disp('|внешний|внутренний|нейтральный|высота|')
disp([Rbo, Rmo, S, ho])
disp('объём кольца по шагам')
disp((pi.*Rbo.^2-pi.*Rmo.^2).*ho)
disp('Мощность')
disp(No)
disp('!!!КОНЕЦ РАСЧЁТА!!!')
function y=Nf(X)
y=N(X)+Tr(X);
end
%%% Мощность
function y=N(X)
y=dblquad(@NN,Rm,Rb,0,h);
function y=NN(r,z)
y=((sqrt(2)/3).*sqrt((Er(r,X)-ET(r,X)).^2+(ET(r,X)-Ez).^2+(Ez-
Er(r,X)).^2).*G)).*r.*(2*pi);
end
end
%%% Мощность трения
function y=Tr(X)
y=(m./sqrt(3)).*(2.*2.*pi.*(quadr(@Tr12, Rm, Rb)));
function y=Tr12(r)
y=(abs(Vr(r,X))).*r.*G;
end
end

```

```

%% Функции скоростей
function y=Vz(z)
    y=-(V.*z)/h;
end
function y=Vr(r,X)
    y=-(V.*(X.^2 - r.^2))/(2.*h.*r);
end
function y=Er(r,X)
    y=(V.*(X.^2 + r.^2))/(2.*h.*r.^2);
end
function y=ET(r,X)
    y=-(V.*(X.^2 - r.^2))/(2.*h.*r.^2);
end
end

```

Расчет осадки кольца с учетом учета упрочнения материала.

```

function kolco_r_upr_HS()
disp('!!!НАЧАЛО РАСЧЁТА!!!')
deff0=0.01;
Rb=10; Rm=5; def1=deff0; def2=deff0; def3=deff0; def4=deff0; def5=deff0;
def6=deff0; def7=deff0; def8=deff0; def9=deff0; def10=deff0;
R1=Rm+(Rb-Rm)/10;
R2=Rm+2*(Rb-Rm)/10;
R3=Rm+3*(Rb-Rm)/10;
R4=Rm+4*(Rb-Rm)/10;
R5=Rm+5*(Rb-Rm)/10;
R6=Rm+6*(Rb-Rm)/10;
R7=Rm+7*(Rb-Rm)/10;
R8=Rm+8*(Rb-Rm)/10;
R9=Rm+9*(Rb-Rm)/10;
Rb0=Rb; Rm0=Rm;
for k=1:1:18;
% Исходные данные
dh=0.2; V=2; h0=7;
% ФАКТОР ТРЕНИЯ (меняется от 0 до 1)
m=1;
% Коэффициенты модели сопротивления деформации (нужно менять, определяет мате-
риал)
q1=2.0000; q2=-0.0064; q3=0.9959; q4=-0.0598; q5=-0.0167;
q6=-0.0009; q7=0.3831; q8=-0.0498; q9=0.0004;
% Температура
T=400;
h=h0-dh*(k);
Ez=-V/h;
% радиусы образующие
Rb=Rb+Vr(Rb,fminbnd(@Nf,0,Rb)).*(dh./V); Rm=Rm+Vr(Rm,fminbnd(@Nf,0,Rb)).*(dh./V);
% радиусы слоёв
R1=R1+Vr(R1,fminbnd(@Nf,0,Rb)).*(dh./V);
R2=R2+Vr(R2,fminbnd(@Nf,0,Rb)).*(dh./V);
R3=R3+Vr(R3,fminbnd(@Nf,0,Rb)).*(dh./V);

```

```

R4=R4+Vr(R4,fminbnd(@Nf,0,Rb)).*(dh./V);
R5=R5+Vr(R5,fminbnd(@Nf,0,Rb)).*(dh./V);
R6=R6+Vr(R6,fminbnd(@Nf,0,Rb)).*(dh./V);
R7=R7+Vr(R7,fminbnd(@Nf,0,Rb)).*(dh./V);
R8=R8+Vr(R8,fminbnd(@Nf,0,Rb)).*(dh./V);
R9=R9+Vr(R9,fminbnd(@Nf,0,Rb)).*(dh./V);
% деформации
def1=def1+EE(Rm+(R1-Rm)./2,fminbnd(@Nf,0,Rb));
def2=def2+EE(R1+(R2-R1)./2,fminbnd(@Nf,0,Rb));
def3=def3+EE(R2+(R3-R2)./2,fminbnd(@Nf,0,Rb));
def4=def4+EE(R3+(R4-R3)./2,fminbnd(@Nf,0,Rb));
def5=def5+EE(R4+(R5-R4)./2,fminbnd(@Nf,0,Rb));
def6=def6+EE(R5+(R6-R5)./2,fminbnd(@Nf,0,Rb));
def7=def7+EE(R6+(R7-R6)./2,fminbnd(@Nf,0,Rb));
def8=def8+EE(R7+(R8-R7)./2,fminbnd(@Nf,0,Rb));
def9=def9+EE(R8+(R9-R8)./2,fminbnd(@Nf,0,Rb));
def10=def10+EE(R9+(Rb-R9)./2,fminbnd(@Nf,0,Rb));
% Минимизация
S(k,1)=fminbnd(@Nf,0,Rb);
% Генерация столбцов решения
Rbo(k,1)=Rb;
Rmo(k,1)=Rm;
R1o(k,1)=R1; R2o(k,1)=R2; R3o(k,1)=R3; R4o(k,1)=R4; R5o(k,1)=R5; R6o(k,1)=R6;
R7o(k,1)=R7;
R8o(k,1)=R8; R9o(k,1)=R9;
ho(k,1)=h;
def1o(k,1)=def1; def2o(k,1)=def2; def3o(k,1)=def3; def4o(k,1)=def4; def5o(k,1)=def5;
def6o(k,1)=def6; def7o(k,1)=def7; def8o(k,1)=def8; def9o(k,1)=def9; def10o(k,1)=def10;
No(k,1)=Nf(fminbnd(@Nf,0,Rb));
end
% Генерация и вывод матриц решения
disp('исходные данные: |внешний|внутренний|высота|фактор трения')
disp([Rb0,Rm0, h0, m])
disp('|внешний|нейтральный|внутренний|высота|')
disp([Rbo, S, Rmo, ho])
disp('|внутренний|промежуточные от 1 до 9|внешний|')
disp([Rmo, R1o, R2o, R3o, R4o, R5o, R6o, R7o, R8o, R9o, Rbo])
disp('деформации по слоям от 1 до 10')
disp([def1o, def2o, def3o, def4o, def5o, def6o, def7o, def8o, def9o, def10o])
disp('объём кольца по шагам')
disp((pi.*Rbo.^2-pi.*Rmo.^2).*ho)
disp('Мощность')
disp(No)
disp('!!!КОНЕЦ РАСЧЁТА!!!')
%% Функция минимизации
function y=Nf(X)
y=N1(X)+N2(X)+N3(X)+N4(X)+N5(X)+N6(X)+N7(X)+N8(X)+N9(X)+N10(X)+...
Tr1(X)+Tr2(X)+Tr3(X)+Tr4(X)+Tr5(X)+Tr6(X)+Tr7(X)+Tr8(X)+Tr9(X)+Tr10(X);
end
%% Мощности
function y=N1(X)

```

```

y=dblquad(@NN,Rm,R1,0,h);
function y=NN(r,z)
y=((sqrt(2)/3).*sqrt((Er(r,X)-ET(r,X)).^2+(ET(r,X)-Ez).^2+(Ez-
Er(r,X)).^2).*Gf(def1,sk(r,X),T))).*r.*(2*pi);
end
end
function y=N2(X)
y=dblquad(@NN,R1,R2,0,h);
function y=NN(r,z)
y=((sqrt(2)/3).*sqrt((Er(r,X)-ET(r,X)).^2+(ET(r,X)-Ez).^2+(Ez-
Er(r,X)).^2).*Gf(def2,sk(r,X),T))).*r.*(2*pi);
end
end
function y=N3(X)
y=dblquad(@NN,R2,R3,0,h);
function y=NN(r,z)
y=((sqrt(2)/3).*sqrt((Er(r,X)-ET(r,X)).^2+(ET(r,X)-Ez).^2+(Ez-
Er(r,X)).^2).*Gf(def3,sk(r,X),T))).*r.*(2*pi);
end
end
function y=N4(X)
y=dblquad(@NN,R3,R4,0,h);
function y=NN(r,z)
y=((sqrt(2)/3).*sqrt((Er(r,X)-ET(r,X)).^2+(ET(r,X)-Ez).^2+(Ez-
Er(r,X)).^2).*Gf(def4,sk(r,X),T))).*r.*(2*pi);
end
end
function y=N5(X)
y=dblquad(@NN,R4,R5,0,h);
function y=NN(r,z)
y=((sqrt(2)/3).*sqrt((Er(r,X)-ET(r,X)).^2+(ET(r,X)-Ez).^2+(Ez-
Er(r,X)).^2).*Gf(def5,sk(r,X),T))).*r.*(2*pi);
end
end
function y=N6(X)
y=dblquad(@NN,R5,R6,0,h);
function y=NN(r,z)
y=((sqrt(2)/3).*sqrt((Er(r,X)-ET(r,X)).^2+(ET(r,X)-Ez).^2+(Ez-
Er(r,X)).^2).*Gf(def6,sk(r,X),T))).*r.*(2*pi);
end
end
function y=N7(X)
y=dblquad(@NN,R6,R7,0,h);
function y=NN(r,z)
y=((sqrt(2)/3).*sqrt((Er(r,X)-ET(r,X)).^2+(ET(r,X)-Ez).^2+(Ez-
Er(r,X)).^2).*Gf(def7,sk(r,X),T))).*r.*(2*pi);
end
end
function y=N8(X)
y=dblquad(@NN,R7,R8,0,h);
function y=NN(r,z)

```

```

    y=((sqrt(2)/3).*sqrt((Er(r,X)-ET(r,X)).^2+(ET(r,X)-Ez).^2+(Ez-
Er(r,X)).^2).*Gf(def8,sk(r,X),T))).*r.*(2*pi);
    end
end
function y=N9(X)
    y=dblquad(@NN,R8,R9,0,h);
    function y=NN(r,z)
        y=((sqrt(2)/3).*sqrt((Er(r,X)-ET(r,X)).^2+(ET(r,X)-Ez).^2+(Ez-
Er(r,X)).^2).*Gf(def9,sk(r,X),T))).*r.*(2*pi);
    end
end
function y=N10(X)
    y=dblquad(@NN,R9,Rb,0,h);
    function y=NN(r,z)
        y=((sqrt(2)/3).*sqrt((Er(r,X)-ET(r,X)).^2+(ET(r,X)-Ez).^2+(Ez-
Er(r,X)).^2).*Gf(def10,sk(r,X),T))).*r.*(2*pi);
    end
end
%% Мощности трения
function y=Tr1(X)
    y=(m./sqrt(3)).*(2.*2.*pi.*(quadr(@Tr12, Rm, R1)));
    function y=Tr12(r)
        y=(abs(Vr(r,X))).*r.*Gf(def1,sk(r,X),T);
    end
end
function y=Tr2(X)
    y=(m./sqrt(3)).*(2.*2.*pi.*(quadr(@Tr12, R1, R2)));
    function y=Tr12(r)
        y=(abs(Vr(r,X))).*r.*Gf(def2,sk(r,X),T);
    end
end
function y=Tr3(X)
    y=(m./sqrt(3)).*(2.*2.*pi.*(quadr(@Tr12, R2, R3)));
    function y=Tr12(r)
        y=(abs(Vr(r,X))).*r.*Gf(def3,sk(r,X),T);
    end
end
function y=Tr4(X)
    y=(m./sqrt(3)).*(2.*2.*pi.*(quadr(@Tr12, R3, R4)));
    function y=Tr12(r)
        y=(abs(Vr(r,X))).*r.*Gf(def4,sk(r,X),T);
    end
end
function y=Tr5(X)
    y=(m./sqrt(3)).*(2.*2.*pi.*(quadr(@Tr12, R4, R5)));
    function y=Tr12(r)
        y=(abs(Vr(r,X))).*r.*Gf(def5,sk(r,X),T);
    end
end
function y=Tr6(X)
    y=(m./sqrt(3)).*(2.*2.*pi.*(quadr(@Tr12, R5, R6)));

```

```

function y=Tr12(r)
    y=(abs(Vr(r,X))).*r.*Gf(def6,sk(r,X),T);
end
end
function y=Tr7(X)
    y=(m./sqrt(3)).*(2.*2.*pi.*(quadr(@Tr12, R6, R7)));
    function y=Tr12(r)
        y=(abs(Vr(r,X))).*r.*Gf(def7,sk(r,X),T);
    end
end
function y=Tr8(X)
    y=(m./sqrt(3)).*(2.*2.*pi.*(quadr(@Tr12, R7, R8)));
    function y=Tr12(r)
        y=(abs(Vr(r,X))).*r.*Gf(def8,sk(r,X),T);
    end
end
function y=Tr9(X)
    y=(m./sqrt(3)).*(2.*2.*pi.*(quadr(@Tr12, R8, R9)));
    function y=Tr12(r)
        y=(abs(Vr(r,X))).*r.*Gf(def9,sk(r,X),T);
    end
end
function y=Tr10(X)
    y=(m./sqrt(3)).*(2.*2.*pi.*(quadr(@Tr12, R9, Rb)));
    function y=Tr12(r)
        y=(abs(Vr(r,X))).*r.*Gf(def10,sk(r,X),T);
    end
end
end
%% Функции 1-ой области для построения графика зависимости от R
function y=Vz(z)
    y=-(V.*z)/h;
end
function y=Vr(r,X)
    y=-(V.*(X.^2 - r.^2))./(2.*h.*r);
end
function y=Er(r,X)
    y=(V.*(X.^2 + r.^2))./(2.*h.*r.^2);
end
function y=ET(r,X)
    y=-(V.*(X.^2 - r.^2))./(2.*h.*r.^2);
end
%% Накопленная деформация
function y=EE(r,X)
    y=(sqrt(2)/3).*sqrt((Er(r,X)-ET(r,X)).^2+(ET(r,X)-Ez).^2+(Ez-Er(r,X)).^2).*(dh./V);
end
%% Скорость деформации
function y=sk(r,X)
    y=(sqrt(2)/3).*sqrt((Er(r,X)-ET(r,X)).^2+(ET(r,X)-Ez).^2+(Ez-Er(r,X)).^2);
end
%% Модель сопротивления деформации
function y=Gf(e,sk,T)

```

```

y=q1.*exp(q2.*T).*(T.^q3).*(e.^q4).*exp(q5./e).*((1+e).^(q6.*T)).*...
exp(q7.*e).*(sk.^q8).*sk.^(q9.*T);
end
end

```

Расчет температуры от деформации при осадке цилиндра на гидравлическом прессе.

```

function teplo_cyl_hyd()
clear all
close all
disp('!!!!!!НАЧАЛО РЕШЕНИЯ (teplo_cyl_hyd)!!!!!!')
%%%%%%%%%%
%
% параметры задачи:
d0=0.06; h0=0.12;
Gt=230*10^6; Ts=75.5; %(температура штампа) % можно менять
T0=20; c=500; ro=7800;
% время процесса
tk=10; % можно менять
%Скорость
v=0.010; % можно менять
%%%%%%%%%%
%
t0=[0.001 tk];
V0=pi*((d0/2)^2)*h0;
F0=((d0/2)^2)*pi;
TD=[100 0.266; 250 0.181; 500 0.138; 750 0.112; 1000 0.091; 1500 0.077;
2000 0.064; 2500 0.056; 3000 0.049; 4000 0.039; 5000 0.028; 6000 0.023;
7000 0.017; 8000 0.015; 10^4 0.014; 10^5 0.012; 10^6 0.01];
TDX=(TD(:,1))./0.0001;
TDY=((TD(:,2))./1000);
x0=[1 0 -0.5 0.001 1];
ngr=[-inf -inf -inf -inf -inf];
wgr=[inf inf inf inf inf];
opt=optimset;
opt.MaxFunEvals=10000;
opt.TolFun=10e-10;
opt.MaxIter=5000;
alk=lsqcurvefit(@mod_e, x0, TDX, TDY, ngr, wgr, opt);
%% решение
prir=1.0000e-010;
tos1=odeset('RelTol',prir);
[t, T]=ode45(@res1, t0, T0, tos1);
function y=res1(t,T) % ситема диф. ур.
y=(F0.*Gt.*v.*(log(h0./(h0 - t.*v)) + 1).^2.2)./(V0.*c.*ro) -...
(2.*(1./(mod_e(alk,Davlenie(t))))).*(T - Ts))./(c.*ro.*(h0 - t.*v));
end
function y=hif(t) % текущая высота
y=h0 - v.*t;
end

```

```

function y=dTf1(t) % приращение тепла от работы деформации
    y=(F0.*Gt.*v.*(log(h0./(h0 - t.*v)) + 1).^2.2)./(V0.*c.*ro);
end
function y=dTf2(t,T) % приращение тепла от трения
    y=(2.*(1./(mod_e(alk,Davlenie(t))))).*(T - Ts))./(c.*ro.*(h0 - t.*v));
end
function y=Po(t) % сила деформации
    y=F0.*Gt.*(log(h0./(h0 - t.*v)) + 1).^2.2;
end
function y=EF(t) % накопленная деформация
    y=log(h0./(h0 - t.*v));
end
function y=mod_e(a,x) % аппроксимация для опред al
    y=(a(5).*x.^a(1)+a(2)).^a(3)+a(4);
end
function y=Davlenie(t) % сила деформации
    y=Po(t)./(V0./(hif(t)));
end
%% графики
disp('Значения для графика')
disp([EF(t) T])
figure(1)
plot(EF(t),T)
title('Temperature of the workpiece','fontsize', 15)
figure(2)
plot(t,hif(t))
title('Height of the workpiece','fontsize', 15)
figure(3)
plot(t,dTf2(t,T),t,dTf1(t))
title('Increments of the function','fontsize', 15)
figure(4)
plot(t,Po(t))
title('The force of deformation','fontsize', 15)
figure(5)
plot(t,EF(t))
title('Strain','fontsize', 15)
figure(6)
plot(TDX,TDY,'b',TDX,mod_e(alk,TDX),'r')
title('Thermal resistance','fontsize', 15)
disp('вермя процесса')
disp(tk)
disp('накопленная деформация')
disp(EF(t(end)))
disp('температура заготовки')
disp(T(end))
%disp((1./(mod_e(alk,Davlenie(t))))))
disp('!!!!!!!!!!!!!!КОНЕЦ РЕШЕНИЯ!!!!!!!!!!!!!!')
end

```

Расчет температуры в критической точке при осадке цилиндра на гидравлическом прессе.

```
function teplo_cyl_hyd_point()
clear all
close all
disp('!!!!!!!НАЧАЛО РЕШЕНИЯ (teplo_cyl_hyd_point)!!!!!!!')
%%%%%%%%%%
%
%%%%%%%%%% ПАРАМЕТРЫ ЗАДАЧИ: %%%%%%%%%%
d0=0.06; h0=0.12;
Gt=400*10^6; % можно менять
T0=20; c=500; ro=7800;
% время процесса
tk=100; % можно менять
%Скорость
v=0.001; % можно менять
mu=0.05; % (коэффициент трения) можно менять
% Величины в формуле Лыкова:
Ke=1; lamb=50;
X=0.02; % глубина слоя
% Коэффициенты модели:
A=0.31; n=0.012;
%%%%%%%%%%
%
% таблица для ierfc
ietabl=[0, 0.5642; 0.01, 0.5542; 0.02, 0.544; 0.03, 0.535; 0.04,0.5251; 0.05, 0.5156;
0.08,0.4878;...
0.1, 0.4698; 0.13, 0.4437; 0.16, 0.4156; 0.19, 0.3944; 0.23, 0.3638; 0.27, 0.3348; 0.3,
0.3142;...
0.35, 0.2819; 0.4, 0.2521; 0.45, 0.2247; 0.5, 0.1996; 0.56, 0.1724; 0.62, 0.1482; 0.68,
0.1267;...
0.74, 0.1077; 0.8, 0.09212; 0.9, 0.0682; 1, 0.0503; 1.1, 0.0365; 1.3, 0.0183; 1.5, 0.0086; 2,
0.001];
iepol=polyfit(ietabl(:,1),ietabl(:,2),6);
ieval=polyval(iepol,ietabl(:,1));
Qsrc=0;
a=lamb./(c.*ro); % температуропроводность Лыков
V0=pi*((d0/2)^2)*h0;
F0=((d0/2)^2)*pi;
for k=1:1:1000
t=tk*(k./1000);
ierfc=polyval(iepol,0.5*X*sqrt(a*t));
Tp(k)=tpot(t);
Hi(k)=hif(t);
Def(k)=EF(t);
Time(k)=t;
Qsr=(quadl(@tpot,0,t))./t; % интегрирование
Vkrit(k)=vkp(t);
Skrit(k)=Pkp(t);
Tkrit(k)=T0+dT(t);
```

```

end
%%% решение
function y=tpot(t) % тепловой поток
    y=(V0.*mu.*v.*(Gt + A.*log(h0./(h0 - t.*v)).^n))./(2.*pi.^(1/2).*(h0 - t.*v).^2.*(V0./(h0 -
t.*v)).^(1./2));
end
function y=hif(t) % текущая высота
    y=h0 - v.*t;
end
function y=vkpr(t) % скорость критической точки
    y=(V0.*v)./(2.*pi.^(1/2).*(h0 - t.*v).^2.*(V0./(h0 - t.*v)).^(1./2));
end
function y=Rkpr(t) % перемещение критической точки
    y=(V0./(h0 - t.*v)).^(1./2)./pi.^(1./2) - d0./2;
end
function y=EF(t) % накопленная деформация
    y=log(h0./(h0 - t.*v));
end
function y=dT(t) % формула Лыкова
    y=(Ke./(1+Ke)).*(2.*Qsr./lamb).*sqrt(a.*t).*ierfc;
end
% графики
disp('Значения для графика')
disp([EF(Time)' Tkrit'])
figure(1)
plot(EF(Time),Tkrit)
title('Temperature of the critical point','fontsize', 15)
figure(2)
plot(Time,Hi)
title('Height of the workpiece','fontsize', 15)
figure(3)
plot(Time,Def)
title('Strain','fontsize', 15)
figure(4)
plot(Time,Skrit)
title('Movement of the critical point','fontsize', 15)
figure(5)
plot(Time,Vkrit)
title('Velocity of the critical point','fontsize', 15)
figure(6)
plot(ietabl(:,1),ietabl(:,2),ietabl(:,1),ieval)
title('ierfc function','fontsize', 15)
disp('вермя процесса')
disp(tk)
disp('накопленная деформация')
disp(Def(end))
disp('температура в критической точке')
disp(Tkrit(end))
disp('!!!!!!!!!!!!КОНЕЦ РЕШЕНИЯ!!!!!!!!!!!!')
end

```

Расчет температуры от деформации при осадке цилиндра на кривошипном прессе.

```

function teplo_cyl_kr()
clear all
close all
disp('!!!!!!!НАЧАЛО РЕШЕНИЯ (teplo_cyl_kr)!!!!!!!')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% параметры задачи:
d0=0.06; h0=0.12; Gt=230*10^6; Ts=75.5; %(температура штампа) % можно менять
T0=20; c=500; ro=7800;
% параметры кривошипа:
n=15; R=0.84; L=4; % можно менять
% конечная высота заготовки
hkon=0.02; % можно менять
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
tcykl=(60/n)/2;
V0=pi*((d0/2)^2)*h0;
F0=((d0/2)^2)*pi;
hmz=h0-hkon;
TD=[100 0.266; 250 0.181; 500 0.138; 750 0.112; 1000 0.091; 1500 0.077;
    2000 0.064; 2500 0.056; 3000 0.049; 4000 0.039; 5000 0.028; 6000 0.023;
    7000 0.017; 8000 0.015; 10^4 0.014; 10^5 0.012; 10^6 0.01];
TDX=(TD(:,1))./0.0001;
TDY=((TD(:,2))./1000);
x0=[1 0 -0.5 0.001 1];
ngr=[-inf -inf -inf -inf -inf];
wgr=[inf inf inf inf inf];
opt=optimset;
opt.MaxFunEvals=10000;
opt.TolFun=10e-10;
opt.MaxIter=5000;
alk=lsqcurvefit(@mod_e, x0, TDX, TDY, ngr, wgr, opt);
v=sym('pi*(n/30)*R*(sin(pi*(n/30)*t)+(R/L)*sin(2*pi*(n/30)*t/2)'); % скорость
%% время процесса (подставлять по решению)
tk=[ (30*(pi + acos((L + (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)
    (30*(pi - acos((L + (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)
    (30*(pi + acos((L - (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)
    (30*(pi - acos((L - (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)];
tpr=tk(4);
%% решение
prir=1.0000e-010;
tos1=odeset('RelTol',prir);
t0=[tpr tcykl];
[t, T]=ode45(@res1, t0, T0, tos1);
function y=res1(t,T) % система диф. ур.
y=(pi.*F0.*Gt.*R.*n.*(sin((pi.*n.*t)/30) + (R.*sin((pi.*n.*t)/15))./...
    (2.*L)).*(log(h0./(2.*R + h0 - hmz - R.*(2.*sin((pi.*n.*t)/60).^2 +...
    (R.*sin((pi.*n.*t)/30).^2)./(2.*L)))) + 1).^2.2)./(30.*V0.*c.*ro) - ...

```

```

    (2.*(1./(mod_e(alk,Davlenie(t))))*(T - Ts))./(c.*ro.*(2.*R + h0 - h mz -
R.*(2.*sin((pi.*n.*t)/60).^2 +...
    (R.*sin((pi.*n.*t)/30).^2)/(2.*L))))); % менять по факту решения
end
function y=hif(t) % текущая высота
y=2.*R + h0 - h mz - R.*(2.*sin((pi.*n.*t)/60).^2 +...
    (R.*sin((pi.*n.*t)/30).^2)/(2.*L)); % менять по факту решения
end
function y=dTf1(t) % приращение тепла от работы деформации
y=(pi.*F0.*Gt.*R.*n.*(sin((pi.*n.*t)/30) + (R.*sin((pi.*n.*t)/15))/(2.*L)).*...
    (log(h0./(2.*R + h0 - h mz - R.*(2.*sin((pi.*n.*t)/60).^2 +...
    (R.*sin((pi.*n.*t)/30).^2)/(2.*L)))) + 1).^2.2)/(30.*V0.*c.*ro); % менять по факту ре-
шения
end
function y=dTf2(t,T) % приращение тепла от передачи в штамп
y=(2.*(1./(mod_e(alk,Davlenie(t))))*(T - Ts))./(c.*ro.*(2.*R + h0 - h mz -
R.*(2.*sin((pi.*n.*t)/60).^2 +...
    (R.*sin((pi.*n.*t)/30).^2)/(2.*L))))); % менять по факту решения
end
function y=Po(t) % сила деформации
y=F0.*Gt.*(log(h0./(2.*R + h0 - h mz - R.*(2.*sin((pi.*n.*t)/60).^2 +...
    (R.*sin((pi.*n.*t)/30).^2)/(2.*L)))) + 1).^2.2; % менять по факту решения
end
function y=EF(t) % накопленная деформация
y=log(h0./(2.*R + h0 - h mz - R.*(2.*sin((pi.*n.*t)/60).^2 +...
    (R.*sin((pi.*n.*t)/30).^2)/(2.*L))))); % менять по факту решения
end
function y=vsk(t)
y=pi.*(n./30).*R.*(sin(pi.*(n./30).*t)+(R./L).*sin(2.*pi.*(n./30).*t)/2);
end
function y=put(t)
y=R.*(1-cos(pi.*(n./30).*t)+(R./L.*(1-cos(2.*pi.*(n./30).*t)))/4);
end
function y=mod_e(a,x) % аппроксимация для опред al
y=(a(5).*x.^a(1)+a(2).^a(3)+a(4);
end
function y=Davlenie(t) % сила деформации
y=Po(t)/(V0/(hif(t)));
end
%% графики
disp('Значения для графика')
disp([EF(t) T])
figure(1)
plot(EF(t),T)
title('Temperature of the workpiece','fontsize', 15)
figure(2)
plot(t,hif(t))
title('Height of the workpiece','fontsize', 15)
figure(3)
plot(t,dTf2(t,T),t,dTf1(t))
title('Increments of the function','fontsize', 15)

```

```

figure(4)
plot(t,Po(t))
title('The force of deformation','fontsize', 15)
figure(5)
plot(t,EF(t))
title('Strain','fontsize', 15)
figure(6)
plot(t,vsk(t))
title('Velocity','fontsize', 15)
figure(7)
plot(t,put(t))
title('Movement','fontsize', 15)
disp('время цикла')
disp(tcykl)
disp('время процесса')
disp(tcykl-tp)
disp('накопленная деформация')
disp(EF(t(end)))
disp('температура заготовки')
disp(T(end))
%disp(Davlenie(t))
disp('!!!!!!!!!!!!КОНЕЦ РЕШЕНИЯ!!!!!!!!!!!!')
end

```

Расчет температуры в критической точке при осадке цилиндра на кривошипном прессе.

```

function teplo_cyl_kr_point()
clear all
close all
disp('!!!!!!!!НАЧАЛО РЕШЕНИЯ (teplo_cyl_kr_point)!!!!!!!!')
%%%%%%%%%%
%
%%%%%%%%%% ПАРАМЕТРЫ ЗАДАЧИ: %%%%%%%%%%%
d0=0.06; h0=0.12; Gt=230*10^6; % можно менять
T0=20; c=500; ro=7800; % можно менять
% параметры кривошипа:
n=15; R=0.84; L=4; % можно менять
% конечная высота заготовки
hkon=0.02; % можно менять
mu=0.05; % (коэффициент трения) можно менять
% Величины в формуле Лыкова:
Ke=1; lamb=50;
X=0.02; % глубина слоя
% Коэффициенты модели:
AA=0.31; nn=0.012;
%%%%%%%%%%
%
% таблица для ierfc
ietabl=[0, 0.5642; 0.01, 0.5542; 0.02, 0.544; 0.03, 0.535; 0.04,0.5251; 0.05, 0.5156;
0.08,0.4878;...

```

```

0.1, 0.4698; 0.13, 0.4437; 0.16, 0.4156; 0.19, 0.3944; 0.23, 0.3638; 0.27, 0.3348; 0.3,
0.3142;...
0.35, 0.2819; 0.4, 0.2521; 0.45, 0.2247; 0.5, 0.1996; 0.56, 0.1724; 0.62, 0.1482; 0.68,
0.1267;...
0.74, 0.1077; 0.8, 0.09212; 0.9, 0.0682; 1, 0.0503; 1.1, 0.0365; 1.3, 0.0183; 1.5, 0.0086; 2,
0.001];
iepol=polyfit(ietabl(:,1),ietabl(:,2),6);
ieval=polyval(iepol,ietabl(:,1));
Qsrc=0;
a=lamb./(c.*ro); % температуропроводность (Лыков)
V0=pi*((d0/2)^2)*h0;
hmz=h0-hkon;
%v=sym('pi*(n/30)*R*(sin(pi*(n/30)*t)+(R/L)*sin(2*pi*(n/30)*t/2)'); % скорость
tcykl=(60/n)/2;
%% время процесса (подставляя по решению)
tk=[ (30*(pi + acos((L + (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)
(30*(pi - acos((L + (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)
(30*(pi + acos((L - (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)
(30*(pi - acos((L - (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)];
tpr=tk(4);
for k=1:1:1000
    t=tpr+k*(tcykl-tpr)/1000;
ierfc=polyval(iepol,0.5*X*sqrt(a*t));
%disp(ierfc)
Tp(k)=tpot(t);
Hi(k)=hif(t);
Def(k)=EF(t);
Time(k)=t;
%Qsr=(quadr(@tpot,tpr,t))/(t-tpr); % интегрирование
Qsrc=Qsrc+mu*(Gt+AA*((EF(t))^nn))*vkp(t); % интегрирование по циклу
Qsr=Qsrc/k; % интегрирование по циклу
%disp(mu*(Gt+AA*((EF(t))^nn))*vkp(t))
Vkrit(k)=vkp(t);
Skrit(k)=Pkp(t);
Tkrit(k)=T0+dT(t);
end
%% решение
function y=tpot(t) % тепловой поток
    y=(2.^(1/2).*L.*pi.^(1/2).*R.*V0.*mu.*n.*(Gt + AA.*log(-
(2.*L.*h0)/(R.^2.*sin((pi.*n.*t)/30).^2 +...
4.*L.*R.*sin((pi.*n.*t)/60).^2 - 4.*L.*R - 2.*L.*h0 +...
2.*L.*hmz)).^nn.*(2.*L.*sin((pi.*n.*t)/30) +...
R.*sin((pi.*n.*t)/15)))/(60.*(-(L.*V0)/(R.^2.*sin((pi.*n.*t)/30).^2 +...
4.*L.*R.*sin((pi.*n.*t)/60).^2 - 4.*L.*R - 2.*L.*h0 +
2.*L.*hmz)).^(1/2).*R.^2.*sin((pi.*n.*t)/30).^2 +...
4.*L.*R.*sin((pi.*n.*t)/60).^2 - 4.*L.*R - 2.*L.*h0 + 2.*L.*hmz).^2);
end
function y=hif(t) % текущая высота
    y=2.*R + h0 - hmz - R.*(2.*sin((pi.*n.*t)/60).^2 + (R.*sin((pi.*n.*t)/30).^2)/(2.*L));
end
function y=vkp(t) % скорость критической точки

```

```

y=(R.*V0.*((pi.*n.*sin((pi.*n.*t)/60).*cos((pi.*n.*t)/60))./15 +...
(pi.*R.*n.*sin((pi.*n.*t)/30).*cos((pi.*n.*t)/30))./(30.*L))./...
(2.*pi.^(1./2).*(V0./(2.*R + h0 - hmz - R.*(2.*sin((pi.*n.*t)/60).^2 +...
(R.*sin((pi.*n.*t)/30).^2)./(2.*L))).^(1./2).*(2.*R + h0 - hmz -...
R.*(2.*sin((pi.*n.*t)/60).^2 + (R.*sin((pi.*n.*t)/30).^2)./(2.*L))).^2);
end
function y=Pkp(t) % перемещение критической точки
y=(V0./(2.*R + h0 - hmz - R.*(2.*sin((pi.*n.*t)/60).^2 +...
(R.*sin((pi.*n.*t)/30).^2)./(2.*L))).^(1./2)./pi.^(1./2) - d0./2;
end
function y=EF(t) % накопленная деформация
y=log(h0./(2.*R + h0 - hmz - R.*(2.*sin((pi.*n.*t)/60).^2 +...
(R.*sin((pi.*n.*t)/30).^2)./(2.*L))));
end
function y=dT(t) % формула Лыкова
y=(Ke./(1+Ke)).*(2.*Qsr./lamb).*sqrt(a.*(t-tp)).*ierfc;
end
tall=0:0.001:tcykl;
function y=movpunch(t) % перемещение пуансона
y=R.*(1-cos(pi.*(n./30).*(t)))+(R/L).*(1-cos(2.*pi.*(n./30).*(t)))./4);
end
% графики
disp('Значения для графика')
disp([EF(Time)' Tkrit'])
figure(1)
plot(EF(Time),Tkrit)
title('Temperature of the critical point','fontsize', 15)
figure(2)
plot(Time,Hi)
title('Height of the workpiece','fontsize', 15)
figure(3)
plot(Time,Def)
title('Strain','fontsize', 15)
figure(4)
plot(Time,Skrit)
title('Movement of the critical point','fontsize', 15)
figure(5)
plot(Time,Vkrit)
title('Velocity of the critical point','fontsize', 15)
figure(6)
plot(ietabl(:,1),ietabl(:,2),ietabl(:,1),ieval)
title('ierfc function','fontsize', 15)
figure(7)
plot(tall, movpunch(tall))
title('movement of punch','fontsize', 15)
disp('время цикла')
tcykl=(60/n)/2;
disp(tcykl)
disp('время процесса')
disp(tcykl-tp)
disp('накопленная деформация')

```

```

disp(Def(end))
disp('температура в критической точке')
disp(Tkrit(end))
%disp('прверка начального положения')
%disp(2*R-movpunch(tpr))
disp('!!!!!!!!!!!!КОНЕЦ РЕШЕНИЯ!!!!!!!!!!!!')
end

```

Расчет температуры от деформации при прямом выдавливании цилиндра на гидравлическом прессе.

```

function teplo_pv_hyd()
clear all
close all
disp('!!!!!!!!НАЧАЛО РЕШЕНИЯ (teplo_pv_hyd)!!!!!!!!')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% параметры задачи:
d0=0.05;
dst=0.035; %(диаметр стержня) % можно менять
ug=45; %(угол на матрице) % можно менять
Gt=230*10^6;
NNN=50; % номер штамповки
Ts=20+60.*(1-exp(-0.015.*NNN)); % расчётная
T0=20; c=500; ro=7800; al=330000; % можно менять %(температура штампа) % можно ме-
нять
%Скорость
v=0.01; % можно менять
mu=0.05; % (коэффициент трения) можно менять
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
TD=[100 0.266; 250 0.181; 500 0.138; 750 0.112; 1000 0.091; 1500 0.077;
    2000 0.064; 2500 0.056; 3000 0.049; 4000 0.039; 5000 0.028; 6000 0.023;
    7000 0.017; 8000 0.015; 10^4 0.014; 10^5 0.012; 10^6 0.01];
TDX=(TD(:,1))./0.0001;
TDY=((TD(:,2))./1000);
x0=[1 0 -0.5 0.001 1];
ngr=[-inf -inf -inf -inf -inf];
wgr=[inf inf inf inf inf];
opt=optimset;
opt.MaxFunEvals=10000;
opt.TolFun=10e-10;
opt.MaxIter=5000;
alk=lsqcurvefit(@mod_e, x0, TDX, TDY, ngr, wgr, opt);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
РЕШЕНИЕ %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
ugr=pi*(ug/180);
rst=dst./2; % радиус стержня
r0=d0./2; % радиус матрицы
F0=((d0./2).^2).*pi; % площадь матрицы
Fst=((dst./2).^2).*pi; % поперечная площадь выдавливаемого стержня
Vd0=(1./3)*(F0.*(r0./tan(ugr))-Fst.*(rst./tan(ugr))); %объём очага деформации
hmz=Vd0./F0; % выстоа "заготовки" равной объёму очага деформации

```

```

R=r0./sin(ugr); % образующая большого конуса
r=rst./sin(ugr); % образующая малого конуса
Fk=pi.*r0.*R-pi.*rst.*r; % контактная поверхность
Esp=log(F0/Fst); % деформация
Davlenie=2*Gt*F0*Esp/F0; % давление
disp('время процесса')
tk=hmz/v; % (новый вариант)
disp(tk)
%% функции
t0=[0.001 tk];
prir=1.0000e-010;
tos1=odeset('RelTol',prir);
[t, T]=ode45(@res1, t0, T0, tos1);
function y=res1(t,T) % система диф. ур.
    y=(Fk*Ts*(1./(mod_e(alk,Davlenie))) - Fk*T*(1./(mod_e(alk,Davlenie))) +
    2*Esp*F0*Gt*v)/(Vd0*c*ro);
end
function y=vkp(ro) % скорость критической точки (подинтегральная)
    y=(R.^2.*v.*cos(ugr))./ro.^2;
end
function y=dTf1(t) % приращение тепла от работы деформации
    y=(2*Esp*F0*Gt*v)/(Vd0*c*ro);
end
function y=dTf2(t,T) % приращение тепла от трения
    y=(Fk*(1./(mod_e(alk,Davlenie)))*(T - Ts))/(Vd0*c*ro);
end
function y=mod_e(a,x) % аппроксимация для опред ал
    y=(a(5).*x.^a(1)+a(2)).^a(3)+a(4);
end
figure(1)
plot(t,T)
title('Temperature of the workpiece','fontsize', 15)
figure(2)
plot(t,dTf2(t,T),t,dTf1(t))
title('Increments of the function','fontsize', 15)
disp('деформация')
disp(Esp)
disp('Температура заготовки к окончанию вытекания')
disp(T(end))
disp((1./(mod_e(alk,Davlenie))))
disp('!!!!!!!!!!!!КОНЕЦ РЕШЕНИЯ!!!!!!!!!!!!')
end

```

Расчет температуры в критической точке при прямом выдавливании цилиндра на гидравлическом прессе.

```

function teplo_pv_hyd_point()
clear all
close all
disp('!!!!!!!!!!!!НАЧАЛО РЕШЕНИЯ (teplo_pv_hyd_point)!!!!!!!!!!!!')

```

```

%%%%%%%%%%
%
% параметры задачи:
d0=0.05; Gt=400*10^6; %(температура штампа) % можно менять
dst=0.035; %(диаметр стержня) % можно менять
ug=45; %(угол на матрице) % можно менять
T0=20; c=500; ro=7800; % можно менять
%Скорость
v=0.01; % можно менять
mu=0.05; % (коэффициент трения) можно менять
% Величины в формуле Лыкова:
Ke=1; lamb=50;
X=0.02; % глубина слоя
% Коэффициенты модели:
A=0.31; n=0.012;
%%%%%%%%%% РЕШЕНИЕ %%%%%%%%%%%
% таблица для ierfc
ietabl=[0, 0.5642; 0.01, 0.5542; 0.02, 0.544; 0.03, 0.535; 0.04,0.5251; 0.05, 0.5156;
0.08,0.4878;...
0.1, 0.4698; 0.13, 0.4437; 0.16, 0.4156; 0.19, 0.3944; 0.23, 0.3638; 0.27, 0.3348; 0.3,
0.3142;...
0.35, 0.2819; 0.4, 0.2521; 0.45, 0.2247; 0.5, 0.1996; 0.56, 0.1724; 0.62, 0.1482; 0.68,
0.1267;...
0.74, 0.1077; 0.8, 0.09212; 0.9, 0.0682; 1, 0.0503; 1.1, 0.0365; 1.3, 0.0183; 1.5, 0.0086; 2,
0.001];
iepol=polyfit(ietabl(:,1),ietabl(:,2),6);
ieval=polyval(iepol,ietabl(:,1));
a=lamb./(c.*ro); % температуропроводность Лыков
ugr=pi*(ug/180);
rst=dst./2; % радиус стержня
r0=d0./2; % радиус матрицы
F0=((d0./2).^2).*pi; % площадь матрицы
Fst=((dst./2).^2).*pi; % поперечная площадь выдавливаемого стержня
Vd0=(1./3)*(F0.*(r0./tan(ugr))-Fst.*(rst./tan(ugr))); %объем очага деформации
hmz=Vd0./F0; % выстоа "заготовки" равной объему очага деформации
disp('высота "заготовки" равной объему очага деформации')
disp(hmz)
R=r0./sin(ugr); % образующая большого конуса
r=rst/sin(ugr); % образующая малого конуса
Fk=pi.*r0.*R-pi.*rst.*r; % контактная поверхность
Esp=log(F0/Fst); % деформация
Dav1=2*Gt*F0*Esp/F0; % давление
disp('время процесса')
tk=hmz/v; % (новый вариант)
%tk=(R-r)/((quadl(@vkr,r,R))/(R-r)); (старый вариант)
disp(tk)
disp('значение ierfc')
ierfc=polyval(iepol,0.5*X*sqrt(a*(tk)));
disp(ierfc)
%% Вариант интегрирования по функции

```

```

Qsr=(quadr(@tpot,R,r))./(R-r);
%disp(Qsr)
disp('деформация')
disp(Esp)
disp('температура критической точки')
disp(T0+dT(tk))
%disp('прирост температуры в точке')
%disp(dT(tk))
figure(1)
rog=R:-0.0001:r;
figure(1)
plot(rog,vkp(rog))
title('Velocity of point','fontsize', 15)
figure(2)
plot(rog,tpot(rog))
title('Тепловой поток','fontsize', 15)
disp('!!!!!!!!!!!!КОНЕЦ РЕШЕНИЯ!!!!!!!!!!!!')
%% функции
function y=tpot(ro) % тепловой поток
    y=-(Davl.*R.^2.*mu.*v.*cos(ugr))./ro.^2;
end
function y=vkp(ro) % скорость критической точки (подинтегральная)
    y=(R.^2.*v.*cos(ugr))./(ro.^2);
end
function y=dT(t) % формула Лыкова
    y=(Ke./(1+Ke)).*(2.*Qsr./lamb).*sqrt(a.*t).*ierfc;
end
end
end

```

Расчет температуры от деформации при прямом выдавливании цилиндра на кривошипном прессе.

```

function teplo_pv_kr()
clear all
close all
disp('!!!!!!!!НАЧАЛО РЕШЕНИЯ (teplo_pv_kr)!!!!!!!!')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% параметры задачи:
d0=0.05; %(диаметр матрицы) % можно менять
dst=0.035; %(диаметр стержня) % можно менять
Gt=260*10^6;
NNN=50; % номер штамповки
Ts=20+60.*(1-exp(-0.015.*NNN)); % расчётная температура матрицы (пуансон не касается
очага деформации)
T0=20; c=500; ro=7800; % можно менять %(температура штампа) % можно менять
ug=45; %(угол на матрице) % можно менять
% параметры кривошипа:
n=15; R=0.84; L=4; % можно менять
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
TD=[100 0.266; 250 0.181; 500 0.138; 750 0.112; 1000 0.091; 1500 0.077;

```

```

2000 0.064; 2500 0.056; 3000 0.049; 4000 0.039; 5000 0.028; 6000 0.023;
7000 0.017; 8000 0.015; 10^4 0.014; 10^5 0.012; 10^6 0.01];
TDX=(TD(:,1))./0.0001;
TDY=((TD(:,2))./1000);
x0=[1 0 -0.5 0.001 1];
ngr=[-inf -inf -inf -inf -inf];
wgr=[inf inf inf inf inf];
opt=optimset;
opt.MaxFunEvals=10000;
opt.TolFun=10e-10;
opt.MaxIter=5000;
alk=lsqcurvefit(@mod_e, x0, TDX, TDY, ngr, wgr, opt);
%%%%%% РЕШЕНИЕ %%%%%%%%%%
ugr=pi*(ug/180);
rst=dst./2; % радиус стержня
r0=d0./2; % радиус матрицы
F0=((d0./2).^2).*pi; % площадь матрицы
Fst=((dst./2).^2).*pi; % поперечная площадь выдавливаемого стержня
Vd0=(1./3)*(F0.*(r0./tan(ugr))-Fst.*(rst./tan(ugr))); %объем очага деформации
hmz=Vd0./F0; % выстоа "заготовки" равной объему очага деформации
Rb=r0./sin(ugr); % образующая большого конуса
r=rst./sin(ugr); % образующая малого конуса
Fk=pi.*r0.*Rb-pi.*rst.*r; % контактная поверхность
Esp=log(F0/Fst); % деформация
disp('время цикла')
tcykl=(60/n)/2;
disp(tcykl)
Davlenie=2*Gt*F0*Esp/F0; % давление
%% время процесса (подставлять по решению)
tk=[ (30*(pi + acos((L + (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)
(30*(pi - acos((L + (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)
(30*(pi + acos((L - (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)
(30*(pi - acos((L - (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)];
%disp(tk)
ntpr=tk(4);
disp('высота при найденном времени')
disp(2*R-R*(1-cos(pi*(n/30)*(ntpr)))+(R/L)*(1-cos(2*pi*(n/30)*(ntpr)))/4))
%% функции
t0=[ntpr tcykl];
prir=1.0000e-010;
tos1=odeset('RelTol',prir);
[t, T]=ode45(@res1, t0, T0, tos1);
function y=res1(t,T) % ситема диф. ур.
y=(pi.*Esp.*F0.*Gt.*R.*n.*(2.*L.*sin((pi.*n.*t)/30) +...
R.*sin((pi.*n.*t)/15))./(30.*L.*Vd0.*c.*ro) -...
(Fk.*(1./(mod_e(alk,Davlenie))).*(T - Ts))./(Vd0.*c.*ro);
end
function y=dTf1(t) % приращение тепла от работы деформации
y=(pi.*Esp.*F0.*Gt.*R.*n.*(sin((pi.*n.*t)/30) +
(R.*sin((pi.*n.*t)/15))./(2.*L))./(15.*Vd0.*c.*ro);
end

```

```

function y=dTf2(t,T) % приращение тепла от трения
    y=(Fk.*(1./(mod_e(alk,Davlenie))).*(T - Ts))./(Vd0.*c.*ro);
end
function y=mod_e(a,x) % аппроксимация для опред al
    y=(a(5).*x.^a(1)+a(2)).^a(3)+a(4);
end
figure(1)
plot(t,T)
title('Temperature of the workpiece','fontsize', 15)
figure(2)
plot(t,dTf2(t,T),t,dTf1(t))
title('Increments of the function','fontsize', 15)
disp('высота "заготовки" равной объёму очага деформации')
disp(hmz)
disp('время процесса')
disp(tcykl-ntpr)
disp('деформация')
disp(Esp)
disp('Температура заготовки к окончанию вытекания')
disp(T(end))
disp('!!!!!!!!!!!!КОНЕЦ РЕШЕНИЯ!!!!!!!!!!!!')
end

```

Расчет температуры в критической точке при прямом выдавливании цилиндра на кривошипном прессе.

```

function teplo_pv_kr_point()
clear all
close all
disp('!!!!!!!!НАЧАЛО РЕШЕНИЯ (teplo_pv_kr_point)!!!!!!!!')
%%%%%%%%%%
%
% параметры задачи:
d0=0.05; Gt=400*10^6; %(температура штампа) % можно менять
dst=0.035; %(диаметр стержня) % можно менять
ug=45; %(угол на матрице) % можно менять
T0=20; c=500; ro=7800; % можно менять
% параметры кривошипа:
n=15; R=0.84; L=4; % можно менять
mu=0.05; % (коэффициент трения) можно менять
% Величины в формуле Лыкова:
Ke=1; lamb=50;
X=0.02; % глубина слоя
%%%%%%%%%% РЕШЕНИЕ %%%%%%%%%%%
% таблица для ierfc
ietabl=[0, 0.5642; 0.01, 0.5542; 0.02, 0.544; 0.03, 0.535; 0.04,0.5251; 0.05, 0.5156;
0.08,0.4878;...
0.1, 0.4698; 0.13, 0.4437; 0.16, 0.4156; 0.19, 0.3944; 0.23, 0.3638; 0.27, 0.3348; 0.3,
0.3142;...

```

```

0.35, 0.2819; 0.4, 0.2521; 0.45, 0.2247; 0.5, 0.1996; 0.56, 0.1724; 0.62, 0.1482; 0.68,
0.1267;...
0.74, 0.1077; 0.8, 0.09212; 0.9, 0.0682; 1, 0.0503; 1.1, 0.0365; 1.3, 0.0183; 1.5, 0.0086; 2,
0.001];
iepol=polyfit(ietabl(:,1),ietabl(:,2),6);
ieval=polyval(iepol,ietabl(:,1));
a=lamb./(c.*ro); % температуропроводность Лыков
ugr=pi*(ug/180);
rst=dst./2; % радиус стержня
r0=d0./2; % радиус матрицы
F0=((d0./2).^2).*pi; % площадь матрицы
Fst=((dst./2).^2).*pi; % поперечная площадь выдавливаемого стержня
Vd0=(1./3)*(F0.*(r0./tan(ugr))-Fst.*(rst./tan(ugr))); %объем очага деформации
%disp('высота "заготовки" "равной" объему очага деформации')
hmz=Vd0./F0; % высота "заготовки" равной объему очага деформации
%disp(hmz)
Rb=r0./sin(ugr); % образующая большого конуса
r=rst./sin(ugr); % образующая малого конуса
Fk=pi.*r0.*Rb-pi.*rst.*r; % контактная поверхность
Esp=log(F0/Fst); % деформация
Dav1=2.*Gt.*F0.*Esp./F0; % давление
disp('время цикла')
tcykl=(60/n)/2;
disp(tcykl)
%% время процесса (подставлять по решению)
tk=[ (30*(pi + acos((L + (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)
(30*(pi - acos((L + (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)
(30*(pi + acos((L - (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)
(30*(pi - acos((L - (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)];
%disp(tk)
ntpr=tk(4);
disp('высота при найденном времени')
disp(2*R-R*(1-cos(pi*(n/30)*(ntpr)))+(R/L)*(1-cos(2*pi*(n/30)*(ntpr)))/4)
%% Вариант интегрирования по функции
Qsr=(quadl(@tpot,ntpr,tcykl))./(tcykl-ntpr);
disp('высота "заготовки" равной объему очага деформации')
disp(hmz)
disp('время процесса')
disp(tcykl-ntpr)
disp('значение ierfc')
ierfc=polyval(iepol,0.5*X*sqrt(a*(tcykl-ntpr)));
disp(ierfc)
disp('деформация')
disp(Esp)
disp('температура критической точки')
disp(T0+dT(tcykl-ntpr))
t=ntpr:0.0001:tcykl;
figure(1)
plot(t,skr(t))
title('Movement','fontsize', 15)
figure(2)

```

```

plot(t,vkr(t))
title('Velocity','fontsize', 15)
figure(3)
plot(t,vpoint(t))
title('Velocity of point','fontsize', 15)
figure(4)
plot(t,tpot(t))
title('Тепловой поток','fontsize', 15)
disp('!!!!!!!!!!!!КОНЕЦ РЕШЕНИЯ!!!!!!!!!!!!')
%% функции
function y=tpot(t) % тепловой поток
    y=(pi.*Dav1.*R.*Rb.^2.*mu.*n.*cos(ugr).*(sin((pi.*n.*t)/30) +...
        (R.*sin((pi.*n.*t)/15))./(2.*L)))./(30.*(Rb -...
        ((Rb - r).*(ntpr - t))./(ntpr - tcykl)).^2);
end
function y=vkr(t) % скорость кривошипа
    y=(pi.*R.*n.*(sin((pi.*n.*t)/30) + (R.*sin((pi.*n.*t)/15))./(2.*L)))./30;
end
function y=vpoint(t) % скорость критической точки
    y=(pi.*R.*Rb.^2.*n.*cos(ugr).*(sin((pi.*n.*t)/30) +...
        (R.*sin((pi.*n.*t)/15))./(2.*L)))./(30.*(Rb -...
        ((Rb - r).*(ntpr - t))./(ntpr - tcykl)).^2);
end
function y=dT(t) % формула Лыкова
    y=(Ke./(1+Ke)).*(2.*Qsr./lamb).*sqrt(a.*(t)).*ierfc;
end
function y=skr(t) % перемещение кривошипа
    y=2.*R-R.*(1-cos(pi.*(n./30).*(t)))+(R./L).*(1-cos(2.*pi.*(n./30).*(t)))./4);
end
end
end

```

Расчет температуры от деформации при обратном выдавливании цилиндра на гидравлическом прессе.

```

function teplo_ov_hyd()
clear all
close all
disp('!!!!!!!!!!!!НАЧАЛО РЕШЕНИЯ (teplo_ov_hyd)!!!!!!!!!!!!')
%%%%%%%%%%
%
% параметры задачи:
d0=0.046; % можно менять (внешний диаметр выдавливаемой заготовки)
dst=0.034; %(диаметр пуансона) % можно менять
Gt=260*10^6; Ts=59.5; %(температура штампа) % можно менять
T0=20; c=500; go=7800; % можно менять
ug=75; %(угол на пуансоне согласно схеме) % можно менять
%Скорость
v=0.014; % можно менять
mu=0.05; % (коэффициент трения) можно менять
% Величины в формуле Лыкова:
Ke=1; lamb=50;

```

```

X=0.02; % глубина слоя
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% РЕШЕНИЕ %%%%%%%%%
% таблица для ierfc
tet=0;
ietabl=[0, 0.5642; 0.01, 0.5542; 0.02, 0.544; 0.03, 0.535; 0.04,0.5251; 0.05, 0.5156;
0.08,0.4878;...
    0.1, 0.4698; 0.13, 0.4437; 0.16, 0.4156; 0.19, 0.3944; 0.23, 0.3638; 0.27, 0.3348; 0.3,
0.3142;...
    0.35, 0.2819; 0.4, 0.2521; 0.45, 0.2247; 0.5, 0.1996; 0.56, 0.1724; 0.62, 0.1482; 0.68,
0.1267;...
    0.74, 0.1077; 0.8, 0.09212; 0.9, 0.0682; 1, 0.0503; 1.1, 0.0365; 1.3, 0.0183; 1.5, 0.0086; 2,
0.001];
iepol=polyfit(ietabl(:,1),ietabl(:,2),6);
ieval=polyval(iepol,ietabl(:,1));
ierfc=polyval(iepol,X);
disp('значение ierfc')
disp(ierfc)
a=lamb./(c.*ro); % теплопроводность Лыков
ugr=pi*(ug/180);
rst=dst./2; % радиус пуансона
r0=d0./2; % радиус матрицы
F0=((d0./2).^2).*pi; % площадь заготовки
Fst=((dst./2).^2).*pi; % поперечная площадь пуансона
Esp=log(F0/(F0-Fst)); % деформация
r2=r0/sin(ugr); % образующая большого конуса (r2 по схеме)
r11=rst/sin(ugr); % образующая малого конуса
r1=r2-r11; % (r1 по схеме)
Fk=pi*r11*rst+2*pi*r0*(r2-r1); % контактная поверхность (в '2*pi*r0*r11' r11 - высота ци-
линдр поверхн.)
%% расчёт объёма очага деформации
TD=[100 0.266; 250 0.181; 500 0.138; 750 0.112; 1000 0.091; 1500 0.077;
    2000 0.064; 2500 0.056; 3000 0.049; 4000 0.039; 5000 0.028; 6000 0.023;
    7000 0.017; 8000 0.015; 10^4 0.014; 10^5 0.012; 10^6 0.01];
TDX=(TD(:,1))./0.0001;
TDY=((TD(:,2))./1000);
x0=[1 0 -0.5 0.001 1];
ngr=[-inf -inf -inf -inf -inf];
wgr=[inf inf inf inf inf];
opt=optimset;
opt.MaxFunEvals=10000;
opt.TolFun=10e-10;
opt.MaxIter=5000;
alk=lsqcurvefit(@mod_e, x0, TDX, TDY, ngr, wgr, opt);
Davlenie=2.6*Gt*F0*Esp/Fst; % давление
km=r11*cos(ugr); % катет малый
kb=r2*cos(ugr); % катет большой
y1=r11:0.0001:r2-(kb-km); % пределы окружности r1
y2=0:0.0001:r2-kb; % пределы окружности r2
y3=r2-kb:0.0001:r2-(kb-km); % пределы прямой
figure(1)

```

```

plot(y1,uor1(y1),y2,uor2(y2),y3,up(y3))
disp('объём очага')
Vd0=pi.*(quadl(@uor1k,r11,r2-(kb-km)))+(pi.*r0.^2).*r11-...
pi.*(quadl(@uor2k,0,r2-kb))-pi.*(quadl(@upk,r2-kb,r2-(kb-km))); %объём очага деформации
disp(Vd0)
function x=uor1(y) % уравнение окружности r1
x=r0 - (r1 + r2 - y).^(1./2).*(r1 - r2 + y).^(1/2);
end
function x=uor2(y) % уравнение окружности r2
x=r0 - (r2 + r2 - y).^(1./2).*(r2 - r2 + y).^(1/2);
end
function x=up(y) % уравнение прямой образующей конуса
x=(kb - r2 + y).*tan(ugr);
end
function x=uor1k(y) % уравнение окружности r1
x=(r0 - (r1 + r2 - y).^(1./2).*(r1 - r2 + y).^(1/2)).^2;
end
function x=uor2k(y) % уравнение окружности r2
x=(r0 - (r2 + r2 - y).^(1./2).*(r2 - r2 + y).^(1/2)).^2;
end
function x=upk(y) % уравнение прямой образующей конуса
x=((kb - r2 + y).*tan(ugr)).^2;
end
%% окончные расчёта объёма очага деформации
hmz=Vd0./Fst; % высота "заготовки" равной объёму очага деформации
disp('время процесса')
tk=hmz/v;
disp(tk)
%% функции
t0=[0.001 tk];
prir=1.0000e-010;
tos1=odeset('RelTol',prir);
[t, T]=ode45(@res1, t0, T0, tos1);
function y=res1(t,T) % ситема диф. ур.
y=(Fk.*Ts.*(1./(mod_e(alk,Davlenie))) - Fk.*T.*(1./(mod_e(alk,Davlenie)))) +
2.6.*Esp.*F0.*Gt.*v)/(Vd0.*c.*ro);
end
function y=vkp(ro) % скорость критической точки (подинтегральная)
y=-((r2.*v.*cos(tet).*(r0 + r2.*sin(tet)))/(ro.*(r0 + ro.*sin(tet)));
end
function y=dTf1(t) % приращение тепла от работы деформации
y=(2.6.*Esp.*F0.*Gt.*v)/(Vd0.*c.*ro);
end
function y=dTf2(t,T) % приращение тепла от трения
y=(Fk.*(1./(mod_e(alk,Davlenie))).*(T - Ts))/(Vd0.*c.*ro);
end
function y=mod_e(a,x) % аппроксимация для опред al
y=(a(5).*x.^a(1)+a(2)).^a(3)+a(4);
end
figure(2)

```

```

plot(t,T)
title('Temperature of the workpiece','fontsize', 15)
figure(3)
plot(t,dTf2(t,T),t,dTf1(t))
title('Increments of the function','fontsize', 15)
disp('деформация')
disp(Esp)
disp('Температура заготовки к окончанию вытекания')
disp(T(end))
disp('!!!!!!!!!!!!КОНЕЦ РЕШЕНИЯ!!!!!!!!!!!!')
end

```

Расчет температуры в критической точке при обратном выдавливании цилиндра на гидравлическом прессе.

```

function teplo_ov_hyd_point()
clear all
close all
disp('!!!!!!!!НАЧАЛО РЕШЕНИЯ (teplo_ov_hyd_point)!!!!!!!!')
%%%%%%%%%%
%
% параметры задачи:
d0=0.05; % можно менять (внешний диаметр выдавливаемой заготовки)
dst=0.035; %(диаметр пуансона) % можно менять
Gt=400*10^6; % можно менять
ug=75; %(угол на пуансоне согласно схеме) % можно менять
T0=20; c=500; ro=7800; % можно менять
%Скорость
v=0.01; % можно менять
mu=0.05; % (коэффициент трения) можно менять
% Величины в формуле Лыкова:
Ke=1; lamb=50;
X=0.02; % глубина слоя
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%% РЕШЕНИЕ %%%%%%%%%%%
% таблица для ierfc
tet=pi*(ug/180);
ietabl=[0, 0.5642; 0.01, 0.5542; 0.02, 0.544; 0.03, 0.535; 0.04,0.5251; 0.05, 0.5156;
0.08,0.4878;...
0.1, 0.4698; 0.13, 0.4437; 0.16, 0.4156; 0.19, 0.3944; 0.23, 0.3638; 0.27, 0.3348; 0.3,
0.3142;...
0.35, 0.2819; 0.4, 0.2521; 0.45, 0.2247; 0.5, 0.1996; 0.56, 0.1724; 0.62, 0.1482; 0.68,
0.1267;...
0.74, 0.1077; 0.8, 0.09212; 0.9, 0.0682; 1, 0.0503; 1.1, 0.0365; 1.3, 0.0183; 1.5, 0.0086; 2,
0.001];
iepol=polyfit(ietabl(:,1),ietabl(:,2),6);
ieval=polyval(iepol,ietabl(:,1));
a=lamb./(c.*ro); % температуропроводность Лыков
ugr=pi*(ug/180);
rst=dst./2; % радиус пуансона
r0=d0./2; % радиус матрицы

```

```

F0=((d0./2).^2).*pi; % площадь заготовки
Fst=((dst./2).^2).*pi; % поперечная площадь пуансона
Esp=log(F0/(F0-Fst)); % деформация
r2=r0/sin(ugr); % образующая большого конуса (r2 по схеме)
r11=rst/sin(ugr); % образующая малого конуса
r1=r2-r11; % (r1 по схеме)
Fk=pi*r11*rst+2*pi*r0*r11; % контактная поверхность (в '2*pi*r0*r11' r11 - высота ци-
линдр поверхн.)
%% расчёт объёма очага деформации
km=r11*cos(ugr); % катет малый
kb=r2*cos(ugr); % катет большой
y1=r11:0.0001:r2-(kb-km); % пределы окружности r1
y2=0:0.0001:r2-kb; % пределы окружности r2
y3=r2-kb:0.0001:r2-(kb-km); % пределы прямой
figure(1)
plot(y1,uor1(y1),y2,uor2(y2),y3,up(y3))
disp('объём очага')
Vd0=pi.*(quadr(@uor1k,r11,r2-(kb-km)))+(pi.*r0.^2).*r11-...
pi.*(quadr(@uor2k,0,r2-kb))-pi.*(quadr(@upk,r2-kb,r2-(kb-km))); %объём очага деформа-
ции
disp(Vd0)
function x=uor1(y) % уравнение окружности r1
x=r0 - (r1 + r2 - y).^(1./2).*(r1 - r2 + y).^(1/2);
end
function x=uor2(y) % уравнение окружности r2
x=r0 - (r2 + r2 - y).^(1./2).*(r2 - r2 + y).^(1/2);
end
function x=up(y) % уравнение прямой образующей конуса
x=(kb - r2 + y).*tan(ugr);
end
function x=uor1k(y) % уравнение окружности r1
x=(r0 - (r1 + r2 - y).^(1./2).*(r1 - r2 + y).^(1/2)).^2;
end
function x=uor2k(y) % уравнение окружности r2
x=(r0 - (r2 + r2 - y).^(1./2).*(r2 - r2 + y).^(1/2)).^2;
end
function x=upk(y) % уравнение прямой образующей конуса
x=((kb - r2 + y).*tan(ugr)).^2;
end
%% окончные расчёта объёма очага деформации
%disp('выстоа "заготовки" равной объёму очага деформации')
hmz=Vd0./Fst; % выстоа "заготовки" равной объёму очага деформации
%disp(hmz)
Dav1=2.6*Gt*F0*Esp/Fst; % давление
%disp('функция скорости критической точки (подитегральная)')
%vks=sym('-v*r2*cos(tet)*(r0+r2*sin(tet))/(ro*(r0+ro*sin(tet)))');
%disp(vks)
disp('время процесса')
tk=hmz/v;
%tk=(r2-r1)./((quadr(@vkp,r2,r1))./(r2-r1));
disp(tk)

```

```

disp('значение ierfc')
ierfc=polyval(iepol,0.5*X*sqrt(a*(tk)));
disp(ierfc)
%disp('функция теплового потока')
%Qt=sym('mu*Davl*vks');
%Qsrf=simple(subs(Qt,'vks',vks));
%disp(Qsrf)
%disp('средний тепловой поток')
Qsr=(quadl(@tpot,r2,r1))./(r2-r1);
%disp(Qsr)
disp('деформация')
disp(Esp)
disp('температура критической точки')
disp(T0+dT(tk))
%disp('прирост температуры в точке')
%disp(dT(tk))
figure(2)
rog=r2:-0.0001:r1;
plot(rog,-vpoint(rog))
title('Velocity of point','fontsize', 15)
disp('!!!!!!!!!!!!КОНЕЦ РЕШЕНИЯ!!!!!!!!!!!!')
%% функции
function y=tpot(ro) % тепловой поток
    y=-(Dav1.*mu.*r2.*v.*cos(tet).*(r0 + r2*sin(tet)))./(ro.*(r0 + ro.*sin(tet)));
end
function y=vpoint(ro) % скорость критической точки
    y=v.*r2.*cos(tet).*(r0+r2.*sin(tet))./(ro.*(r0+ro.*sin(tet)));
end
function y=dT(t) % формула Лыкова
    y=(Ke./(1+Ke)).*(2.*Qsr./lamb).*sqrt(a.*t).*ierfc;
end
end

```

Расчет температуры от деформации при обратном выдавливании цилиндра на кривошипном прессе.

```

function teplo_ov_kr()
clear all
close all
disp('!!!!!!!!НАЧАЛО РЕШЕНИЯ (teplo_ov_kr)!!!!!!!!')
%%
% параметры задачи:
d0=0.05; % можно менять (внешний диаметр выдавливаемой заготовки)
dst=0.035; %(диаметр пуансона) % можно менять
Gt=230*10^6; Ts=75.5; %(температура штампа) % можно менять
T0=20; c=500; ro=7800; % можно менять
ug=75; %(угол на пуансоне согласно схеме) % можно менять
% параметры кривошипа:
n=15; R=0.84; L=4; % можно менять
mu=0.05; % (коэффициент трения) можно менять

```

```

% Величины в формуле Лыкова:
Ke=1; lamb=50;
X=0.02; % глубина слоя
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% РЕШЕНИЕ %%%%%%%%%
% таблица для ierfc
tet=0;
ietabl=[0, 0.5642; 0.01, 0.5542; 0.02, 0.544; 0.03, 0.535; 0.04,0.5251; 0.05, 0.5156;
0.08,0.4878;...
0.1, 0.4698; 0.13, 0.4437; 0.16, 0.4156; 0.19, 0.3944; 0.23, 0.3638; 0.27, 0.3348; 0.3,
0.3142;...
0.35, 0.2819; 0.4, 0.2521; 0.45, 0.2247; 0.5, 0.1996; 0.56, 0.1724; 0.62, 0.1482; 0.68,
0.1267;...
0.74, 0.1077; 0.8, 0.09212; 0.9, 0.0682; 1, 0.0503; 1.1, 0.0365; 1.3, 0.0183; 1.5, 0.0086; 2,
0.001];
iepol=polyfit(ietabl(:,1),ietabl(:,2),6);
ieval=polyval(iepol,ietabl(:,1));
ierfc=polyval(iepol,X);
disp('значение ierfc')
disp(ierfc)
a=lamb./(c.*ro); % температуропроводность Лыков
ugr=pi*(ug/180);
rst=dst./2; % радиус пуансона
r0=d0./2; % радиус матрицы
F0=((d0./2).^2).*pi; % площадь заготовки
Fst=((dst./2).^2).*pi; % поперечная площадь пуансона
Esp=log(F0/(F0-Fst)); % деформация
r2=r0/sin(ugr); % образующая большого конуса (r2 по схеме)
r11=rst/sin(ugr); % образующая малого конуса
r1=r2-r11; % (r1 по схеме)
Fk=pi*r11*rst+2*pi*r0*r11; % контактная поверхность (в '2*pi*r0*r11' r11 - высота ци-
линдр поверхн.)
%% расчёт объёма очага деформации
km=r11*cos(ugr); % катет малый
kb=r2*cos(ugr); % катет большой
y1=r11:0.0001:r2-(kb-km); % пределы окружности r1
y2=0:0.0001:r2-kb; % пределы окружности r2
y3=r2-kb:0.0001:r2-(kb-km); % пределы прямой
figure(1)
plot(y1,uor1(y1),y2,uor2(y2),y3,up(y3))
disp('объём очага')
Vd0=pi.*(quadr(@uor1k,r11,r2-(kb-km)))+(pi.*r0.^2).*r11-...
pi.*(quadr(@uor2k,0,r2-kb))-pi.*(quadr(@upk,r2-kb,r2-(kb-km))); %объём очага деформа-
ции
disp(Vd0)
function x=uor1(y) % уравнение окружности r1
x=r0 - (r1 + r2 - y).^(1./2).*(r1 - r2 + y).^(1/2);
end
function x=uor2(y) % уравнение окружности r2
x=r0 - (r2 + r2 - y).^(1./2).*(r2 - r2 + y).^(1/2);
end

```

```

function x=up(y) % уравнение прямой образующей конуса
    x=(kb - r2 + y).*tan(ugr);
end
function x=uor1k(y) % уравнение окружности r1
    x=(r0 - (r1 + r2 - y).^(1./2)).*(r1 - r2 + y).^(1./2)).^2;
end
function x=uor2k(y) % уравнение окружности r2
    x=(r0 - (r2 + r2 - y).^(1./2)).*(r2 - r2 + y).^(1./2)).^2;
end
function x=upk(y) % уравнение прямой образующей конуса
    x=((kb - r2 + y).*tan(ugr)).^2;
end
%% окончание расчёта объёма очага деформации
TD=[100 0.266; 250 0.181; 500 0.138; 750 0.112; 1000 0.091; 1500 0.077;
    2000 0.064; 2500 0.056; 3000 0.049; 4000 0.039; 5000 0.028; 6000 0.023;
    7000 0.017; 8000 0.015; 10^4 0.014; 10^5 0.012; 10^6 0.01];
TDX=(TD(:,1))./0.0001;
TDY=((TD(:,2))./1000);
x0=[1 0 -0.5 0.001 1];
ngr=[-inf -inf -inf -inf -inf];
wgr=[inf inf inf inf inf];
opt=optimset;
opt.MaxFunEvals=10000;
opt.TolFun=10e-10;
opt.MaxIter=5000;
alk=lsqcurvefit(@mod_e, x0, TDX, TDY, ngr, wgr, opt);
Davlenie=2.6*Gt*F0*Esp/Fst; % давление
%disp('высота "заготовки" равной объёму очага деформации')
hmz=Vd0./Fst; % высота "заготовки" равной объёму очага деформации
%disp(hmz)
disp('время цикла')
tcykl=(60/n)/2;
disp(tcykl)
%% время процесса (подставлять по решению)
tk=[ (30*(pi + acos((L + (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)
    (30*(pi - acos((L + (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)
    (30*(pi + acos((L - (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)
    (30*(pi - acos((L - (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)];
%disp(tk)
ntpr=tk(4);
disp('высота при найденном времени')
disp(2*R-R*(1-cos(pi*(n/30)*(tcykl+tk(4)))+(R/L)*(1-cos(2*pi*(n/30)*(tcykl+tk(4))))/4))
disp('высота "заготовки" равной объёму очага деформации')
disp(hmz)
%% функции
t0=[ntpr tcykl];
prir=1.0000e-010;
tos1=odeset('RelTol',prir);
[t, T]=ode45(@res1, t0, T0, tos1);
function y=res1(t,T) % система диф. ур.

```



```

X=0.02; % глубина слоя
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% РЕШЕНИЕ %%%%%%%%%
% таблица для ierfc
tet=pi*(ug/180);
ietabl=[0, 0.5642; 0.01, 0.5542; 0.02, 0.544; 0.03, 0.535; 0.04,0.5251; 0.05, 0.5156;
0.08,0.4878;...
    0.1, 0.4698; 0.13, 0.4437; 0.16, 0.4156; 0.19, 0.3944; 0.23, 0.3638; 0.27, 0.3348; 0.3,
0.3142;...
    0.35, 0.2819; 0.4, 0.2521; 0.45, 0.2247; 0.5, 0.1996; 0.56, 0.1724; 0.62, 0.1482; 0.68,
0.1267;...
    0.74, 0.1077; 0.8, 0.09212; 0.9, 0.0682; 1, 0.0503; 1.1, 0.0365; 1.3, 0.0183; 1.5, 0.0086; 2,
0.001];
iepol=polyfit(ietabl(:,1),ietabl(:,2),6);
ieval=polyval(iepol,ietabl(:,1));
a=lamb./(c.*ro); % температуропроводность Лыков
ugr=pi*(ug/180);
rst=dst./2; % радиус пуансона
r0=d0./2; % радиус матрицы
F0=((d0./2).^2).*pi; % площадь заготовки
Fst=((dst./2).^2).*pi; % поперечная площадь пуансона
Esp=log(F0/(F0-Fst)); % деформация
r2=r0/sin(ugr); % образующая большого конуса (r2 по схеме)
r11=rst/sin(ugr); % образующая малого конуса
r1=r2-r11; % (r1 по схеме)
Fk=pi*r11*rst+2*pi*r0*r11; % контактная поверхность (в '2*pi*r0*r11' r11 - высота ци-
линдр поверхн.)
%% расчёт объёма очага деформации
km=r11*cos(ugr); % катет малый
kb=r2*cos(ugr); % катет большой
y1=r11:0.0001:r2-(kb-km); % пределы окружности r1
y2=0:0.0001:r2-kb; % пределы окружности r2
y3=r2-kb:0.0001:r2-(kb-km); % пределы прямой
figure(1)
plot(y1,uor1(y1),y2,uor2(y2),y3,up(y3))
disp('объём очага')
Vd0=pi.*(quadl(@uor1k,r11,r2-(kb-km)))+(pi.*r0.^2).*r11-...
pi.*(quadl(@uor2k,0,r2-kb))-pi.*(quadl(@upk,r2-kb,r2-(kb-km))); %объём очага деформа-
ции
disp(Vd0)
function x=uor1(y) % уравнение окружности r1
    x=r0 - (r1 + r2 - y).^(1./2).*(r1 - r2 + y).^(1/2);
end
function x=uor2(y) % уравнение окружности r2
    x=r0 - (r2 + r2 - y).^(1./2).*(r2 - r2 + y).^(1/2);
end
function x=up(y) % уравнение прямой образующей конуса
    x=(kb - r2 + y).*tan(ugr);
end
function x=uor1k(y) % уравнение окружности r1
    x=(r0 - (r1 + r2 - y).^(1./2).*(r1 - r2 + y).^(1/2)).^2;

```

```

end
function x=uor2k(y) % уравнение окружности r2
    x=(r0 - (r2 + r2 - y).^(1./2)).*(r2 - r2 + y).^(1./2)).^2;
end
function x=upk(y) % уравнение прямой образующей конуса
    x=((kb - r2 + y).*tan(ugr)).^2;
end
%% окончные расчёта объёма очага деформации
%disp('высота "заготовки" равной объёму очага деформации')
hmz=Vd0./Fst; % высота "заготовки" равной объёму очага деформации
%disp(hmz)
DavI=2.6*Gt*F0*Esp/Fst; % давление
disp('время цикла')
tcykl=(60/n)/2;
disp(tcykl)
%% время процесса (подставлять по решению)
tk=[ (30*(pi + acos((L + (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)
    (30*(pi - acos((L + (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)
    (30*(pi + acos((L - (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)
    (30*(pi - acos((L - (L^2 - 2*L*R + 2*hmz*L + R^2)^(1/2))/R)))/(pi*n)];
%disp(tk)
ntpr=tk(4);
disp('значение ierfc')
ierfc=polyval(iepol,0.5*X*sqrt(a*(tcykl-ntpr)));
disp(ierfc)
disp('высота при найденном времени')
disp(2*R-R*(1-cos(pi*(n/30)*(ntpr)))+(R/L)*(1-cos(2*pi*(n/30)*(ntpr)))/4)
disp('высота "заготовки" равной объёму очага деформации')
disp(hmz)
%disp('функция теплового потока')
%Qt=sym('mu*DavI*vks');
%Qsrf=simple(subs(Qt,'vks',vks));
%disp(Qsrf)
%disp('средний тепловой поток')
Qsr=(quadl(@tpot,ntpr,tcykl))./(tcykl-ntpr);
%disp(Qsr)
disp('время процесса')
disp(tcykl-ntpr)
disp('деформация')
disp(Esp)
disp('температура критической точки')
disp(T0+dT(tcykl-ntpr))
%disp('прирост температуры в точке')
%disp(dT(tcykl-ntpr))
t=ntpr:0.0001:tcykl;
figure(2)
plot(t,skr(t))
title('Movement','fontsize', 15)
figure(3)
plot(t,vkr(t))
title('Velocity','fontsize', 15)

```

```

figure(4)
plot(t,vpoint(t))
title('Velocity of point','fontsize', 15)
disp('!!!!!!!!!!!!!!КОНЕЦ РЕШЕНИЯ!!!!!!!!!!!!!!')
%% функции
function y=tpot(t) % тепловой поток
    y=(pi.*Dav1.*R.*mu.*n.*r2.*cos(tet).*(r0 + r2.*sin(tet)).*(sin((pi.*n.*t)/30) +...
        (R.*sin((pi.*n.*t)/15))./(2.*L)))/(30.*(r2 - (r11.*(ntpr - t))./(ntpr -...
        tcykl)).*(r0 + sin(tet).*(r2 - (r11.*(ntpr - t))./(ntpr - tcykl))));
end
function y=vpoint(t) % скорость критической точки
    y=(pi.*R.*n.*r2.*cos(tet).*(r0 + r2.*sin(tet)).*(sin((pi.*n.*t)/30) +...
        (R.*sin((pi.*n.*t)/15))./(2.*L)))/(30.*(r2 - (r11.*(ntpr - t))./(ntpr -...
        tcykl)).*(r0 + sin(tet).*(r2 - (r11.*(ntpr - t))./(ntpr - tcykl))));
end
function y=skr(t) % перемещение кривошипа
    y=2.*R-R.*(1-cos(pi.*(n./30).*(t)))+(R./L).*(1-cos(2.*pi.*(n./30).*(t)))/4);
end
function y=vkr(t) % скорость кривошипа
    y=pi.*(n./30).*R.*(sin(pi.*(n./30).*(t)))+(R./L).*(sin(2.*pi.*(n./30).*(t))/2);
end
function y=dT(t) % формула Лыкова
    y=(Ke./(1+Ke)).*(2.*Qsr./lamb).*sqrt(a.*(t)).*ierfc;
end
end

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Результаты расчетов изменения температуры при осадке для стали
с пределом текучести $\sigma_T=400$ МПа

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического пресса $v=1$ мм/с:

$$24,73+23,51-20=28,24^\circ\text{C}.$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического пресса $v=10$ мм/с:

$$68,14+31,11-20=79,25^\circ\text{C}.$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для кривошипного пресса:

$$248,51+79,34-20=307,85^\circ\text{C}.$$

Результаты расчетов изменения температуры при осадке для стали с пределом текучести
 $\sigma_T=260$ МПа

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического пресса $v=1$ мм/с:

$$23,45+22,28-20=25,73^\circ\text{C}.$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического пресса $v=10$ мм/с:

$$54,96+27,22-20=62,18^\circ\text{C}.$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для кривошипного пресса:

$$171,95+58,57-20=210,52^\circ\text{C}.$$

Результаты расчетов изменения температуры при осадке для стали с пределом текучести
 $\sigma_T=230$ МПа

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического пресса $v=1$ мм/с:

$$23,16+22,02-20=25,18^\circ\text{C}.$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического пресса $v=10$ мм/с:

$$52+26,39-20=58,39^\circ\text{C}.$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для кривошипного пресса:

$$155,3+54,12-20=189,42^\circ\text{C}.$$

Результаты расчетов изменения температуры при прямом выдавливании
для стали $\sigma_T=400$ МПа

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического пресса:

$$104,49+28,62-20=113,11^\circ\text{C}.$$

Суммы температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для кривошипного пресса:

$$149,72+39,66-20=169,38^{\circ}\text{C}.$$

Результаты расчетов изменения температуры при прямом выдавливании для стали $\sigma_T=260$

МПа

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического пресса:

$$78,03+25,6-20=83,63^{\circ}\text{C}.$$

Суммы температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для кривошипного пресса:

$$105,45+32,78-20=118,23^{\circ}\text{C}.$$

Результаты расчетов изменения температуры при прямом выдавливании для стали $\sigma_T=230$

МПа

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического пресса:

$$72,17+24,96-20=77,13^{\circ}\text{C}.$$

Суммы температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для кривошипного пресса:

$$95,88+31,3-20=107,18^{\circ}\text{C}.$$

Результаты расчетов изменения температуры при обратном выдавливании для стали

$\sigma_T=400$ МПа

Сумма повышения температуры от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического пресса:

$$64,44+52,08-20=96,52^{\circ}\text{C}.$$

Сумма повышения температуры от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для кривошипного пресса:

$$289,71+118,84-20=388,55^{\circ}\text{C}.$$

Результаты расчетов изменения температуры при обратном выдавливании для стали

$\sigma_T=260$ МПа

Сумма повышения температуры от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического пресса:

$$51,45+40,85-20=72,3^{\circ}\text{C}.$$

Сумма повышения температуры от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для кривошипного прессы:

$$199,68+84,25-20=263,93^{\circ}\text{C}.$$

Результаты расчетов изменения температуры при обратном выдавливании для стали

$$\sigma_T=230 \text{ МПа}$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического прессы:

$$48,58+38,45-20=67,03^{\circ}\text{C}.$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для кривошипного прессы:

$$180,12+79,84-20=239,96^{\circ}\text{C}.$$

Расчеты для 50-ой детали в партии

Результаты расчетов изменения температуры при осадке для стали

$$\text{с пределом текучести } \sigma_T=400 \text{ МПа}$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического прессы $v=1 \text{ мм/с}$:

$$55,73+23,51-20=59,24^{\circ}\text{C}.$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического прессы $v=10 \text{ мм/с}$:

$$99,07+31,11-20=110,18^{\circ}\text{C}.$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для кривошипного прессы:

$$256,84+79,34-20=336,18^{\circ}\text{C}.$$

Результаты расчетов изменения температуры при осадке для стали с пределом текучести

$$\sigma_T=260 \text{ МПа}$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического прессы $v=1 \text{ мм/с}$:

$$54,45+22,28-20=56,73^{\circ}\text{C}.$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического прессы $v=10 \text{ мм/с}$:

$$85,84+27,22-20=93,06^{\circ}\text{C}.$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для кривошипного прессы:

$$179,5+58,57-20=218,07^{\circ}\text{C}.$$

Результаты расчетов изменения температуры при осадке для стали с пределом текучести

$$\sigma_T=230 \text{ МПа}$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического пресса $v=1$ мм/с:

$$54,16+22,02-20=56,18\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического пресса $v=10$ мм/с:

$$82,85+26,39-20=89,24\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для кривошипного пресса:

$$162,62+54,12-20=196,74\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Результаты расчетов изменения температуры при прямом выдавливании
для стали $\sigma_T=400$ МПа

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического пресса:

$$126,77+28,62-20=135,39\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для кривошипного пресса:

$$154,99+39,66-20=174,65\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Результаты расчетов изменения температуры при прямом выдавливании для стали
 $\sigma_T=260$ МПа

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического пресса:

$$98,95+25,6-20=104,55\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для кривошипного пресса:

$$110,18+32,78-20=122,96\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Результаты расчетов изменения температуры при прямом выдавливании для стали
 $\sigma_T=230$ МПа

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического пресса:

$$92,66+24,96-20=97,62\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для кривошипного пресса:

$$100,45+31,3-20=111,75\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Результаты расчетов изменения температуры при обратном выдавливании для стали
 $\sigma_T=400$ МПа

Сумма повышения температуры от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического пресса:

$$97,93+52,08-20=130,01\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Сумма повышения температуры от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для кривошипного пресса:

$$302,26+118,84-20=401,1^{\circ}\text{C}.$$

Результаты расчетов изменения температуры при обратном выдавливании для стали
 $\sigma_T=260$ МПа

Сумма повышения температуры от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического пресса:

$$84,94+40,85-20=105,79^{\circ}\text{C}.$$

Сумма повышения температуры от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для кривошипного пресса:

$$211,41+84,25-20=275,66^{\circ}\text{C}.$$

Результаты расчетов изменения температуры при обратном выдавливании для стали
 $\sigma_T=230$ МПа

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для гидравлического пресса:

$$82,06+38,45-20=100,51^{\circ}\text{C}.$$

Сумма температур от деформации и от тепловыделения при деформационном взаимодействии на границе деталь-инструмент для кривошипного пресса:

$$191,6+118,84-20=290,44^{\circ}\text{C}.$$

(Каждый раз вычитаем 20°C , так начальная температура учитывается в расчетах).

ПРИЛОЖЕНИЕ В
ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

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

УТВЕРЖДАЮ

АКТ

№ 03-02/22
Московский Политех
(место составления)

Проректор по научной работе
д.т.н., профессор



А.А. Громов
«28» Февраль 2022 г

О внедрении в учебный процесс университета результатов диссертационной работы «Обоснование температурного диапазона работоспособности фосфатного покрытия при холодном комбинированном выдавливании стальных заготовок», выполненной соискателем кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Прасоловой Анастасией Анваровной.

Мы, нижеподписавшиеся начальник учебно-методического управления, декан факультета машиностроение, заведующий кафедрой «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы
(научно-исследовательской или диссертационной)

по теме «Обоснование температурного диапазона работоспособности фосфатного покрытия при холодном комбинированном выдавливании стальных заготовок» имеют теоретическое и практическое значение для учебного процесса и внедрены в учебный процесс Московского политехнического университета при обучении студентов направлений подготовки: 15.06.01 «Машиностроение» (профиль «Технологии и машины обработки давлением») в форме лекции по теме «Оценка теплового эффекта при холодной пластической деформации сложнопрофильных изделий».

(направления подготовки: шифры и названия)

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

Номер протокола и дата заседания кафедры, на котором рассмотрены результаты внедрения: протокол №6 от 27.01.2022.

Начало использования объекта внедрения: 28 февраля 2022 года.

Начальник учебно-методического
управления

(личная подпись)

А.Б. Максимов

Декан факультета,
внедривший разработку

(личная подпись)

Е.В. Сафонов

Заведующий кафедрой

(личная подпись)

П.А. Петров

Утверждаю
Генеральный директор
ООО "Вектор"
д.т.н., профессор
 Я.А.Соболев
« 21 » 02 2022г.
М.П.

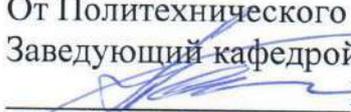
А К Т

о внедрении результатов НИР в производство

Мы, представители ООО «Вектор», настоящим актом подтверждаем, что результаты научно-исследовательской работы «Обоснование температурного диапазона работоспособности фосфатного покрытия при холодном комбинированном выдавливании стальных заготовок» выполненной в Московском Политехническом Университете, в рамках основного научного направления кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» в период с сентября 2012 г. по март 2016 г. приняты к внедрению при изготовлении деталей методом холодного комбинированного выдавливания.

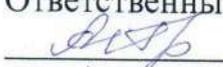
1. Вид внедрения результатов: Технологический процесс фосфатирования с омыливанием деталей изготавливаемых методом холодной объемной штамповки.
2. Область и форма внедрения: Производственный процесс серийного изготовления деталей методом холодной объемной штамповки.
3. Технический уровень НИР: Публикации в ведущих российских журналах.
4. Публикации по материалам НИР: По результатам работы опубликовано 5 статей в журналах "Заготовительные производства в машиностроении", 2015. №9; "Технология металлов", 2015. №11; Известия Тульского государственного университета, Технические науки. №10 (ч. 2), 2014; Известия МГТУ «МАМИ» № 2(16), 2013, т. 2; Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №5, 2019.
5. Эффект от внедрения:
 - а) социальный - улучшение условий труда;
 - б) годовой экономический эффект - 450,0 тыс. руб. (четыреста пятьдесят тысяч рублей 00коп.)

От Политехнического Университета:
Заведующий кафедрой

 Н.А. Петров
(подпись, Ф.И.О.)

« 18 » 02 2022 г.

Ответственный исполнитель

 А.А.Прасолова
(подпись, Ф.И.О.)

« 17 » 02 2022 г.

От предприятия:
Главный технолог

 М.Я.Соболев
(подпись, Ф.И.О.)

« 21 » 02 2022 г.