

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный технологический
университет «СТАНКИН»

На правах рукописи

Гуреева Татьяна Владимировна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО
ВЫДАВЛИВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОКОВОК С ПРОДОЛЬНЫМИ
РЕБРАМИ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор,

«Заслуженный работник высшей школы РФ»

Сосенушкин Евгений Николаевич

Москва 2021

СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1.	АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ...	14
1.1.	Технологичность объектов производства	14
1.2.	Виды ограничений при разработке технологии штамповки	17
1.3.	Поковки с продольными рёбрами и технологии их изготовления	23
1.3.1.	Поковки со спиральными рёбрами, изготавливаемые прессованием с винтовым истечением	23
1.3.2.	Выдавливание поволоков типа дисков с лопатками и крыльчаток	24
1.4.	Особенности штамповки с предварительным нагревом заготовок	25
1.4.1.	Термомеханические режимы обработки давлением алюминиевых сплавов	25
1.4.2.	Выдавливание в изотермических условиях	30
1.4.3.	Использование эффекта кратковременной ползучести	32
1.5.	Виды дефектов, возникающих при штамповке оребренных поволоков	32
1.6.	Особенности конструирования штампового инструмента для выдавливания поволоков с рёбрами	35
1.7.	Условия трения при штамповке оребренных поволоков	42
1.8.	Теория течения при сжатии пластического слоя	42
1.8.1.	Следствия из решения задачи Л. Прандтля	44
1.8.2.	Общая квазистатическая постановка краевой задачи течения пластического слоя по плоскостям	47
1.8.3.	Постановка задачи в рамках модели «идеальной жидкости»	50
1.9.	Выводы по главе 1	51
1.10.	Цель и задачи исследования	53

ГЛАВА 2.	ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПРЯМОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПОКОВКИ С ПРОДОЛЬНЫМИ РЁБРАМИ	55
2.1.	Постановка краевой задачи	55
2.2.	Расчетная схема процесса прямого выдавливания и граничные условия	56
2.2.1	Последовательность решения	59
2.3.	Деформированное состояние металла заготовки	72
2.4.	Составляющая силы деформирования участка поковки с рёбрами с учетом трения	73
2.5.	Обсуждение результатов анализа технологии прямого выдавливания оребрённой поковки по разработанной математической модели	76
2.6.	Выводы по главе 2	87
ГЛАВА 3.	РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И КОНСТРУКЦИЙ ШТАМПОВ ДЛЯ ВЫДАВЛИВАНИЯ ОРЕБРЁННЫХ ПОКОВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	91
3.1.	Технологичность деталей, подлежащих штамповке	92
3.2.	Анализ вариантов технологических процессов штамповки	95
3.3.	Формализация принятия технологических решений	98
3.4.	Способы реализации спроектированной технологии и конструкции штампов	104
3.4.1.	Выдавливание оребрённых поковок в холодном состоянии	105
3.4.2.	Выдавливание оребрённых поковок с предварительным нагревом заготовок.....	109
3.5.	Методика проектирования технологического процесса выдавливания поковок с продольными рёбрами	114

3.6.	Выводы по главе 3	116
ГЛАВА 4.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЫДАВЛИВАНИЮ ПОКОВОК С ПРОДОЛЬНЫМИ РЁБРАМИ	119
4.1.	Устранение причин возникновения брака	120
4.2.	Реализация перехода прямого выдавливания оребрения ...	122
4.3.	Исследование распределения толщины полученных выдавливанием рёбер	129
4.4.	Выводы по главе 4	130
	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ.....	132
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	137
	ПРИЛОЖЕНИЕ	148

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение высокого качества машиностроительных деталей при рационализации потребления ресурсов и энергии добиваются снижением металлоемкости на базе повышения точности поковок и минимизации припусков на механическую обработку, а также снижением сил деформирования, что влечёт за собой использование кузнечно-прессового оборудования меньшей мощности. Это является одной из главных задач производства, которая во многом решается на основе совершенствования типовых и разработки новых технологических процессов металлообработки, в том числе процессов пластического деформирования.

Актуальность темы диссертации. Применение инновационных технологий на этапе заготовительного производства позволяет производить поковки, максимально приближенные по форме к готовым деталям, снижая объем механической обработки, что обеспечивает максимальную экономию материальных ресурсов.

Объемная штамповка выдавливанием наиболее эффективна при изготовлении поковок сложной формы с развитой поверхностью, имеющих в конструкции тонкие полотна, рёбра с различным расположением толщиной от 1,5 до 5 мм, лопасти и лопатки сложного аэродинамического профиля, изготовленные вместе с диском. Во многих случаях объемная штамповка является едва ли не единственным способом изготовления поковок сложной конфигурации, таких как колеса вместе с лопатками для различных турбоагрегатов и штампованных поковок специального назначения в виде стабилизаторов, изготавливаемых либо штампосварными, в основном, из конструкционных листовых металлов, либо цельной конструкции механической обработкой.

Несмотря на большое количество методов теоретического анализа силовых параметров и напряженно-деформированного состояния металла заготовки, остается открытым вопрос аналитического решения задачи о затекании металла в узкие пазы при штамповке поковок, имеющих

продольные рёбра. В основном описаны эксперименты по штамповке дисков вместе с лопатками, реализуемые на высокоскоростных молотах с помощью многоканальных штампов сложной конструкции, требующих разборки после штамповки для извлечения поковки и последующей сборки для продолжения циклов штамповки. Поэтому производительность таких способов невелика. Имеются разрозненные сведения о практической реализации штамповки оребрённых поковок, отсутствуют конструкции штампов для этих специализированных процессов, реализуемых на прессах. Теоретические положения прямого выдавливания оребрённых поковок с нарушенной симметрией либо отсутствуют, либо имеются крайне противоречивые сведения.

Только небольшая часть конструкционных металлов и сплавов пригодна для холодной объемной штамповки, поэтому для расширения номенклатуры поковок, получаемых операциями обработки металлов давлением (ОМД), в технологический процесс формообразования вводят предварительный нагрев заготовок, обеспечивая повышение пластических свойств труднодеформируемых сплавов.

Стремление к уменьшению массы изделий специального назначения и отказ от низко производительных сварочных работ и механообработки приводит к необходимости использования легких сплавов различных марок на основе алюминия, являющихся к тому же более дешёвыми. Однако попытки штамповки оребрённых поковок традиционными способами выдавливания наталкиваются на ряд проблем, связанных с возможным нарушением сплошности металла как во время рабочего хода, а также при извлечении готовой поковки выталкиванием из полости матрицы.

Таким образом, **актуальными** являются разработка новых способов прямого выдавливания стержневых поковок с продольными рёбрами из алюминиевых сплавов в холодном и горячем состояниях, обеспечивающих повышение производительности и коэффициента использования металла

(КИМ), а также теоретическое и экспериментальное обоснование рациональных технологических режимов их реализации.

Степень разработанности темы. Востребованными в промышленном производстве являются конструкционные металлы и сплавы на основе железа алюминия, магния, меди различных марок. Исследованием технологических процессов ОМД сложных поковок из конструкционных металлов, в том числе из деформируемых и литейных алюминиевых сплавов, занимались отечественные и зарубежные ученые, среди которых И.С. Алиев, Ю.М. Арышенский, А.Э. Артес, А.П. Атрошенко, Я.З. Бейгельзимер, А.А. Богатов, К.Н. Богоявленский, И.М. Володин, В.М. Воробьев, А.Л. Воронцов, Ф.В. Гречников, А.М. Дмитриев, М.З. Ерманок, В.Л. Колмогоров, С.Н. Ларин, Ю.Н. Логинов, А.Г. Овчинников, Г.И. Рааб, О.М. Смирнов, К.Н. Соломонов, Л.Г. Степанский, Ф.З. Утяшев, А.И. Хаймович, В.Г. Шibaков, С.С. Яковлев, JiaYannan, XiaQiu-xiang, K. Nakashima и многие другие.

Большой вклад в развитие теоретических положений различных методов анализа силовых параметров на операциях обработки давлением и оценки напряжённо-деформированного состояния штампуемого металла внесли А.В. Власов, А.Л. Воронцов, С.И. Губкин, В.М. Грешнов, Г.Я. Гун, А.М. Дмитриев, В.А. Евстратов, А.К. Евдокимов, Д.Д. Ивлев, А.А. Ильюшин, Н.Н. Малинин, Р.И. Непершин, А.Г. Овчинников, Г.В. Панфилов, Е.Н. Сосенушкин, Л.Г. Степанский, М.В. Сторожев, Ю.Н. Работнов, А.Д. Томленов, С.П. Яковлев, В. Джонсон, Х. Кудо и другие.

Критический анализ технической литературы, достигнутых исследователями результатов, патентные исследования и обобщение имеющегося производственного опыта позволили определить пробелы, к которым можно отнести следующие:

- существующие постановки краевых задач, ориентированных на получение оребрѐнных изделий, не доведены до окончательного решения, поэтому отсутствие математических моделей не дает возможности оперативно и с необходимой точностью оценивать силовые параметры и

НДС при пластическом деформировании подобных изделий;

- при выдавливании оребрённых стержневых поковок ограниченной длины, требующих выталкивания из матрицы, не применимы инструментальные штампы традиционной конструкции, ввиду высокой вероятности разрушения поковок;

- из-за отсутствия методик проектирования, учитывающих специфику штамповки оребрённых стержневых поковок и конструирования специальных штампов, недостаточно опыта у технологов большинства действующих предприятий в разработке и внедрении многопереходных технологических процессов выдавливания поковок, имеющих тонкие рёбра.

Поэтому **целью работы** является проведение исследований технологического процесса прямого выдавливания заготовок из алюминиевых сплавов с подтверждением возможности получения продольных рёбер на стержневой части поковок для совершенствования процесса изготовления, заключающегося в замене сварных конструкций и полученных фрезерованием, с повышением производительности и коэффициента использования металла.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- разработать математическую модель процесса выдавливания поковки, имеющей продольные рёбра для оценки контактных давлений, силовых параметров и деформированного состояния заготовки в процессе штамповки с получением аналитических зависимостей;

- оценить влияние геометрических размеров на технологические параметры прямого выдавливания оребрённых поковок такие, как контактное давление, сила деформирования, компоненты перемещений, деформаций, скоростей деформаций, а также выявить характер изменения этих параметров;

- разработать методику проектирования технологических процессов штамповки поковки с продольными рёбрами и создать алгоритм выбора

рационального варианта;

- спроектировать новые конструкции штамповой оснастки для реализации наиболее сложной операции прямого выдавливания;

- выполнить экспериментальные исследования операции прямого выдавливания для получения поковок с продольными рёбрами из алюминиевых сплавов двух марок АК6 и АК7 при разных технологических режимах;

- использовать результаты исследований в промышленности и учебном процессе.

Соответствие паспорту специальности. В области исследования материалы диссертации соответствуют пунктам:

1. Закономерности деформирования материалов и повышения их качества при различных термомеханических режимах, установление оптимальных режимов обработки.

3. Технологииковки, прессования, листовой и объемной штамповки и комплексных процессов с обработкой давлением, например, непрерывного литья и прокатки заготовок.

Объектом исследования являются процессы объемной штамповки сложных по форме поковок.

Предмет исследования. Взаимосвязи геометрических размеров заготовки и поковки с кинематическими и силовыми параметрами операции прямого выдавливания стержневых поковок с продольными рёбрами.

Результаты, полученные лично автором и выносимые на защиту:

- результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований операции прямого выдавливания поковок, имеющих продольные рёбра из алюминиевых сплавов;

- расчетные зависимости для определения контактных давлений и сил деформирования при штамповке стержневых поковок с ребрением, а также уравнения для оценки перемещений, деформаций и скоростей деформаций;

– научно обоснованные рациональные технологические параметры и новые конструкции штампового инструмента для реализации операции прямого выдавливания при штамповке стержневых оребрённых поковок из алюминиевых сплавов.

Научную новизну представляют следующие результаты:

– установленные взаимосвязи геометрических размеров заготовки и поковки с кинематическими и силовыми параметрами операции прямого выдавливания с затеканием металла в узкие пазы матрицы, формирующие продольные рёбра;

– математическая модель операции прямого выдавливания, включающая аналитические зависимости для расчетов контактных давлений, сил деформирования, компонент векторов перемещений и тензора деформаций;

Теоретическая значимость. Получены аналитические зависимости для расчета давлений и сил на штамповый инструмент, а также кинематических параметров прямого выдавливания оребрённых поковок.

Практическая значимость работы:

– создан алгоритм для расчетов параметров альтернативных вариантов процессов штамповки поковок с продольными рёбрами и выбора рациональной технологии;

– на основе теоретических и экспериментальных исследований разработан рациональный технологический процесс объемной штамповки и рекомендации по его реализации, позволяющие получить цельноштампованные стержневые поковки с продольным оребрением без искажения формы и высокими значениями коэффициента использования металла;

– разработаны новые способы изготовления стержневых изделий с продольными рёбрами из алюминиевых сплавов (патент РФ №2484913 на изобретение) и холодного выдавливания цилиндрических деталей со сквозным отверстием (патент РФ №2356682 на изобретение);

- разработаны новые конструкции штампового инструмента для прессования трубчатого изделия с меридиональными рёбрами (патент РФ №78450 на полезную модель) и пуансона для горячего деформирования с наконечником одноразового использования (патент РФ №86510 на полезную модель) при получении в поковках глубоких глухих отверстий;
- разработана методика проектирования технологических процессов объемной штамповки поковок, имеющих продольные рёбра.

Методы исследования. Теоретические положения разработаны согласно теории пластичности и теории обработки металлов давлением. Краевая задача теории пластичности решалась на основании определяющих соотношений: дифференциальных уравнений квазистатического равновесия, условий пластичности и несжимаемости металла, уравнений Коши для перемещений и деформаций. 3D модели поковок и чертежи штампов спроектированы с помощью программного комплекса T-FLEX CAD.

Экспериментальные исследования проведены с помощью спроектированной и изготовленной штамповой оснастки с использованием современного деформирующего оборудования – пресс гидравлический модели ПЗ234А завода «Гидропресс» г. Оренбург. Нагрев заготовок осуществлялся в электрической камерной печи сопротивления марки СНОЛ–1.6.2,5.1/9–М2У4.2. Точность автоматического регулирования номинальной рабочей температуры составляла ± 10 К. Бесконтактное измерение температуры заготовок проводилось инфракрасным пирометром Optris P20LT с оптическим разрешением 120:1 в интервале от 0 до 1573 К по тепловому излучению в диапазоне длин волн 8–14 мкм.

Достоверность результатов обеспечена корректно поставленными научными задачами, использованием классических математических методов, обоснованием принятых допущений и ограничений при выводе аналитических зависимостей и подтверждается удовлетворительной сходимостью расчетов с результатами экспериментальных исследований, полученных автором и другими независимыми исследователями, а также

принятым к использованию технологическим процессом в промышленном производстве.

Реализация работы. Результаты, полученные автором при подготовке диссертации, приняты к использованию на АО «НПО «Базальт» г. Москва согласно Акту об использовании результатов НИР (см. Приложение диссертации), а также в учебном процессе при чтении лекций в ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» по дисциплинам «Теория обработки металлов давлением», «Проблемы прочности и пластичности в технологических процессах», «Технология холодной объёмной штамповки».

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены на следующих конференциях и научных семинарах:

«Новые материалы и технологии – НМТ 2004». Всероссийская научно-техническая конференция. Москва, 17–19 ноября 2004 г. «МАТИ» – РГТУ им. К.Э. Циолковского.

«Прогрессивные технологические процессы, новые материалы и оборудование обработки металлов давлением»: Всероссийская научно-техническая конференция, г. Рыбинск: РГАТА, 2006.

«Физико–механические проблемы формирования структуры и свойств материалов методами обработки давлением»: Международная научно-техническая конференция. 24–27 апреля 2007. Украина, г. Краматорск: ДГМА.

Научный семинар кафедры «Системы пластического деформирования» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2012 г.

«Всероссийская конференция «Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста». Уфимский государственный авиационный технический университетг. Уфа. 26–28 февраля 2019 г.

V Международная научно-техническая конференция «Механика пластического формоизменения. Технологии обработки металлов давлением». Тула. 17-19 апреля 2019 г.

XIV Международный Конгресс «Кузнец-2019» «Совершенствование и

перспективы развития технологических процессов обработки металлов давлением и оборудования кузнечно-прессового машиностроения в современных условиях» г. Рязань 10-13 сентября 2019 г.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 10 научных работах, в том числе в 9 изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ, из которых 2 патента на изобретения и 2 патента на полезные модели, 1 публикация входит в международную базу SCOPUS.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав основного текста, общих выводов и приложения. Общий объем диссертации составляет 150 страниц. Диссертация содержит 59 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 101 наименования.

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

1.1. Технологичность объектов производства

Обработка конструкций деталей на технологичность – одна из важнейших функций технологической подготовки производства.

Технологичность деталей в соответствии с ГОСТ 14.205–83 [1] является комплексным свойством, характеризующим возможность рационального изготовления рассматриваемых деталей при обеспечении условий оптимального использования различных видов материальных ресурсов. Технологичность конструкций является оценкой совершенства деталей с точки зрения технического уровня, т.к. она в значительной мере определяет технико-экономические показатели производства.

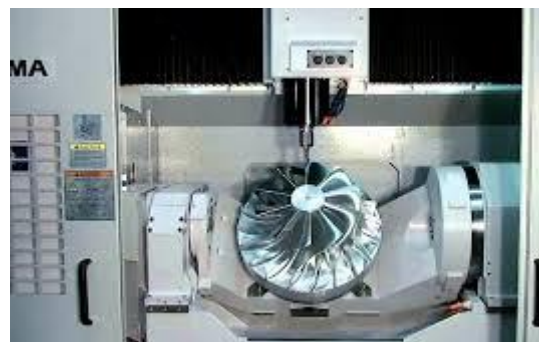
Под качественной оценкой технологичности конструкции изготавливаемой детали понимается оценка соответствия принимаемых конструктивных решений требованиям оптимальных технологических процессов. Количественная оценка базируется на системе различных показателей. При качественной оценке технологичности детали, важное значение имеет практический опыт разработчика и знание им возможных способов изготовления.



а) источник [2]



б) источник [3]



в) источник [4]

Рис. 1.1. Базовые технологии фрезерования:

а - на универсальном вертикально-фрезерном станке; б, в – на 5-ти координатных обрабатывающих центрах

Следует обратить внимание на то, что существуют нетехнологичные

детали сложной формы, базовыми технологиями для которых до сих пор являются операции механической обработки. В качестве примера приведем детали типа крыльчаток, изготавливаемых фрезерованием на универсальном оборудовании и обрабатывающих центрах (рис. 1). Процессы отличаются сравнительно низкой производительностью и небольшим коэффициентом использования металла (КИМ) 15-30%.

Предпринимаются попытки изготовления подобных деталей способами обработки металлов давлением. В этой связи в справочно-технической литературе много внимания уделяется обеспечению технологичности на этапе разработки чертежа поковки для различных операций холодной (ХОШ) и полугорячей объемной штамповки (ПГОШ) [5, 6].

Если поверхности поковки не подвергаются механической обработке, то назначение допусков на размеры производят согласно табл. 1.1 [7].

Таблица 1.1

Допуски на детали нормальной (Н) степени точности, получаемые холодным выдавливанием

Размеры, мм	Допуск на размер, мм		
	$d_{\text{п}}$	D	$d_{\text{ст}}$
До 10 (включительно)	$\pm 0,03 - 0,09$	$\pm 0,03 - 0,09$	$\pm 0,04 - 0,15$
Свыше 10 до 18	$\pm 0,04 - 0,11$	$\pm 0,04 - 0,11$	$\pm 0,06 - 0,18$
« 18 « 30	$\pm 0,05 - 0,13$	$\pm 0,05 - 0,13$	$\pm 0,08 - 0,21$
« 30 « 50	$\pm 0,06 - 0,16$	$\pm 0,06 - 0,16$	$\pm 0,10 - 0,25$
« 50 « 80	$\pm 0,08 - 0,19$	$\pm 0,08 - 0,19$	$\pm 0,12 - 0,30$
« 80 « 120	$\pm 0,10 - 0,22$	$\pm 0,10 - 0,22$	$\pm 0,15 - 0,35$
Примечание: $d_{\text{п}}$ – диаметр пуансона, мм; D – диаметр матрицы, мм; $d_{\text{ст}}$ – диаметр стержневой части, мм.			

Шероховатость поверхности поковок после ХОШ и ПГОШ зависит от качества поверхностей инструмента и заготовки; состава смазочного материала; вида операции. При прямом выдавливании и редуцировании шероховатость поверхности $Ra=1,6$ мкм, при высадке – до $Ra=3,2$ мкм [8].

Это позволяет в ряде случаев исключить последующую механическую обработку функциональных поверхностей изделия. Шероховатость поверхностей поковок, получаемых ПГОШ, несколько выше. Так, например, шероховатость стальных поковок после полугорячего выдавливания составляет $Ra=5\ldots 10$.

Уровень технологичности поковки тем выше, чем меньше потери металла в стружку [9]. Величины припусков для полугорячей штамповки рекомендуется вычислять, используя соотношения [10]: $P_D=(0,05\ldots 0,15)\sqrt{D}$; $P_d=(0,05\ldots 0,15)\sqrt{d}$; $P_L=(0,01\ldots 0,05)L$.

Чертеж поковки разрабатывают с учетом требований технологичности.

Таблица 1.2

Точность процессов формообразования

Процесс		Размер	ISO – квалитет IT											
			5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Формообразование	Штамповка	Диаметр												
	Штамповка точная	Диаметр												
	Выдавливание полугорячее	Диаметр												
	Выдавливание холодное	Диаметр												
	Калибровка чеканкой	Толщина												
	Калибровка прокаткой	Толщина												
	Прокатка	Толщина												
	Литье	Диаметр												
	Волочение труб и прутков	Диаметр												
	Вытяжка глубокая	Диаметр												
	Вырубка и пробивка	Диаметр												
	Вырубка чистовая	Диаметр												
Резание	Точение	Диаметр												
	Фрезерование	Толщина												
	Шлифование	Диаметр												
			- нормальная точность - повышенная точность - особо высокая точность											

На точность поковок, получаемых ХОШ и ПГОШ, влияет большое количество факторов, в том числе колебания объема заготовок; упругих

деформаций инструмента и элементов оборудования; температуры нагрева заготовок; величины износа рабочих деталей штампа и др.

Табл. 1.2 [11] иллюстрирует точность размеров деталей, получаемых с помощью различных процессов механической обработки (давлением и резанием). При проектировании чертежа поковки следует учитывать, что сопряжения поверхностей должны быть плавными. В табл. 1.3 приведены опытные данные [12] минимальных радиусов закругления контура поковки, получаемых ХОШ.

Таблица 1.3

Радиусы сопряжения, получаемые ХОШ

Диаметр, мм	Наружные радиусы, мм		Внутренние радиусы, мм	
	Нормальной точности	Высокой точности	Нормальной точности	Высокой точности
До 10	0,5 – 2,0	0,3 – 1,0	1,0 – 3,0	0,5 – 1,5
10 – 25	0,7 – 2,0	0,5 – 1,5	1,5 – 4,0	0,7 – 2,0
25 – 50	1,0 – 3,0	0,7 – 2,0	2,0 – 5,0	1,0 – 3,0
50 – 80	1,5 – 5,0	1,0 – 3,0	2,5 – 7,0	1,5 – 5,0
80 – 120	2,0 – 6,0	1,5 – 5,0	3,0 – 9,0	2,0 – 6,0
120 – 160	3,0 – 9,0	2,0 – 8,0	4,0 – 10,0	3,0 – 9,0

Объем или масса поковки служат исходными данными для определения размеров заготовки.

1.2. Виды ограничений при разработке технологии штамповки

При выборе исходных прутков из алюминиевых сплавов для заготовок с рассчитанными геометрическими размерами под холодную и полугорячую объемную штамповку следует руководствоваться ГОСТ 21488–97 [13]. Технические условия допускают искажение формы искривлением на длине 1,0 м не более 2 мм.

На металл для холодной объемной штамповки в таких странах, как Германия, Япония, Швеция, США технические условия не допускают

никаких поверхностных дефектов, отечественными же стандартами допускаются дефекты на поверхности глубиной, равной величине допуска на диаметр.

При ХОШ в результате упрочнения металла предел текучести повышается 1,6...2,5 раза, поэтому можно применять менее прочные материалы. Возможность замены материала на более пластичный определяется на основании анализа кривых упрочнения.

Адаптация типового технологического процесса ХОШ и ПГОШ или синтез нового решения из многообразия возможных вариантов должны определяться конкретными целями, достижение которых приведет к высокому техническому уровню поковок и технологического процесса в целом, а также к необходимому уровню затрат на технологическую подготовку производства.

При изготовлении поковок сложных деталей технологические процессы различаются по числу и виду применяемых операций. Часто приходится комбинировать операции и синтезировать новые технологические процессы. Комбинации могут быть совмещенными или последовательными как во времени, так и по пути течения деформируемого металла. Очаги деформации могут быть совмещенными или локализованными, подвижными и неподвижными. Часть переходов может осуществляться в холодном состоянии, а часть – с предварительным нагревом заготовки. Для целей имитации используются модели, основанные на анализе конкретных технологических процессов.

Поковки стержневых деталей изготавливаются преимущественно холодной и полугорячей высадкой в сочетании с другими видами пластического деформирования: редуцирования, прямого и радиального выдавливания. При наличии полостей в элементах поковок технологический процесс пополняется операциями обратного выдавливания и прямого выдавливания с раздачей.

Таким образом, многообразие альтернативных вариантов технологии

настолько велико, что обеспечение принципа максимальной полноты набора анализируемых технологических процессов не представляется возможным без применения специализированных методов направленного синтеза как неупорядоченных, так и упорядоченных, приводимых в литературе по оптимальному конструированию [14, 15].

Утолщения стержневых деталей при отношении длины высаживаемой части (l) к ее диаметру (d) $l/d \geq 2,3$ приходится изготавливать с предварительным формообразованием, что особенно необходимо при посадке утолщений большого диаметра. Как показывает практика, лучшей формой предварительно высаженной части заготовки, обеспечивающей устойчивость процесса окончательного формоизменения, является усеченный конус. Отношение диаметров нижнего (d_1) и верхнего (d) оснований конуса, длина конической части определяются соотношениями, представленными в работе [16].

При разработке технологии ХОШ стержневых деталей довольно часто возникают ситуации, когда утолщение детали не может быть получено посадкой вследствие геометрических ограничений, обусловленных потерей устойчивости высаживаемой части заготовки или потерей устойчивости стержневой части детали, которая оказывается слишком короткой. Ограничения по устойчивости заготовки в процессе деформирования определены в соответствии с рекомендациями [16, 17, 18, 19] с помощью операций посадки, радиального выдавливания и редуцирования сведены в табл.1.4.

В работе [11] доказано, что информативными параметрами для описания поволоков являются относительные геометрические размеры, участвующие также и в формировании ограничений. Для стержневых поволоков: $k = \frac{h}{d}$; $m = \frac{l_y}{h}$; $n = \frac{D}{d}$; для полых поволоков: $k = \frac{h}{d}$; $m = \frac{h}{H}$; $n = \frac{D}{d}$; S .

В этом случае особенно при значительных перепадах диаметров утолщения и стержневой части, возможно, изготовление детали выдавливанием

стержневой части.

Таблица 1.4

Геометрические ограничения при штамповке стержневых поковок без отверстий

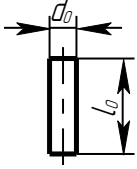
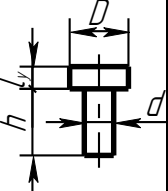
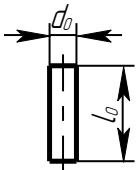
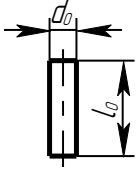
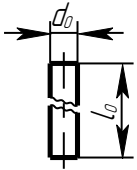
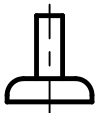
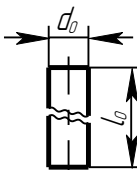
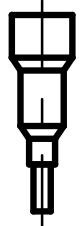
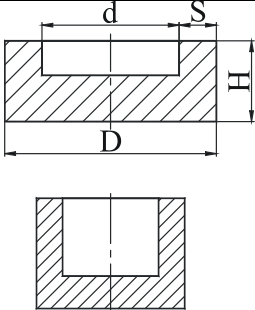
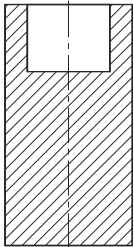
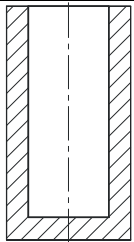
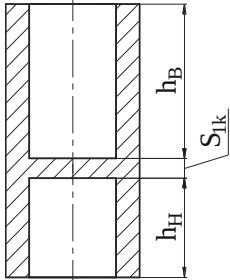
Наименование операции	Заготовка	1 – й переход	2 – й переход	3 – й переход	Ограничения
Высадка					$n = \frac{D}{d}, n < 2,2; l_0 / d_0 < 2,3;$ $k = \frac{h}{d}, k > 0,5; m = \frac{l_y}{h}$
Высадка					$n < 2,2 \dots 2,6;$ $l_0 / d_0 < 2,3 \dots 4,5;$ $k > 1,5$
Высадка					$n < 2,6 \dots 4;$ $l_0 / d_0 < 4,6 \dots 8,0;$ $k > 2,5$
Радиальное выдавливание					$n < 4,0;$ $l_0 / d_0 < 4,5 \dots 9,0$
Редуцирование					$l_1 / d_1 < 4,0 \dots 8,0$

Таблица 1.5

Геометрические ограничения при выдавливании полых поковок

Наименование операции	Эскиз детали	Ограничения	
Обратное выдавливание		$\frac{nm}{k} > 1,0$ $k < 1,0$ $\frac{nm}{k} = 1,0$ $k = 1,0$	$s = 2 \dots 15 \text{ мм}$ $m > 0,83$
Обратное или прямое выдавливание		$\frac{nm}{k} < 1,0$ $k < 1,0$	$s = 2 \dots 15 \text{ мм}$ $n \geq 1,1$ $1,0 \leq \frac{k}{nm} \leq (15 \dots 25)$
Прямое выдавливание		$\frac{nm}{k} < 1,0$ $k > 1,0$	$s = 0,5 \dots 6 \text{ мм}$ $m \leq 0,83$
Комбинированное двухстороннее выдавливание		$S_{1k} = H_0 - h_b \left[1 + \frac{1}{\alpha} \right] \left[1 - \frac{1}{n^2} \right]$ $\alpha = \frac{h_b}{h_n} - \text{коэффициент формоизменения}$ H_0 - высота исходной заготовки	

Однако холодное выдавливание за один переход не всегда может быть реализовано из-за чрезмерно больших удельных сил на инструменте. Поэтому такие детали целесообразно изготавливать в два или более переходов выдавливания.

При наличии отверстий в стержневых поковках и при штамповке полых стаканов геометрические ограничения представлены в табл. 1.5.

Если геометрические ограничения позволяют ввести в технологический

процесс операции выдавливания отверстия необходимых размеров, то анализируются ограничения по силовым параметрам при назначении конкретной операции, а также по числу переходов. Для условий мелкосерийной горячей объемной штамповки полых поковок в работе [20] предложена конструкция сборного пуансона с наконечником одноразового использования, формирующего донную часть поковки. По причине нагрева рабочей части пуансона до температуры, превышающей температуру разупрочнения, наконечник из углеродистой инструментальной стали, потерявший прочностные свойства, оставляют в поковке с последующей операцией высверливания. В этом случае экономия на основных материалах превышает стоимость одноразового наконечника.

Одним из основных ограничений применения ХОШ является величина допустимой степени деформации. Для оценок используют как относительную степень деформации, так и логарифмическую, обладающую свойствами аддитивности [21].

В работе [22] предложены зависимости для оценки относительных степеней деформации ε на последующих переходах штамповки в зависимости от действительной степени деформации на выполненных переходах:

$$\varepsilon_{i+1} = \frac{\varepsilon_{i-1} - \varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i}, \quad (1.1)$$

и для расчета диаметра d полуфабриката на $(i+1)$ переходе выдавливания:

$$d_{i+1} = d_i \sqrt{1 - \varepsilon_{i+1}}. \quad (1.2)$$

1.3. Поковки с продольными рёбрами и технологии их изготовления

1.3.1. Поковки со спиральными рёбрами, изготавливаемые прессованием с винтовым истечением

В некоторых отраслях, например в авиастроении, широким спросом пользуются изделия со спиральным оребрением [23]. Технологией получения таких изделий является прессование с винтовым истечением металла по схеме, показанной на рис. 1.2.

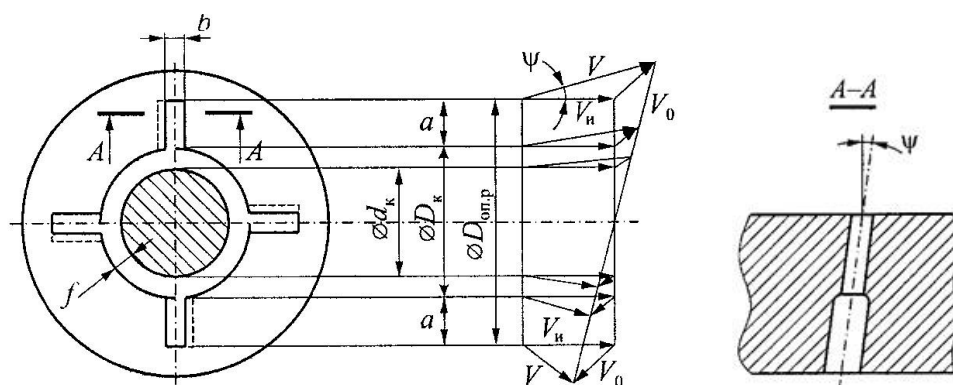


Рис. 1.2. Схема расположения каналов и годограф скоростей перемещений при прессовании труб со спиральным оребрением

При прессовании по приведенной схеме, внешнее спиральное оребрение получают при затекании металла заготовки в винтовые пазы матрицы. Деформируемый металл в окружном направлении движется за счет неравномерности скоростей истечения в пазах с поясками, параллельными оси прессования, но имеющими различную длину на противоположных сторонах канала или в пазах с наклонными рабочими поясками одинаковой по сторонам ребра длины (см. рис. 1.2, сечение А–А).

Холодное радиальное выдавливание спиральных рёбер на наружной поверхности изделий сложной конфигурации позволяет получить боковые отростки или оперение. Авторами работы [24] установлена взаимосвязь силовых и деформационных параметров с количеством и толщиной выдавливаемых спиральных боковых рёбер. Моделирование процесса

радиального выдавливания выполнено с помощью программного комплекса DEFORM-3D. Получены расчетные силовые параметры процесса в зависимости от количества рёбер: 2, 3, 4, 6. Анализ деформационного состояния заготовки в процессе выдавливания позволил выполнить оценку качества заполнения полостей, оформляющих рёбра.

Эксперименты проводили для детали с 4-мя рёбрами. Разработанный технологический процесс позволяет увеличить КИМ до значения 0,9, повысить производительность труда на 50% и сократить трудоемкость изготовления в 2 раза.

1.3.2. Выдавливание поковок типа дисков с лопатками и крыльчаток

В качестве другого примера поковок, имеющих периодически повторяющиеся радиально направленные элементы, следует привести многочисленную группу рабочих колес лопаточных турбомашин. Применение цельноштампованных колес (рис. 1.3) обеспечивает значительное повышение эксплуатационных и экономических показателей агрегатов, а также снижает габариты, а значит и металлоемкость [25].

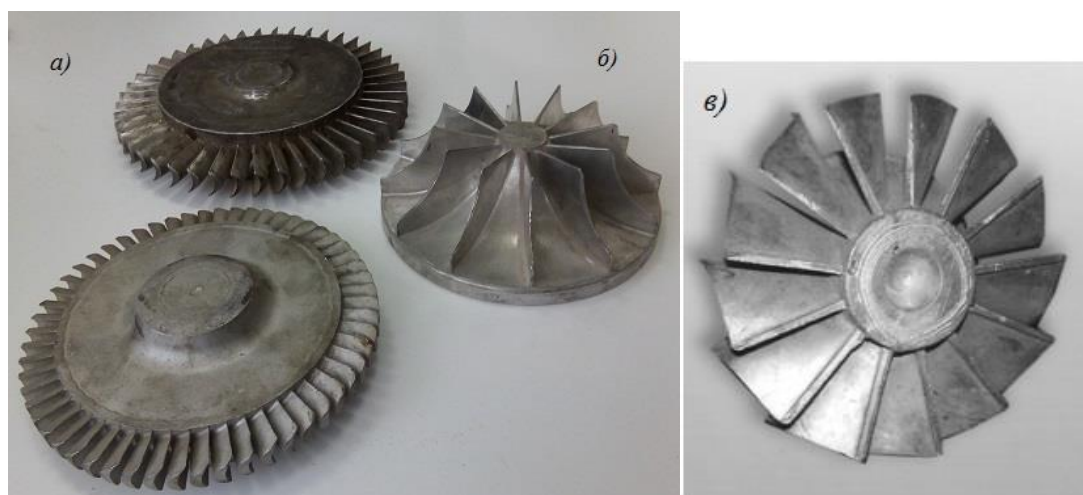


Рис. 1.3. Цельноштампованные диски вместе с лопатками: а – турбинные диски; б – радиальные крыльчатки; в – компрессорные колеса.

В зависимости от назначения колеса могут быть изготовлены из

алюминиевых или титановых сплавов. Традиционные технологии изготовления показанных поковок (см. рис.1.3) – радиальное, прямое и комбинированное выдавливание [26, 27]. Добиться качественного заполнения металлом полостей, оформляющих лопатки можно путем выравнивания скоростей течения по траекториям, которые обеспечивают опережение при формообразовании выходной кромки лопатки при прямо пропорциональной зависимости от силы деформирования [28].

Авторы работы [29] провели исследование комбинированного процесса экструзии и бокового прессования для толстой полосы с прямоугольным ребром. Однако недостатком такой технологии является две операции вместо одной. Это приводит к потере производительности и дополнительным затратам на штамповую оснастку.

В рассмотренных технологических процессах с применением операций прессования и выдавливания поковок из труднодеформируемых сплавов (титановых, алюминиевых и медных) рекомендуется деформирование проводить с предварительным нагревом заготовок [30].

1.4. Особенности штамповки с предварительным нагревом заготовок

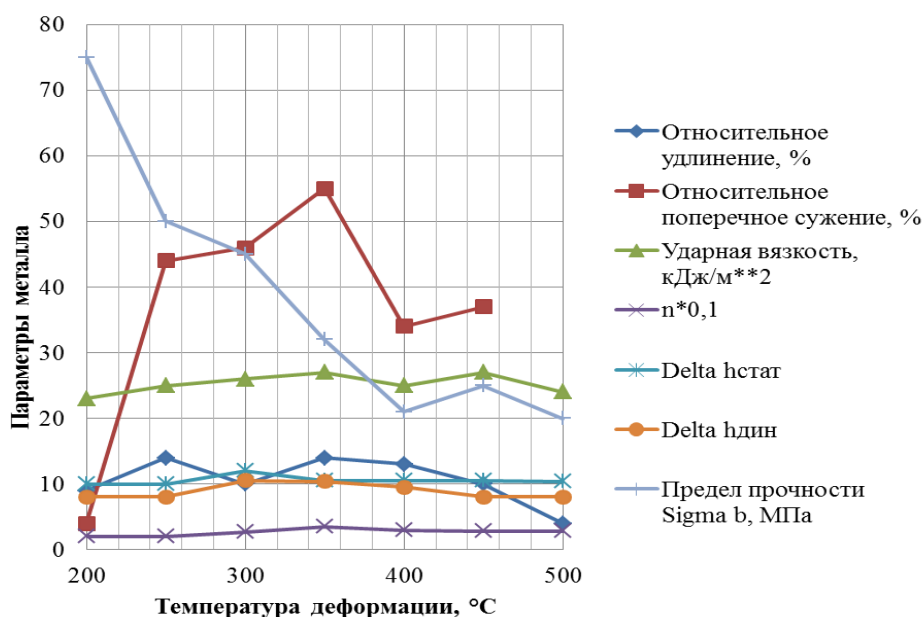
К способам температурной интенсификации технологических процессов объемного деформирования металлов, в частности алюминиевых сплавов, относится предварительный нагрев заготовок под штамповку.

1.4.1. Термомеханические режимы обработки давлением алюминиевых сплавов

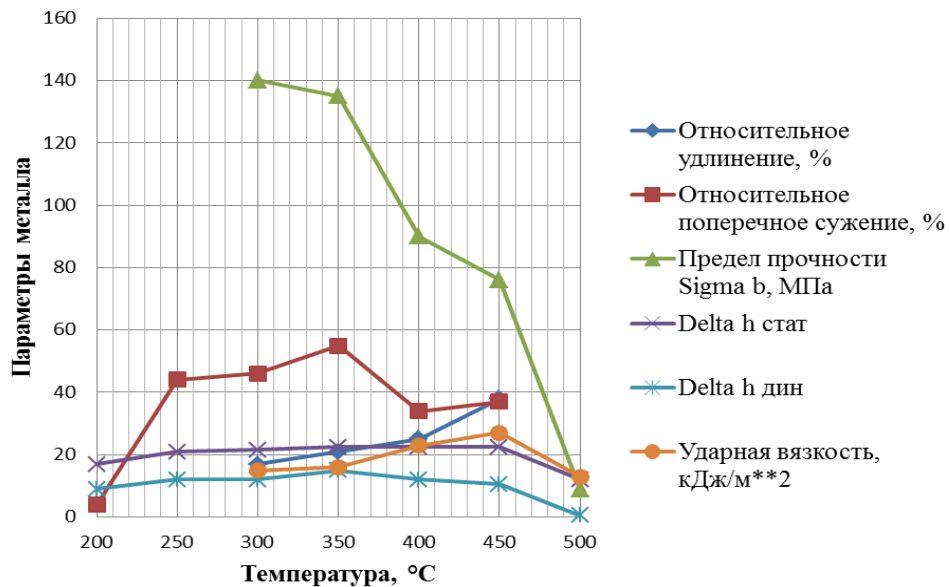
Правильный выбор термомеханических параметров технологии штамповки, среди которых температурный интервал формоизменения, определяемый температурами начала и конца обработки; условия трения;

параметр Одквиста, в том числе величина критических степеней деформации, превышение которых ведет к разрушению деформируемого металла; предельная степень деформации, при которой наиболее интенсивно идут процессы рекристаллизации при формоизменении; скорости деформации и нагрева; темп охлаждения поковок; распределение напряжений и деформаций в металле при пластической обработке, устанавливаемых по результатам комплекса стандартных испытаний.

На рис. 1.4 представлены диаграммы пластичности алюминиевого сплава АК7, а на рис. 1.5 – диаграммы пластичности алюминиевого сплава АК6 [31]. Диаграммы пластичности дают представление об изменении накопленной степени деформации ε , относительного удлинения δ , относительного поперечного сужения ψ , ударной вязкости a , предела прочности σ_b , коэффициента деформационного упрочнения n , а также изменении высоты заготовки при статическом $\Delta h_{стат}$ и динамическом $\Delta h_{дин}$ нагружении в зависимости от температуры нагрева. С помощью опытов на статическую и динамическую осадку образцов при различной температуре испытаний устанавливают условия появления первых трещин.



а)

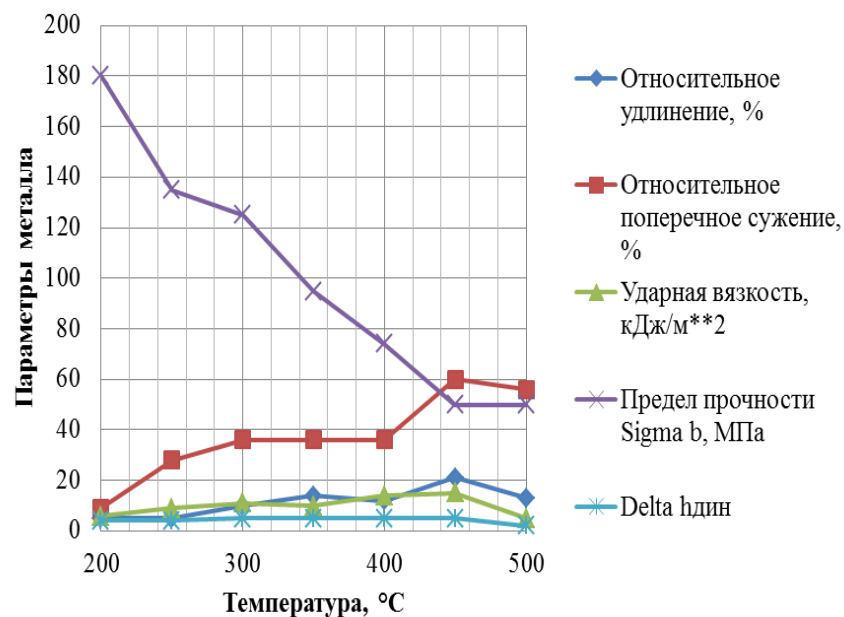


б)

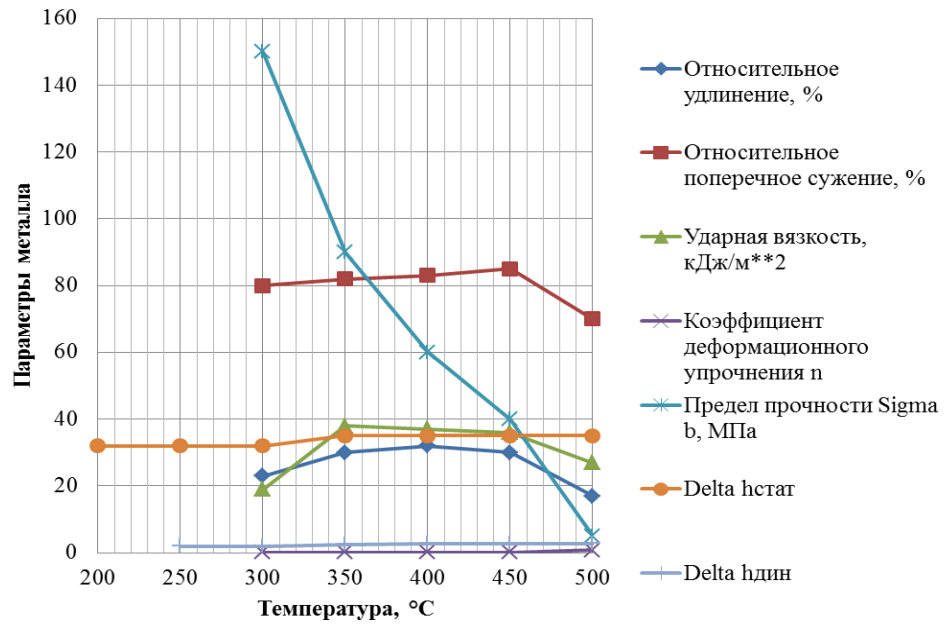
Рис. 1.4. Диаграмма пластичности сплава АК7 со структурой:

а – литой; б – после деформации

Результатами такого эксперимента является выявление интервала температур, при которых достигается наибольшая величина накопленных деформаций и определяются критические значения последних. В этом случае фиксируются значения изменения высоты образцов $\Delta h_{стат}$ при статическом нагружении на прессе с малыми скоростями деформирования и $\Delta h_{дин}$ при динамическом нагружении на молоте/копре с увеличенными скоростями деформирования.



а)



б)

Рис. 1.5. Диаграмма пластичности сплава АК6 со структурой:

а – литой; б – после деформации

На рис. 1.6 представлены кривые течения деформируемого сплава АК6 при различных температурах нагрева [31].

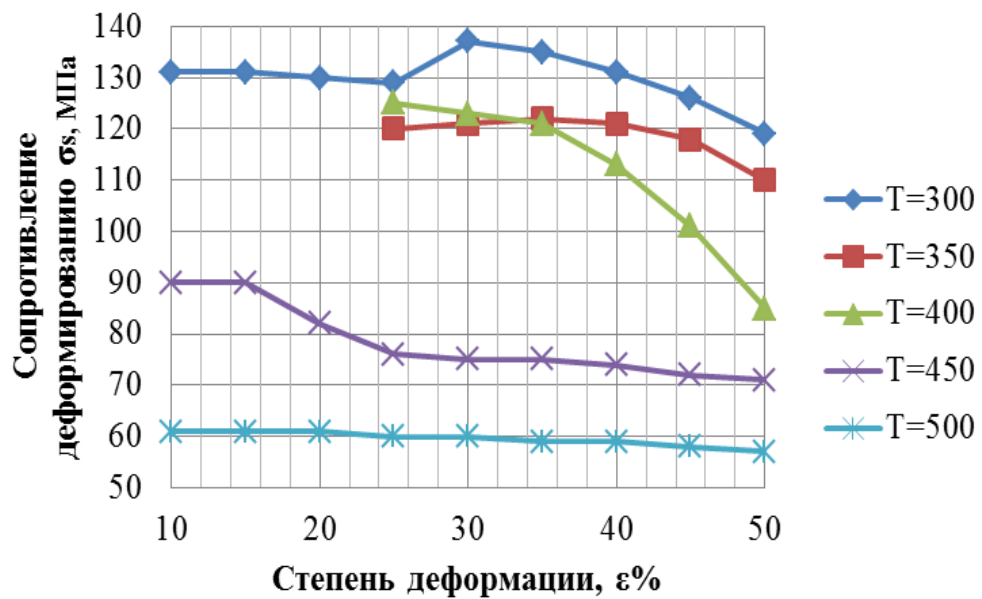


Рис. 1.6. Кривые течения сплава АК6

При степенях деформации в диапазоне 0,50–0,75 [32] появляющуюся неоднородность деформации по объему заготовки сопровождается наибольшей анизотропией, приводящая к понижению механических свойств деформированных полуфабрикатов.

При деформации с параметром Одвишта не менее 0,95, структура сплава становится более однородной по сечению и металл приобретает более равномерно распределенные механические свойства по объему деформированных полуфабрикатов как вдоль, так и поперек волокон. Поэтому при прессовании профилей, прутков, а также заготовок для поковок необходимо обеспечивать наибольшую деформацию, которая должна составлять 0,6–0,65 для прессованных прутков, предназначенных в качестве исходного металла для дальнейшей обработки давлением, и 0,95 для прессованных прутков и поковок, назначаемых для изготовления деталей машин.

Температурные интервалы штамповки определяют по диаграммам пластичности, кривым течения и диаграммам состояния соответствующих систем сплавов. Для выбранных алюминиевых сплавов эти интервалы следует выбирать в пределах, указанных в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Термомеханические режимы обработки давлением

Сплав	Температурный интервал, °С		Скорость деформирования, м/с	Допустимая степень деформации, %	
	начало	конец		литой	деформированный
АК7	470-440	400	0,3 (пресс)	40-50	до 80
	450-420	380	8,0 (молот)	40	50-70
АК6	470-420	350	0,3(пресс)	>50	до80
			8,0(молот)	40-50	50-65

При сравнительно больших степенях деформации алюминиевых сплавов порядка 0,65–0,75 анизотропия механических характеристик снижается. Поэтому при деформировании слитков ковкой для производства заготовок, поковок и других полуфабрикатов, предназначенных для

дальнейшего пластического деформирования, накопленная степень деформации в полуфабрикатах должна быть минимальной, чтобы ресурс пластичности оставался высоким.

Из диаграмм рекристаллизации применяемых алюминиевых сплавов [31, 33], следует, что критические деформации, при которых наиболее интенсивно увеличивается размер зерна, лежат в интервале $\epsilon=0,12-0,15$. В связи с этим во избежание рекристаллизации сплавов, сопровождающейся образованием крупного зерна в структуре, обработку давлением следует проводить с обжатиями ϵ более 0,15–0,20 на промежуточных переходах.

Критическая степень деформации за переход для используемых алюминиевых сплавов находится в пределах, приведенных в табл. 1.6.

По диаграммам пластичности устанавливают допустимый уровень степени деформации (параметра Одквиста) для алюминиевых сплавов в зависимости от скорости деформирования и характер изменения пластических характеристик. Диаграммы показывают, что с увеличением скорости деформирования, заметного снижения технологической пластичности сплавов не происходит. При изменении скоростных условий деформирования, связанного с переходом от статического нагружения к динамическому характеру приложения нагрузок, рост сопротивления деформированию сплавов в 1,5–2,0 раза в зависимости от химического состава сплава не является критичным. Поэтому алюминиевые сплавы, подвергаемые формоизменению операциямиковки или штамповки, с успехом могут быть обработаны в широком диапазоне скоростей деформирования без разрушения.

1.4.2. Выдавливание в изотермических условиях

Исследование процесса формообразования с нагревом заготовок проводится с привлечением зависимостей, определяющих состояние механики нелинейно вязкой сплошной среды. Уравнения математической

физики, по большей части нелинейные, и разработанные с их использованием расчетные методы, применяемые для исследований поведения различных конструкций, достаточно подробно изложены в работах отечественных ученых–механиков Ю.Н. Работнова [34], А.А. Ильюшина [35], Н.Н. Малинина [36], Л.М. Качанова [37] и других.

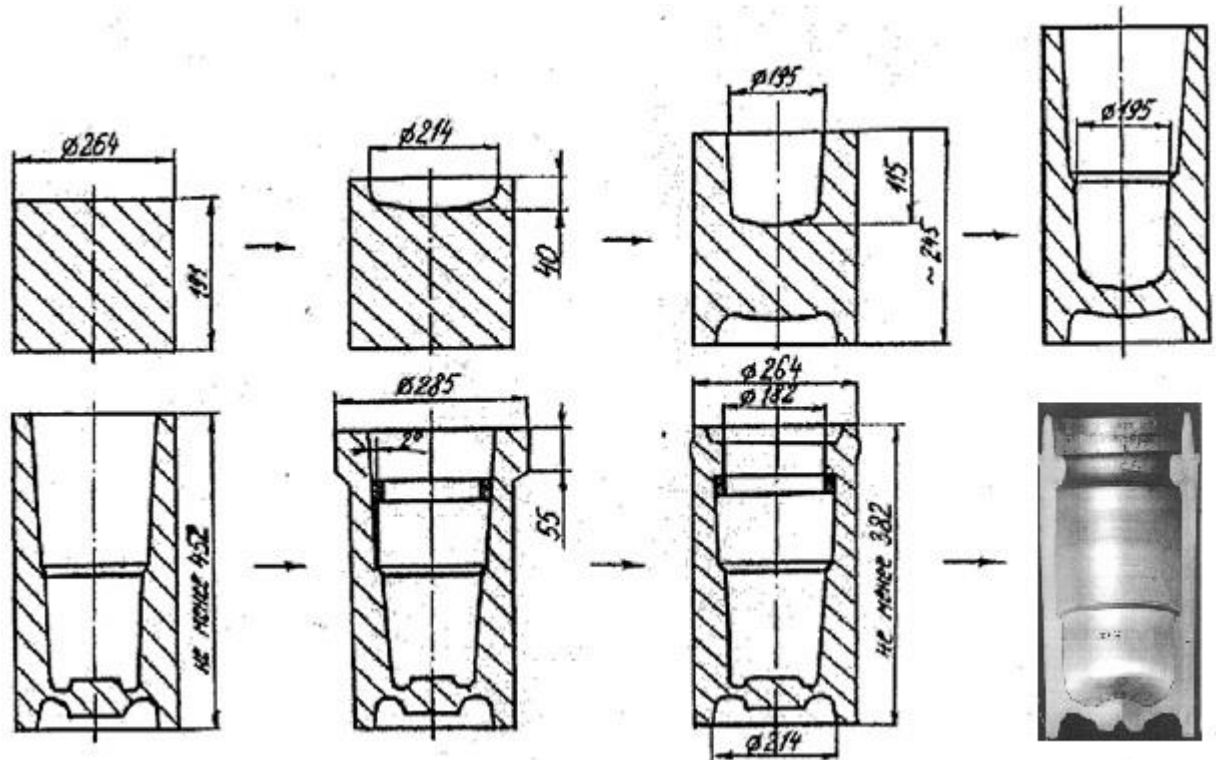


Рис. 1.7. Переходы штамповки выдавливанием поковки корпуса с внутренним шпангоутом в виде ребер из сплава В96цЗ в изотермических условиях

Известны примеры изотермической штамповки сложных по форме изделий увеличенных размеров из алюминиевых сплавов [38]. Разработчиком одной из промышленных установок для изотермической штамповки [39] является НПО «Авангард», входящий в состав концерна «Алмаз-Антей». На рис. 1.7 представлена технология изотермической штамповки корпуса, имеющего ребра на стенке и в донной части и штампованная поковка по приведенной технологии.

1.4.3. Использование эффекта кратковременной ползучести

Теоретический анализ процессов штамповки с предварительным нагревом не менее эффективно проводить на основе теории кратковременной ползучести, в рамках которой развиты расчетные методы, в частности Н.Н. Малининым [40]. Некоторые приложения методов, ориентированные на металлургическое производство, построены на нелинейной теории наследственности и разработаны А.А. Поздеевым и В.И. Тарновским [41]. Особенности механизма горячего деформирования приведены в работах Г.Я. Гуна [42], Г.Д. Деся [43], В.Л. Колмогорова [44], Е.И. Семёнова [45].

Обобщенное кинетическое уравнение кратковременной ползучести по Ю.Н. Работнову [46]:

$$\xi = f(\sigma, T, q_1, \dots, q_n) + q'(\sigma)\dot{\sigma} \quad (1.3)$$

где первый член выражает скорость деформации в условиях ползучести, второй – скорость пластической деформации.

Привлечение теории наследственности позволяет учесть влияние истории нагружения, упрочнение деформируемого металла и процесс его разупрочнения. Однако зависимости сложны, что ограничивает их применение.

1.5. Виды дефектов, возникающих при штамповке оребрѐнных поковок

В соответствии с данными технической литературы установлено, что наиболее часто встречающимися видами дефектов при выдавливании рѐбер на деталях являются утяжины, так называемый, «прострел» и не качественное заполнение пазов штампа, формирующих рѐбра.

Одной из целей работы [47] являлось изучение влияния реологического состояния штампуемого материала на образование утяжин, которые располагаются со стороны полотна поковки напротив штампуемого ребра. Возможность возникновения утяжин в прямую зависит от интенсивности течения металла в пазы штампа. Экспериментальными исследованиями авторами установлено, что с увеличением температуры и уменьшением скорости деформации вероятность образования и интенсивность развития утяжин уменьшаются, т.е. при достижении режимов сверхпластичности. При штамповке алюминиевых сплавов в режиме сверхпластичности утяжины не образуются, если в конце процесса деформации толщина полотна поковки остается больше максимальной толщины ребра. При толщине ребра поковки на 20% больше толщины полотна, утяжина образуется и необходим соответствующий припуск, чтобы устранить дефект механической обработкой.

Компьютерное моделирование образования утяжины проведено авторами работы [48] в программном комплексе QForm-2D. Исходные параметры моделирования следующие. Марка металла – алюминиевый сплав АД1. Трение задавалось константой поверхности по А.Н. Леванову равной 0,2. Кривая упрочнения металла заготовки аппроксимировалась зависимостью $\sigma_s = 131e^{0,28}$; модуль Юнга 75000 МПа, коэффициент Пуассона 0,32. Геометрические параметры: толщина ребра $S=3,5-14,5$ мм; половина расстояния между рёбрами $R_1=22,5$ мм; толщина полотна $h=1-6$ мм. Обработка результатов компьютерного моделирования дала возможность получить диаграмму (рис. 1.8), на которой выделены зоны образования утяжин и области бездефектной штамповки выдавливанием.

Похожий дефект в виде утяжины может образоваться при радиальном выдавливании поперечных ребер на цилиндрических деталях [49]. Для исключения образования дефекта в месте перехода металла из осевой зоны в рёбра необходимо создание такой деформационной схемы, при которой истечение в рёбра начиналось бы после завершения основных перемещений

металла вдоль внутренней боковой поверхности.

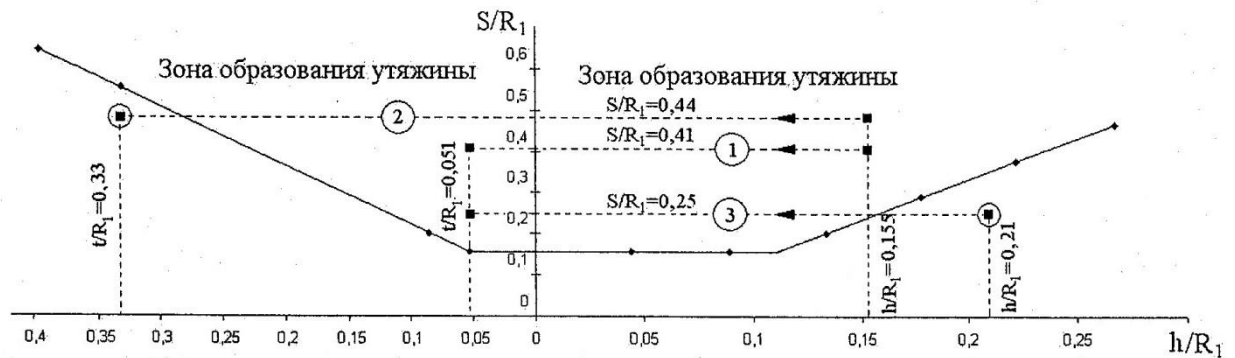


Рис. 1.8. Номограмма для выбора геометрических размеров поковок, которые можно получить выдавливанием без образования брака в виде утяжин

В том случае, когда площадь поперечного сечения кольцевой полости, расположенной между пуансоном и стенками матрицы, будет больше суммы площадей поперечных сечений боковых полостей, образующих ребро, расположенных в непосредственной близости от торца пуансона. Для заполнения кольцевого ребра металлом нижняя граница очага деформации не должна опускаться ниже ближайшего ребра, т.е. расстояние от торца поковки до ближайшего ребра должно быть:

$$h_m = h_n + h_{od}, \quad (1.4)$$

где h_n – глубина опускания пуансона в полость штампа, обеспечивающая заполнение кольцевого ребра;

$h_{od} = \sqrt{r(R-r)}$ – высота очага деформации;

r – радиус пуансона;

R – радиус полости штампа.

Распространенным дефектом поковок, имеющих рёбра, является так называемый «прострел» с нарушением сплошности металла у основания ребра [50]. Показано, что при исследовании процесса штамповки методом линий скольжения, образование «прострела» и его форма повторяет форму линий разрыва скоростей. Авторы приходят к выводу, что «прострел» представляет собой микротрещину, зарождающуюся в момент, когда

материальная частица проходит через точку, в которой она получает большое приращение деформации. Дальнейшее распространение возникшей трещины происходит по траектории движения частиц, совпадающей с линией разрыва скоростей. Эксперимент показал, что избегая концентраторов напряжений, применением матриц со скругленной кромкой у основания ребра, уменьшается вероятность образования описанного дефекта.

1.6. Особенности конструирования штампового инструмента для выдавливания поковок с рёбрами

Оребрённые поковки можно изготавливать в штампах с рассекателями определенной формы для формообразования тонкого полотна с повышенными значениями КИМ [51]. Для поковок с развитым оребрением на одной из поверхностей механическую обработку следует проводить только по поверхности, не имеющей ребер, т.е. имеющей простую форму. Это позволяет уменьшить долю механической обработки за счет назначения меньших напусков и припусков [52]. Аналитически методом линий скольжения и экспериментально обосновано влияние рассекателей, расположенных на обрабатываемой поверхности, на величину удельных сил, толщину полотна и КИМ [51]. На графике (рис. 1.9) выделены 3 семейства кривых. Кривая I (сплошная линия) получена для пуансона без рассекателя $\beta=0$. Семейство кривых II (штриховая линия) получено для пуансонов с рассекателем $\beta=5, 10, 15^\circ$ и для минимальной толщины полотна h . Третье семейство кривых (штрих-пунктирная линия) показывает зависимость удельной силы от приведенной толщины полотна h_{cp} при пуансонах с рассекателем $\beta=5, 10, 15^\circ$:

$$h_{cp} = h_1 + \frac{B}{4} \operatorname{tg} \beta. \quad (1.5)$$

Значение h_{cp} характеризует эффективность процесса штамповки при получении оптимальных значений КИМ. Анализ кривых дает возможность

предположить наличие области, где определенные сочетания толщины полотна и формы рассекателя обеспечивают минимальный уровень удельных сил при максимальном для данной формы оребрения значении КИМ.

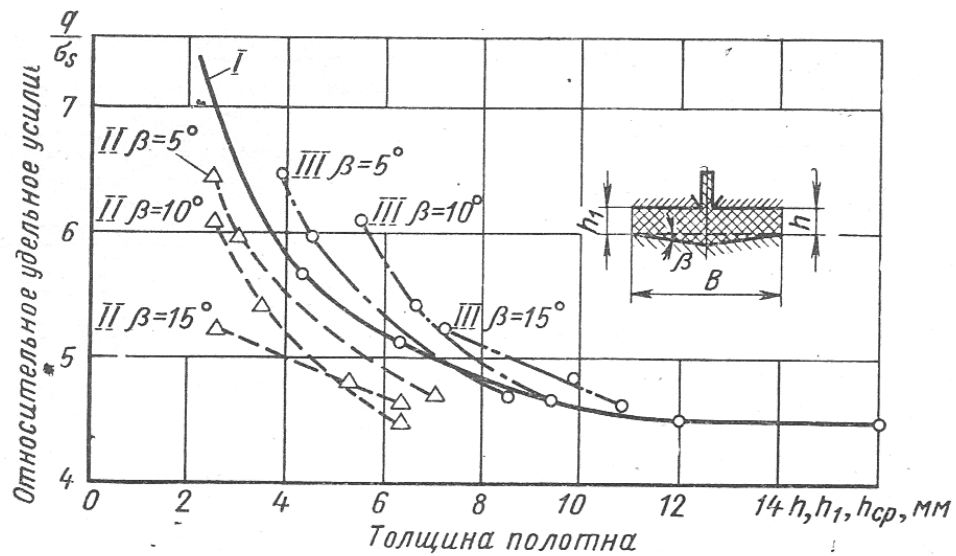


Рис. 1.9. Зависимость относительной силы $\frac{q}{\sigma_s}$ от толщины полотна

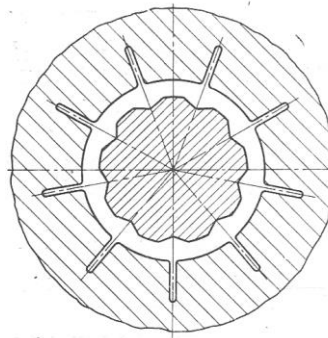


Рис. 1.10. Сечение штампа в рабочем (сомкнутом) состоянии

График справедлив для условий изотермической штамповки. Поперечный разрез сомкнутого штампа показан на рис. 1.10, где видны полости в матрице, образующие рёбра, и полости в пуансоне, образующие рассекатели.

Из-за сложности формы оребрённых поковок в большинстве случаев применяются штампы с разъемными матрицами [53, 54]. Так, например, в работе [51] применен штамп с 2-мя буферными устройствами (гидрозажимами) для запора секций разъемной матрицы и подъема

матричного блока вверх для окончательного формообразования поковки. Схема штампа показана на рис. 1.11.

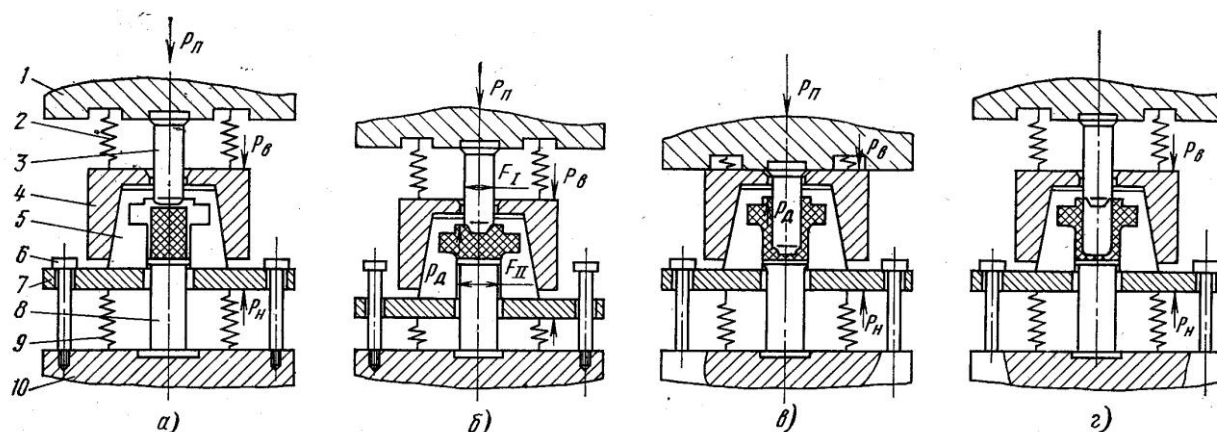


Рис. 1.11. Штамп с двумя буферными устройствами:

1 - плита верхняя; 2, 9 – буферное устройство; 3, 8 – пуансон; 4 – обойма запорная; 5 – матрица разъемная; 6 – ограничитель хода подвижной плиты 7; 10 – плита нижняя

Другим примером штампа для изотермической штамповки поковки с продольными ребрами является конструкция на рис. 1.12 [55]. В исходном состоянии пуансон 1 и прижим 2 находятся в верхнем положении, при этом матрица 3 раскрыта, но полностью из бандаж не выходит. Нагретую и покрытую смазкой ЭВТ-8 заготовку из сплава ВТ-22 устанавливают в матрицу и фиксируют с помощью прижима 2 в обойме 4. Под действием пуансона металл течет в радиальном направлении и заполняет ребра. С помощью штампа изготовлена партия поковок, которая отвечала требованиям чертежа.

Для формообразования плоских поковок с ребрами применяют осадку с затеканием в полости. В работе [56] описаны конструкции штампов с подвижными фиксаторами заготовки при заполнении выступов и ребер, т.к. при деформировании увеличиваются размеры в плане. Принципиальная схема работы фиксаторов должна обеспечивать точную установку заготовок, освобождение места за пределами заготовки к моменту начала осадки, а также возможность удаления поковок из рабочей зоны штампа.

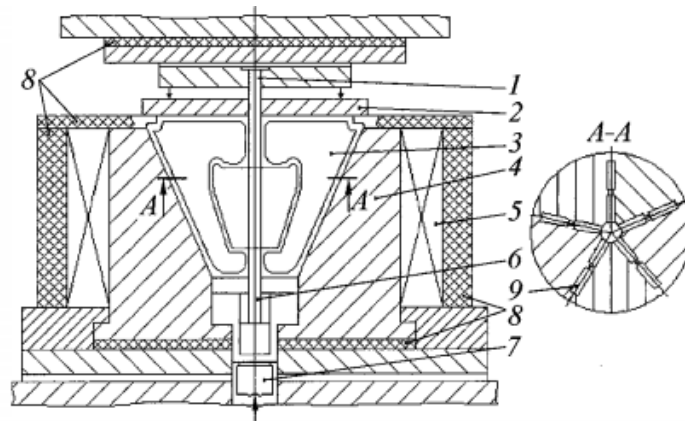


Рис. 1.12. Схема штампа для изотермической штамповки:

- 1 – пуансон; 2 – прижим; 3 – матрица пятисекционная; 4 – облойка;
5 – индуктор; 6 – выталкиватель; 7 – толкатель прессы; 8 – теплоизоляция;
9 – полость в секции матрицы

Плоские поковки с периодически повторяющимися ребрами с заданным шагом изготавливают в многорядном щелевом штампе, схема заполнения ребер в котором представлена на рис. 1.13 [57]. В работе анализируются кинематические особенности течения металла при затекании металла в ребра.

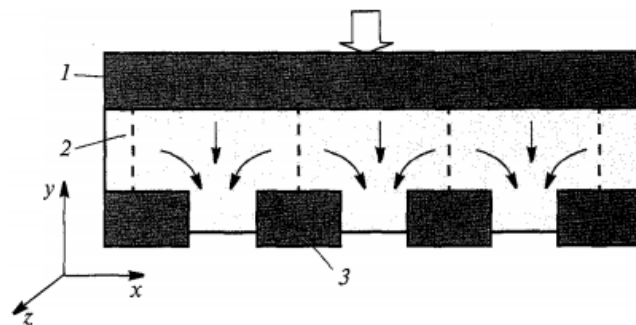


Рис. 1.13. Схема многорядного щелевого штампа и затекания в ребра:

- 1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица

Получены кинематические соотношения, позволяющие описывать деформированное состояние заготовки, что обеспечивает возможность определения силовых параметров процесса, оптимизации формы инструмента и учета влияния трения.

Следует отметить, что более сложные поковки штампуют в конструктивно более сложных штампах [25, 58], снабженных разборной

секционной многоканальной матрицей, которая состоит из множества отдельных вкладных элементов. Затекаание металла в каналы при формировании лопаток происходит между стенками консольно закреплённых рабочих элементов – вкладышей. При сборке многоразъемного штампа образуется большое количество каналов (по числу лопаток в колесе), за геометрическую характеристику которых принимается развёртка в виде плоской решетки, с помощью которой рассечённая цилиндрическая поверхность кольцевой решетки, соответствующая расположению каналов штампа, может быть представлена элементами с плоскими сечениями, через которые протекает деформируемый металл.

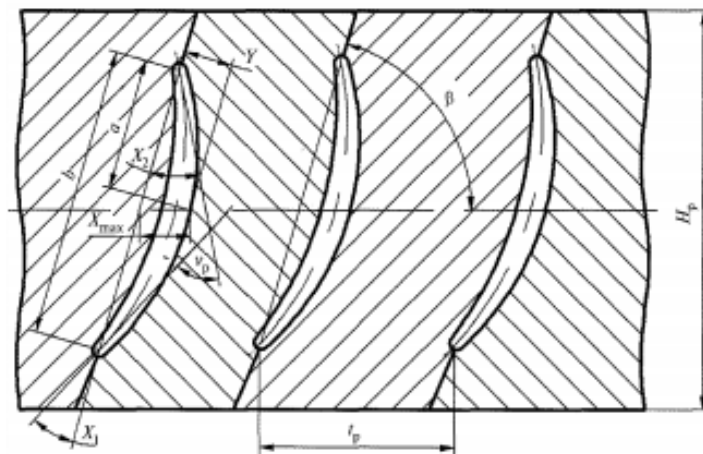


Рис. 1.14. Схема плоских решеток канала штампа: X_1 , X_2 – углы загиба кромок; v_p , β – углы установки профиля и расположения решетки; a , b – длина хорд; H_p , t_p – высота и шаг решетки

С учётом осевой симметрии рабочих колес лопаточных машин и согласно принятым правилам проектирования сложных многоразъемных штампов, рассечём каналы поверхностью вращения, проходящей по их средней линии. Через полученное сечение проходит усредненный поток металла. В развертке секущей поверхности окажутся плоские решетки с профилями каналов сложной аэродинамической формы, как показано на рис. 1.14.

На рис. 1.15 [25] показаны моноколесо турбины с 45 лопатками (а), секционная матрица, установленная на нижней плите (б) и схема штампа (в).

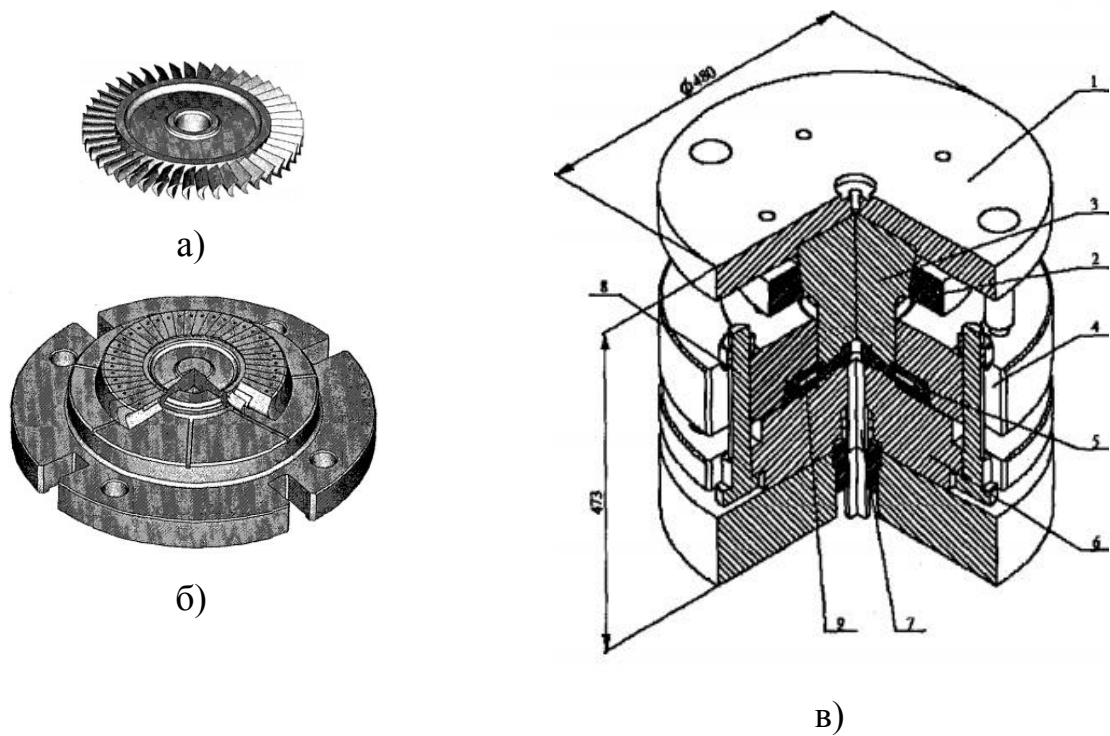


Рис. 1.15. Схема поковки и элементы многоразъемного штампа:
1 – пуансонодержатель; 2 – прижим пуансона; 3 – пуансон; 4 – обойма; 5 –
вставка; 6 – матрица; 7 – выталкиватель; 8 – болт; 9 – поковка

Поковка колеса вентилятора (а) и схема многоразъемного штампа (б) для его штамповки показаны на рис. 1.16 [25].

Внешнее спиральное ребрение на трубах получают прессованием при затекании металла заготовки в винтовые пазы (см. рис. 1.2). В работе [59] предложена методика расчета геометрических параметров инструмента, обеспечивающего получение спирального ребрения заданной геометрии без трещин и надрывов.

На рис. 1.17 собраны варианты исполнения винтовых пазов и игл для прессования поволоков со спиральными рёбрами [59].

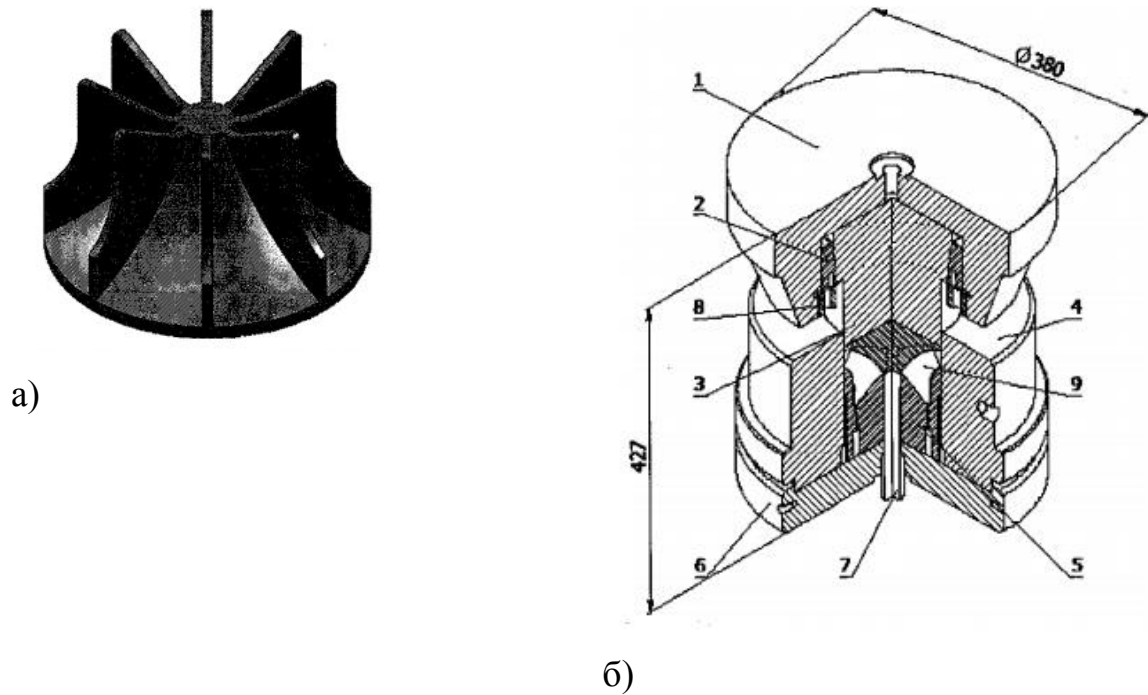


Рис. 1.16. Схемы поковки и многоразъемного штампа для выдавливания:
 1 – пуансонодержатель; 2 – кольцо конусное; 3 – пуансон; 4 – обойма; 5 –
 вставка секционная; 6 – матрица; 7 – выталкиватель; 8 – гайка прижимная;
 9 – поковка

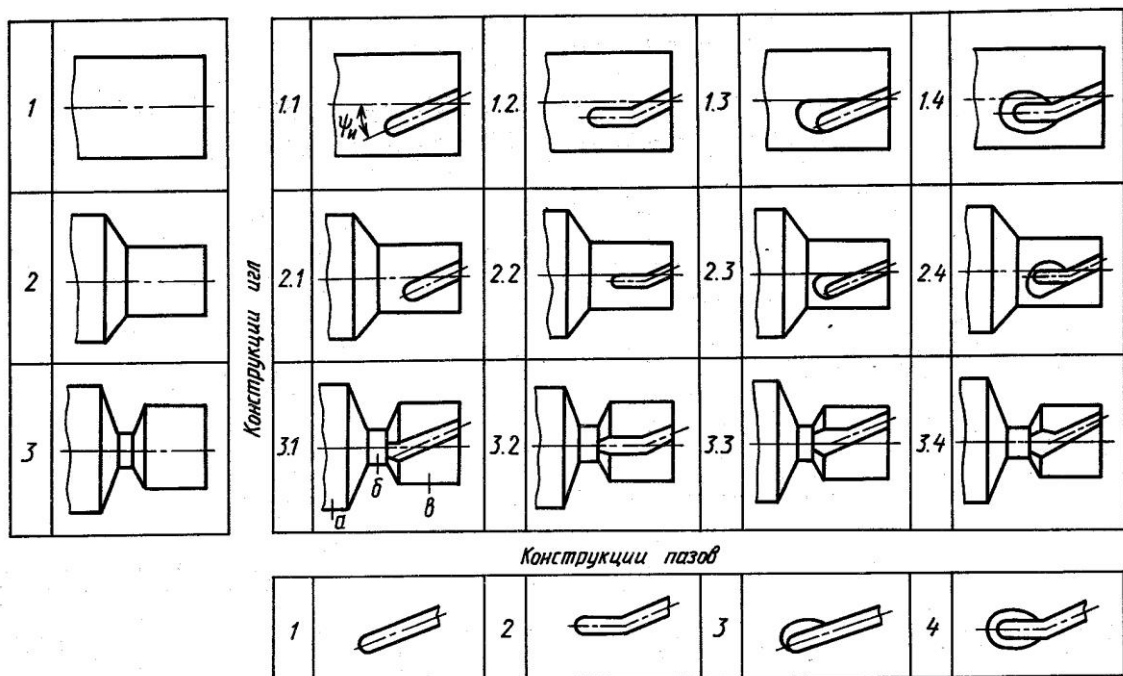


Рис. 1.17. Морфологическая матрица для рационального выбора конструкции
 игл и винтовых пазов

1.7. Условия трения при штамповке оребрѐнных поковок

Важным требованием однозначности при корректной постановке задач пластического течения является точность задания граничных условий [60]. Принятая оценка напряжений на контактной поверхности через коэффициент трения по нормальным напряжениям или сопротивлению деформированию характеризуются большой долей неопределенности при назначении коэффициентов трения для конкретных условий процессов штамповки. При формоизменении на контактных поверхностях инструмента и заготовки наблюдаются повышенные нормальные давления, которые могут значительно превысить сопротивление деформированию.

С учетом нелинейной связи напряжения трения с нормальными давлениями авторами исследований [61-63] разработаны прямые экспериментальные методы определения нормальных давлений, которые возникают в реальных процессах штамповки. Дальнейшее развитие при использовании методы получили в работах [64-66].

Процессы, сопровождающие реализацию технологии штамповки оребрѐнных изделий, усугубляются сложным течением металла в каналах штампа, постоянно изменяющимися контактными поверхностями и соответственно изменяющимися условиями трения, которые являются и без того сложным многопараметрическим процессом [61].

1.8. Теория течения при сжатии пластического слоя

Выделим достаточно широкий класс задач пластического течения материала в сравнительно тонком слое между сближающимися поверхностями инструмента. К ним примыкает большинство технологических задач обработки давлением, таких как штамповка тонкоплатных поковок, прессование тонкостенных элементов конструкций, тонколистовая прокатка. Процессы описываются сложными объемными

задачами пластического формоизменения с разнообразием параметров, определяющих свойства материала. Из-за отсутствия аналитических решений задач в объемной постановке в связи с их сложностью, вводят ряд допущений, направленных на сведение подобных задач к осесимметричной [67] или плоской постановке [68]. В рассматриваемых процессах развиваются высокие давления, на порядок превышающие сдвиговые свойства материала заготовки, так что в начальном приближении свойства металла в слое близки к свойствам гидродинамической жидкости [69,70]. Практически вдоль всей контактной поверхности наблюдается проскальзывание, при котором поверхности контакта совпадают с поверхностями скольжения и силы трения на них достигают своего наибольшего и наименьшего значений, по величине равных пределу текучести деформируемого металла [71]. Требования к точности конечной поковки определяют другую особенность этих процессов. Как известно [70], большие контактные давления вызывают нормальные упругие перемещения рабочих поверхностей тел инструмента, а, следовательно, неучет упругих перемещений тел инструмента становится неоправданным. В высокоскоростных процессах обработки давлением [72, 73] существенную роль играют силы вязкости и инерции, значительно затрудняющие моделирование физического процесса. В указанных процессах важную роль играют температура и тепловые потоки: выделение тепла за счет работы сил трения скольжения на поверхности контакта и диссипация механической энергии. Следует отметить, что в процессах обработки давлением с предварительным нагревом заготовок происходит интенсивный теплообмен со штампом, в результате чего в начальной стадии процесса наблюдается схватывание с инструментом приконтактных слоев («холодная сварка») [74]. В некоторых случаях неоправдан неучет влияния давления на трение и свойства материала (упрочнение), грубым оказывается предположение об объемной несжимаемости. Следующая особенность таких процессов состоит в том, что в них не определены граничные условия, и сами границы заранее неизвестны. В связи с чем, представляет интерес постановка

и решение нестационарной задачи о свободном растекании пластического слоя по упруго-деформируемым поверхностям [70,75]. Не исследована в достаточной мере задача осадки пластических слоев с использованием сложного нагружения (осадка с кручением и др.) [76], что существенно сказывается на распределении силовых и кинематических параметров процесса. В частности, наложение относительного вращения при осадке [76] приводит к уменьшению максимального значения контактного давления, а, следовательно, и упругой деформации инструмента. Последнее может привести к уменьшению энергозатрат, что также важно, если учесть, что мощности прессов на практике ограничены.

На основе анализа решения задачи Л.Прандтля об осадке полосы А.А. Ильюшин [69] сформулировал ряд гипотез кинематического характера и относительно сил трения на контакте, с помощью которых построил эффективную, двумерную теорию течения в пластическом слое, позволяющую качественно исследовать указанные процессы. В дальнейшем эта теория получила обоснование на случай пластического течения по упруго-деформируемым поверхностям инструмента [70], по шероховатым поверхностям с ярко выраженной фактурой (анизотропия свойств сил трения на контакте) [77, 78], для высокоскоростных процессов [73], для процессов обработки материалов как объемно сжимаемых, так и обладающих свойствами со структурной зависимостью (порошковые спеченные материалы) [77, 80].

1.8.1. Следствия из решения задачи Л. Прандтля

При выдавливании (прессовании) помещенная в контейнер матрицы плоская или цилиндрическая заготовка, воспринимая силовое воздействие со стороны пуансона, подвергается сжатию. Начало координат выбрано на линии раздела течения и рассматриваются сечения x , которые удалены от 0 и края пластического слоя $\pm L$ толщиной $h(t)$ как показано на рис. 1.18 [69]:

$$\frac{|x|}{h} > 1,0; \quad \frac{L - |x|}{h} > 1,0. \quad (1.5)$$

В рассматриваемых сечениях напряжения $\sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz}, \sigma_{yy} = \frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})$.

отличны от нуля, т.е. пластический слой находится в условиях плоского деформированного состояния [77-80].

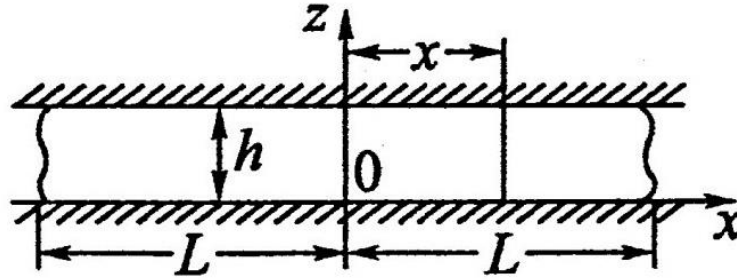


Рис. 1.18. Расчетная схема к задаче Л. Прандтля

Без учета упрочнения для идеально пластического тела интенсивности напряжений и условие текучести имеют вид:

$$\frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \equiv \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{zz}}{2}\right)^2 + \sigma_{xz}^2} = \tau_s, \quad (1.6)$$

$$\tau_i = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} = \text{const}. \quad (1.7)$$

Пренебрегая силами инерции, для определения напряжений получаем как бы статически определимую задачу:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} &= 0, \quad \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0, \\ \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{zz}}{2}\right)^2 + \sigma_{xz}^2 &= \tau_s^2. \end{aligned} \quad (1.8)$$

На самом деле, задача не является статически определимой, поскольку основное граничное условие является кинематическим, так как заданы скорости сближения верхнего и нижнего инструментов:

$$z = \frac{h(t)}{2}; \quad v = \frac{1}{2} \frac{dh}{dt}; \quad z = -\frac{h(t)}{2}; \quad v = -\frac{1}{2} \frac{dh}{dt}. \quad (1.9)$$

Поскольку кинематические граничные условия невозможно преобразовать в статические, необходимо систему уравнений дополнить условием несжимаемости [35]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (1.10)$$

и уравнением связи в виде:

$$\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2\tau_{xz}} = \frac{\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial z}}{\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x}}. \quad (1.11)$$

Необходимо также рассмотреть второе граничное условие на поверхностях контакта $z = \pm \frac{h(t)}{2}$, которое должно определить закон трения и граничные условия на поверхностях $z = \pm l$.

Мы не будем здесь приводить известное решение задачи Л. Прандтля, а ограничимся лишь его анализом. Наиболее важным следствием этого решения является наличие проскальзывания пластической массы по поверхностям контакта $\left(z = \pm \frac{h(t)}{2} \right)$ и постоянство касательного напряжения.

Как бы ни была шероховата плита, скольжение происходит в самом пластическом материале.

Кроме того, девиаторные компоненты напряжений в пластической области по отношению к среднему гидростатическому напряжению являются

малыми порядка $\frac{1}{2} \frac{h}{l}$ сравнительно с 1, а среднее гидростатическое

напряжение с той же точностью постоянно по координате z ; контактное касательное напряжение от сил трения равно пределу текучести на сдвиг, а скорость скольжения отлична от нуля, тоже можно сказать о среднем по толщине значении полуразности нормальных напряжений, которое близко к

пределу текучести на сдвиг: $\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{zz}}{2} \right)_{cp} = \frac{\pi}{4} \tau_s.$

Следствия касательно скоростей формулируются следующим образом. Скорость течения металла в направлении оси x в пластической области практически не зависит от координаты z . Разность осевой ($z = 0$) и средней по z скоростей является малой величиной порядка $\frac{h}{4l}$ от средней скорости, причем, эта разность наблюдается за счет падения скорости в тонких слоях, примыкающих к контактными поверхностям.

Скорости деформаций и их интенсивность не зависят от координаты x , причем средние значения скоростей деформации по толщине:

$$\bar{v}_{xx} = -\bar{v}_{zz} = -\frac{1}{h} \frac{dh}{dt}, \bar{v}_{xz} = 0 \quad (1.12)$$

имеют интенсивность $\bar{v}_u = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{h} \frac{dh}{dt}$. Следовательно, средние значения отношений скоростей деформаций к их интенсивности пропорциональны с постоянным множителем отношениям средних скоростей деформаций к их интенсивности:

$$\left(\frac{v_{xx}}{v_u} \right)_{cp} = \frac{\pi}{4} \frac{\bar{v}_{xx}}{\bar{v}_u}, \quad \left(\frac{v_{zz}}{v_u} \right)_{cp} = \frac{\pi}{4} \frac{\bar{v}_{zz}}{\bar{v}_u}, \quad \left(\frac{v_{xz}}{v_u} \right)_{cp} = \frac{\pi}{4} \frac{\bar{v}_{xz}}{\bar{v}_u} = 0. \quad (1.13)$$

Представленные выше следствия были выдвинуты как гипотезы, с помощью которых А.А. Ильюшин построил осредненную по толщине деформируемого слоя двумерную теорию течения, а затем предложил постановки краевых задач [69], приводимые ниже.

1.8.2. Общая квазистатическая постановка краевой задачи течения пластического слоя по плоскостям

Пусть слой из идеально-пластического материала сжимается между двумя параллельно сближающимися по нормали плоскостями жестких шероховатых плит (рис. 1.19). Основные уравнения краевой задачи в плоскости течения, согласно [74], имеют вид:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\sigma_s}{3} \frac{dt}{d\lambda} \Delta u - \frac{2\tau_s}{h} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}}, \quad (1.14)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\sigma_s}{3} \frac{dt}{d\lambda} \Delta v - \frac{2\tau_s}{h} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}}, \quad (1.15)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{d\lambda}{dt} = 0, \quad (1.16)$$

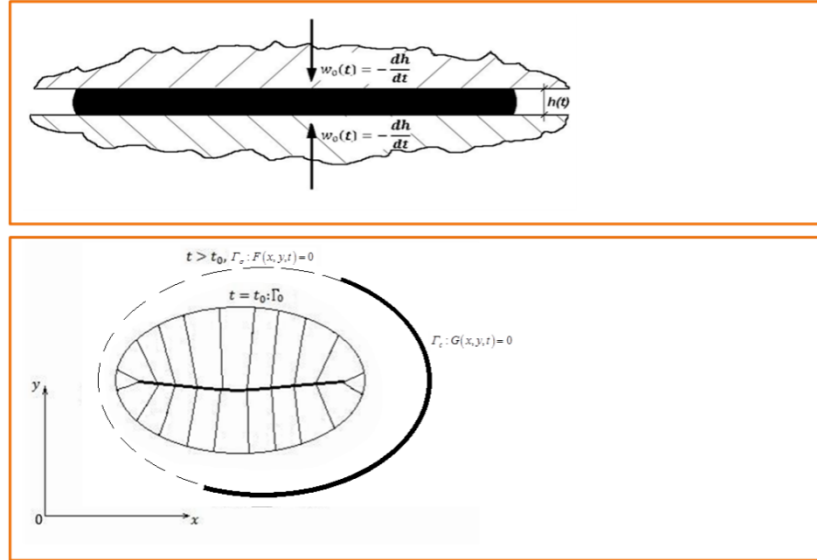


Рис.1.19. Растекание пластического образца в поперечном разрезе (а), и в плане (б).

где p, u, v – контактное давление и компоненты скорости течения; $\sigma_s = \sqrt{3}\tau_s$ – предел текучести пластического материала в рассматриваемой области; $h = h(t)$ – известный закон изменения толщины слоя. Величина $\lambda(t) = \ln(h(t_0)/h(t))$ характеризует степень деформации, где t_0 – некоторый начальный момент времени.

На свободной (подвижной), заранее неизвестной границе $\Gamma_\sigma: F(x, y, t) = 0$ задаются три граничных условия: динамическое условие равенства нулю вектора напряжений (по двумерной теории), $\vec{\sigma}^{(n)} = \vec{\sigma}\vec{n} = 0$, эквивалентно двум скалярным:

$$\sigma_{xx}n_x + \sigma_{xy}n_y = 0, \quad \sigma_{xy}n_x + \sigma_{yy}n_y = 0, \quad (1.17)$$

где $\vec{n} = (n_x, n_y) = \nabla F / |\nabla F|$ – вектор нормали к границе, а компоненты тензора напряжений $\tilde{\sigma}$ имеют вид:

$$\sigma_{xx} = -p + \frac{2}{3}\sigma_s + \frac{2}{3}\sigma_s \frac{dt}{d\lambda} \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (1.18)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{3}\sigma_s \frac{dt}{d\lambda} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad (1.19)$$

$$\sigma_{yy} = -p + \frac{2}{3}\sigma_s + \frac{2}{3}\sigma_s \frac{dt}{d\lambda} \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (1.20)$$

а также кинематическое условие «материальности» границы:

$$\partial F / \partial t + \vec{v} \cdot \nabla F = 0 \Rightarrow v_n \equiv \vec{v} \cdot \vec{n} = - \frac{\partial F / \partial t}{|\nabla F|}, \quad (1.21)$$

из которого определяется движение свободной границы.

На неподвижной (непроницаемой) границе $\Gamma_c : G(x, y, t) = 0$ задаются два условия: динамическое условие равенства предельному значению величины тангенциальной составляющей вектора напряжений

$$|\vec{\sigma}^{(n)} \cdot \vec{\tau}| = |\sigma_{xx} n_x n_y + \sigma_{xy} (n_y^2 - n_x^2) - \sigma_{yy} n_x n_y| = \tau_s, \quad (1.22)$$

где $\vec{\tau} = (n_y, -n_x)$ касательный к границе вектор, и кинематическое условие непроницаемости стенки:

$$v_n \equiv \vec{v} \cdot \vec{n} = 0 \Rightarrow \vec{v} \cdot \nabla G = 0. \quad (1.23)$$

Условий (1.17)–(1.23) достаточно для решения краевой задачи с подвижными и неподвижными границами в области течения, описываемого системой уравнений (1.14)–(1.16).

Чтобы перейти к безразмерному описанию задачи, определим характерные величины длины l_0 , скорости $v_0 = -(dh(t=t_0)/dt)/\varepsilon$ и контактного давления $p_0 = \sigma_s/\varepsilon$, где $\varepsilon = h_0/l_0 \ll 1$ – малый параметр, характеризующий относительную толщину пластического слоя (толщина слоя обезразмеривается на h_0 , время на l_0/v_0). Тогда, в безразмерных величинах уравнения (1.14)–(1.16) будут иметь вид:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\varepsilon}{3\lambda'} \Delta u - \frac{2}{\sqrt{3}h} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}}, \quad (1.24)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\varepsilon}{3\lambda'} \Delta v - \frac{2}{\sqrt{3}h} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}}, \quad (1.25)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \lambda', \quad (1.26)$$

где $\lambda' = -\frac{1}{h} \frac{dh}{dt}$. Отметим наличие малого параметра ε в членах со старшими производными.

1.8.3. Постановка задачи в рамках модели «идеальной жидкости»

В модели «идеальной жидкости» малый параметр $\varepsilon = 0$, а уравнения (1.24)–(1.26) приобретают вид:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{2}{\sqrt{3}h} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}}, \quad (1.27)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{2}{\sqrt{3}h} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}}, \quad (1.28)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \lambda'. \quad (1.29)$$

Отметим, что в рассматриваемой модели выполнены условия полной пластичности так, что

$$\sigma_{zz} = -p, \quad \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = -p + \sigma_s. \quad (1.30)$$

Эта система дифференциальных уравнений имеет более низкий порядок и, вследствие этого, требует меньшего количества граничных условий.

При условии равенства касательного напряжения на контактной поверхности сопротивлению деформирования при сдвиге $\tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$ градиентом тангенциальных скоростей движения в направлении нормали к

поверхности контакта можно пренебречь и из всех напряжений учитывать только среднее давление p и касательное напряжение на контактных поверхностях $\tau_s(p)$, которое описывается известными функциями от p (по законам Кулона или Прандтля–Зибеля).

Условия трения на контактных поверхностях [81]:

$$\sigma_{mp} = k\tau_s(p), \quad (1.31)$$

k – функция координат.

В области Прандтлева трения:

$$k = 1; \tau_s = \frac{\sigma_s}{2}; p \geq \frac{\sigma_s}{2\mu}, \quad (1.32)$$

μ – фактор трения.

В области прилипания по Е.П. Унксову [71]:

$$k = \frac{r}{h}; \tau_s = \frac{\sigma_s}{2}; r \leq h, \quad (1.33)$$

где r – кратчайшее расстояние от рассматриваемой точки до точек раздела течения.

А.А. Ильюшиным также предложена при построении эпюр контактных давлений p аналогия с ординатой z песчаной насыпи [69]:

$$p = \frac{z}{\mu h}. \quad (1.34)$$

1.9. Выводы по главе 1

1. Оребрѐнные детали представляют собой большой класс деталей разного технического назначения, которые в зависимости от геометрической формы и габаритных размеров могут быть изготовлены с применением различных промышленных технологий, в том числе, способами обработки металлов давлением с достаточно большим коэффициентом использования металла, например, для группы поковок с продольными рѐбрами могут быть применены процессы прямого, радиального и комбинированного

выдавливания.

2. Проектирование технологии холодной штамповки поковок с продольными рёбрами и штамповки с предварительным нагревом заготовок осуществляется по традиционной схеме с учетом производственного опыта, руководствуясь системой геометрических ограничений для различных штамповочных переходов. Режимы деформирования назначают в зависимости от марки штампуемого металла и результатов анализа кривых пластичности, принимая во внимание силовые параметры на переходах штамповки и ограничения по степеням деформации.

3. При формоизменении на окончательных переходах с помощью процессов выдавливания на контактных поверхностях инструмента и заготовки наблюдаются повышенные нормальные давления, которые могут значительно превысить сопротивление деформированию и разрушить смазочный слой, поэтому условия трения, описываемые фактором трения Прандтля–Зибеля, следует выбирать для каждого конкретного случая выдавливания с учетом марки деформируемого металла и температурно-скоростных условий по методике А.Н. Леванова.

4. Исследование напряженно–деформированного состояния металла в очаге деформации и расчет силовых параметров проводится с помощью компьютерного моделирования, аналитическими методами с получением расчетных зависимостей и экспериментально–аналитическими методами, среди которых планирование многофакторного эксперимента. Однако аналитические зависимости для расчета контактных давлений, сил деформирования, компонент перемещений, скоростей и деформаций применительно к поковкам, имеющим тонкие рёбра, отсутствуют, но могут быть получены решением краевой задачи в рамках модели «идеальной жидкости».

5. Для реализации технологических процессов выдавливания оребрѐнных поковок применяется сложная штамповая оснастка, конструкция которой зависит от геометрических параметров (количества, формы и

взаимного расположения рёбер), от пластических свойств деформируемого металла и исполнения рабочих деталей штампа (неразборные или секционные). Однако приемлемых конструктивных решений штампов для формообразования тонких рёбер с использованием противодействия в технической литературе не обнаружено.

6. Для уменьшения массы стабилизаторов следует использовать алюминиевые сплавы с прочностными характеристиками, не уступающими стальным изделиям, и с повышенными пластическими свойствами, необходимыми для формоизменения поковок пластическим деформированием, например, сплавы АК6 деформируемый ГОСТ 4784-97 и АК7 литейный ГОСТ 1583-93.

1.10. Цель и задачи исследования

Целью работы является проведение исследований технологического процесса прямого выдавливания заготовок из алюминиевых сплавов с подтверждением возможности получения продольных рёбер на стержневой части поковок для совершенствования процесса изготовления, заключающегося в замене сварных конструкций и полученных фрезерованием, с повышением производительности и коэффициента использования металла.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- разработать математическую модель процесса выдавливания поковки, имеющей продольные рёбра для оценки контактных давлений, силовых параметров и деформированного состояния заготовки в процессе штамповки с получением аналитических зависимостей;

- оценить влияние геометрических размеров на технологические параметры прямого выдавливания оребрённых поковок такие, как контактное давление, сила деформирования, компоненты перемещений, деформаций,

скоростей деформаций, а также выявить характер изменения этих параметров;

- разработать методику проектирования технологических процессов штамповки поковки с продольными рёбрами и создать алгоритм выбора рационального варианта;

- спроектировать новые конструкции штамповой оснастки для реализации наиболее сложной операции прямого выдавливания;

- выполнить экспериментальные исследования операции прямого выдавливания для получения поковок с продольными рёбрами из алюминиевых сплавов двух марок АК6 и АК7 при разных технологических режимах;

- использовать результаты исследований в промышленности и учебном процессе.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПРЯМОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПОКОВКИ С ПРОДОЛЬНЫМИ РЁБРАМИ

2.1. Постановка краевой задачи

Для расчета силовых параметров процесса выдавливания оребрённых поковок воспользуемся математической постановкой задачи, предложенной А.А. Ильюшиным [69] и основанной на модели «идеальной жидкости».

По мере совершения пуансоном рабочего хода, интенсивность напряжений увеличивается и при достижении ею предела текучести, металл начинает течь в сторону наименьшего сопротивления, т.е. в открытые участки контейнера матрицы. При изготовлении оребрённых поковок этими участками являются каналы, которые по форме, расположению и числу, необходимы для получения поковки заданной конфигурации [82].

В рассматриваемом технологическом процессе прямого выдавливания внутренние касательные напряжения в слое постоянной толщины пренебрежимо малы $\tau_{\rho\varphi} = 0$ по сравнению с нормальными напряжениями, причем два нормальных напряжения в поперечных сечениях являются главными и равны между собой $\sigma_1 = \sigma_2 = -q$, а третье нормальное напряжение постоянно по толщине деформируемого слоя и равно контактному давлению на инструмент $-\sigma_3 = p$ в силу (1.30), которое определяется из условия пластичности $\sigma_s = p - q$ по соотношению $-\sigma_3 = p = q + \sigma_s$. Эти свойства деформируемого металла названы условием полной пластичности [67, 69]. В дополнение к этому принимаются условия трения и кинематические условия, описанные в разделах 1.7 и 1.8.3.

При затекании металла в каналы, образующие рёбра, его объем должен подчиняться пропорциональной зависимости от длины линии тока, берущей начало в точке раздела течения. Опираясь на принятые в теории пластичности гипотезы, что в каждый момент деформирования сжимаемый слой металла имеет постоянную толщину; элементы пластической

деформации идут в тонких полосах скольжения; поперечные сечения заготовки остаются плоскими, дополнительно принимаем, то обстоятельство, что линии тока являются прямыми, перпендикулярными к линиям уровня, которые в свою очередь характеризуются постоянным контактным давлением [70, 83].

Форма донной части контейнера согласуется с формой выдавливаемой поковки, в этом случае удастся обеспечить равномерное затекание металла в каналы, расположенные по наружному контуру поковки, при условии, что ширина пазов будет пропорциональна расходу металла в каждой точке паза [84]. Это требование также сведет к минимуму возможное коробление выдавленных ребер и образование трещин.

Приняв известный закон изменения контактного давления вдоль действительного контура, можно определить линии уровня, а значит и линии тока [85–88].

2.2. Расчетная схема процесса прямого выдавливания и граничные условия

В соответствии с классификацией оребрённых поковок по конструктивно-технологическим признакам, приведенной в работе [25], поковка, изображенная на рис. 2.1, относится к радиальным крыльчаткам, имеющим плоские рёбра, которые могут быть изготовлены прямым выдавливанием. С помощью двух плоскостей, проходящих через вертикальную ось симметрии, по средним линиям двух соседних рёбер, вырежем из поковки круговой сектор и спроецируем этот элемент на плоскость, перпендикулярную вертикальной оси z . Зафиксируем круговой сектор в декартовой системе координат на плоскости xu с началом координат в точке O на пересечении проекций секущих плоскостей, как показано на рис. 2.2. Линии, ограничивающие рёбра поковки, в которые затекает металл,

проходят через характерные точки A_1, A_2, A_3, A_4 . Радиусы OO_1 и OO_2 являются срединными линиями рёбер.

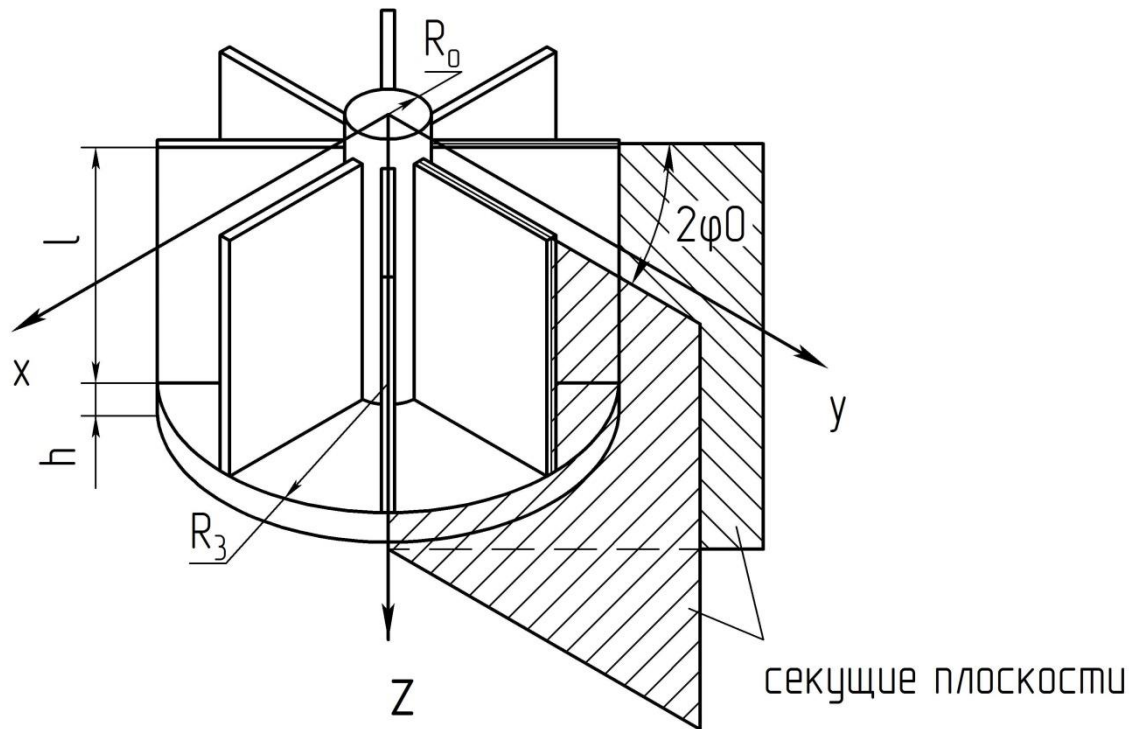


Рис. 2.1. Цельноштампованная поковка с продольным оребрением

Перейдем в задаче к цилиндрической системе координат r, φ, z . Обозначим $OA_1=R_0$; $OA_2=R_3$ и рассмотрим $\angle O_1OO_2 = 2\varphi_0$.

Обозначим $\angle A_1OO_1 = \bar{\varphi}_0$; $\angle A_2OO_2 = \bar{\bar{\varphi}}_0$.

По теореме косинусов найдем интересующие нас углы $\bar{\varphi}_0, \bar{\bar{\varphi}}_0$.

$$R_0^2 + R_0^2 - 2R_0^2 \cos \bar{\varphi}_0 = h^2; \quad (2.1)$$

$$2R_0^2 - 2R_0^2 \cos \bar{\varphi}_0 = h^2;$$

$$\cos \bar{\varphi}_0 = \frac{2R_0^2 - h^2}{2R_0^2}.$$

$$\cos \bar{\varphi}_0 = 1 - \frac{h^2}{2R_0^2};$$

$$\bar{\varphi}_0 = \arccos \left(1 - \frac{h^2}{2R_0^2} \right); \text{ по аналогии } \bar{\bar{\varphi}}_0 = \arccos \left(1 - \frac{h^2}{2R_3^2} \right) \quad (2.2)$$

h – толщина фланцевой части заготовки.

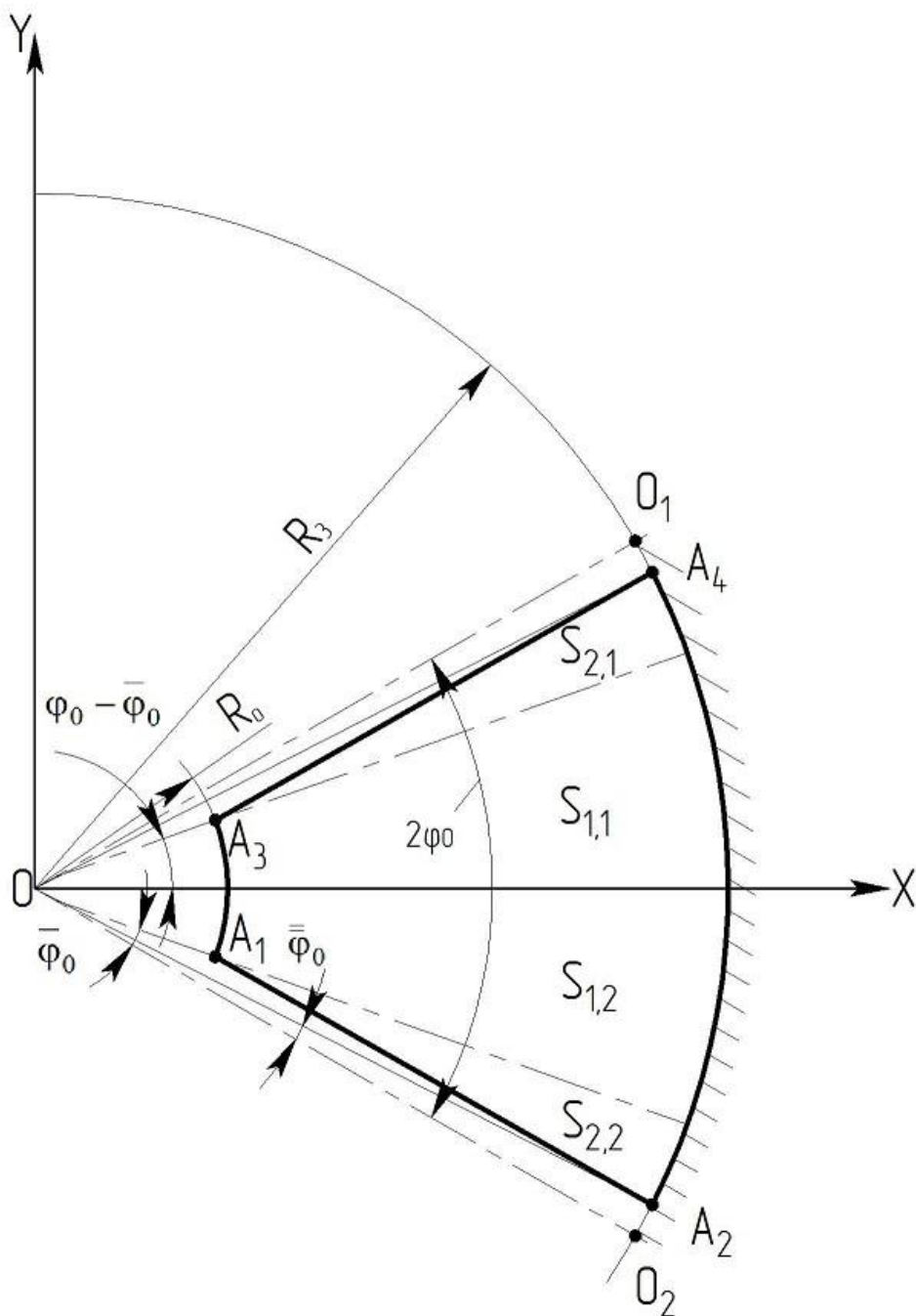


Рис. 2.2. Геометрические параметры выделенного элемента фланцевой части поковки в плоскости xy

2.2.1. Последовательность решения

Согласно расчетной схеме (см. рис. 2.2) область течения S будем рассматривать в виде объединения областей, представленных в цилиндрических координатах:

$$S = S_1 \cup S_2, \text{ при этом } S_1 = S_{1,1} \cup S_{2,1} \text{ и } S_2 = S_{1,2} \cup S_{2,2}.$$

$$S_1 = \left\{ (r, \varphi) \left| \begin{array}{l} -\varphi_0 + \bar{\varphi}_0 < \varphi < \varphi_0 - \bar{\varphi}_0 \\ R_0 < r < R_3 \end{array} \right. \right\}; \quad (2.3)$$

$$R = R(\varphi) = R_\delta(\varphi); \quad (2.4)$$

$$S_2 = \left\{ (r, \varphi) \left| \begin{array}{l} \varphi_0 - \bar{\varphi}_0 < \varphi < \varphi_0 - \bar{\varphi}_0 \\ R_\delta(\varphi) < r < R_3 \end{array} \right. \right\}. \quad (2.5)$$

Составим уравнение прямой, проходящую через точки A_3 и A_4 с координатами $A_3(R_0, \varphi_0 - \bar{\varphi}_0)$; $A_4(R_3, \varphi_0 - \bar{\varphi}_0)$:

в декартовой системе координат:

$$\frac{x - x_3}{x_4 - x_3} = \frac{y - y_3}{y_4 - y_3}; \quad (2.6)$$

в цилиндрической системе координат:

$$A_3(R_0 \cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0), R_0 \sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0));$$

$$A_4(R_3 \cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0), R_3 \sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)).$$

$$\frac{x - R_0}{R_3 - R_0} = \frac{y - (\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)}{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} \quad (2.7)$$

При подстановке значений координат уравнение рассматриваемой прямой в цилиндрической системе координат примет вид:

$$\frac{R_\delta(\varphi) \cos \varphi - R_0 \cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)}{R_3 \cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) - R_0 \cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)} = \frac{R_\delta(\varphi) \sin \varphi - R_0 \sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)}{R_3 \sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) - R_0 \sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)}; \quad (2.8)$$

$$\frac{R_{\delta}(\varphi)\cos\varphi - R_0\cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)}{R_{\delta}(\varphi)\sin\varphi - R_0\sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)} = \frac{R_3\cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) - R_0\cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)}{R_3\sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) - R_0\sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)} = \Phi_{OB}.$$

После преобразований:

$$R_{\delta}(\varphi)\cos\varphi - R_0\cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) = \Phi_{OB}(R\sin\varphi - R_0\sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0));$$

$$R_{\delta}(\varphi)(\cos\varphi - \Phi_{OB}\sin\varphi) = R_0(\cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) - \Phi_{OB}\sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0));$$

$$R_{\delta}(\varphi) = \frac{R_0(\cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) - \Phi_{OB}\sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0))}{\cos\varphi - \Phi_{OB}\sin\varphi}. \quad (2.9)$$

Проведем очевидные преобразования по упрощению (2.9), учитывая, что рассматриваемые углы малы, получим уравнение:

$$\begin{aligned} R_{\delta}(\varphi) &= \frac{R_0}{\cos\varphi - \Phi_{OB}\sin\varphi} = -\frac{R_0}{\sqrt{1 + \Phi_{OB}^2} \cdot \sin(\varphi - \arctg \frac{1}{\Phi_{OB}})} = \\ &= -\frac{R_0}{\sqrt{1 + \Phi_{OB}^2}} \cdot \frac{1}{\sin(\varphi - A)} \end{aligned} \quad (2.10)$$

где

$$A = \arctg \frac{1}{\Phi_{OB}}.$$

Разложим в степенной ряд тригонометрическую функцию в знаменателе множителя (2.10):

$$\sin(\varphi - A) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{(\varphi - A)^{2n+1}}{(2n+1)!} = (\varphi - A) - \frac{(\varphi - A)^3}{3!} + \dots;$$

и возьмём только первый член ряда, тогда

$$R_{\delta}(\varphi) = -\frac{R_0}{\sqrt{1 + \Phi_{OB}^2}} \cdot \frac{6}{6(\varphi - A) - (\varphi - A)^3} = \frac{6R_0}{\sqrt{1 + \Phi_{OB}^2}} \cdot \frac{1}{(\varphi - A)^3 - 6(\varphi - A)}; \quad (2.11)$$

или

$$R_{\delta}(\varphi) = -\frac{R_0}{\sqrt{1 + \Phi_{OB}^2}} \cdot \frac{1}{\varphi - A}. \quad (2.12)$$

Согласно принятой общей постановки краевой задачи пластического течения, описанной в разделе 1.8.2, основные дифференциальные уравнения в векторной форме образуют систему:

$$\text{grad} p = -\frac{2\tau_s}{h} \frac{\bar{v}}{|\bar{v}|}; \quad (2.13)$$

$$\text{div} \bar{w} - \frac{d\lambda}{dt} = 0. \quad (2.14)$$

Уравнения (2.13) известны [35] как динамические уравнения Эйлера, а уравнение (2.14) как условие несжимаемости в эйлеровом пространстве.

Давление на контактной поверхности возрастает с наибольшей скоростью в направлении градиента:

$$\text{grad} p = \frac{\partial p}{\partial x} i + \frac{\partial p}{\partial y} j + \frac{\partial p}{\partial z} k,$$

где i, j, k – единичный ортонормированный базис декартовой системы координат.

Проекции вектора скорости $\bar{v}$ (u, v, w), модуль вектора скорости $|\bar{v}| = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$, тогда $\frac{\bar{v}}{|\bar{v}|} = \frac{u}{|\bar{v}|} i + \frac{v}{|\bar{v}|} j + \frac{w}{|\bar{v}|} k$.

$$\text{div} \bar{w} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}.$$

Для плоского деформированного состояния система уравнений (2.13), (2.14) преобразуется к виду [82,86]:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{2\tau_s}{h} \cdot \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}}; \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{2\tau_s}{h} \cdot \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}}; \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial \lambda}{\partial t} = 0. \quad (2.17)$$

Поскольку рассматриваемые пластические области имеют криволинейные границы, для удобства осуществим переход к цилиндрической системе координат. Координаты двух систем связаны [89]

$$\begin{cases} x = \rho \cos \varphi; \\ y = \rho \sin \varphi; \\ z = z. \end{cases}$$

Давление в цилиндрической системе координат $p = p(\rho, \varphi, z)$ и ее градиент $grad \bar{p} = \frac{\partial p}{\partial \rho} \bar{e}_\rho + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \bar{e}_\varphi + \frac{\partial p}{\partial z} \bar{e}_z$, где e_ρ, e_φ, e_z - единичный ортонормированный базис, функционально связанный с базисом i, j, k уравнениями:

$$\begin{aligned} e_\rho &= \frac{\partial x}{\partial \rho} i + \frac{\partial y}{\partial \rho} j + \frac{\partial z}{\partial \rho} k \\ e_\varphi &= \frac{\partial x}{\partial \varphi} i + \frac{\partial y}{\partial \varphi} j + \frac{\partial z}{\partial \varphi} k \\ e_z &= \frac{\partial x}{\partial z} i + \frac{\partial y}{\partial z} j + \frac{\partial z}{\partial z} k \end{aligned} \quad (2.18)$$

поэтому матрица перехода от декартовой системы координат к цилиндрической представляет собой матрицу Якоби [90]:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \rho} & \frac{\partial x}{\partial \varphi} & \frac{\partial x}{\partial z} \\ \frac{\partial y}{\partial \rho} & \frac{\partial y}{\partial \varphi} & \frac{\partial y}{\partial z} \\ \frac{\partial z}{\partial \rho} & \frac{\partial z}{\partial \varphi} & \frac{\partial z}{\partial z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\cos \varphi)(-\rho \sin \varphi)(0) \\ (\sin \varphi)(\rho \cos \varphi)(0) \\ (0)(0)(1) \end{pmatrix}. \quad (2.19)$$

В этом случае вектор скорости $\bar{v} = \bar{v}(u_\rho, v_\varphi, w_z)$ и его дивергенция

$$div \bar{v} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\rho u_\rho)}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \quad \text{или} \quad div \bar{v} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho u_\rho}{\partial \rho} + \frac{\rho \partial u_\rho}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial w_z}{\partial z}.$$

После раскрытия скобок имеем:

$\text{div} \bar{v} = \frac{\partial u_\rho}{\partial \rho} + \frac{u_\rho}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial w_z}{\partial z}$. Условие несжимаемости примет вид:

$$\frac{\partial u_\rho}{\partial \rho} + \frac{u_\rho}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial w_z}{\partial z} - \frac{\partial \lambda}{\partial t} = 0. \quad (2.20)$$

Векторное уравнение (2.13) в явном виде:

$$\frac{\partial p}{\partial \rho} \bar{e}_\rho + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \bar{e}_\varphi + \frac{\partial p}{\partial z} \bar{e}_z = - \frac{2\tau_s}{h} \frac{u_\rho \bar{e}_\rho + v_\varphi \bar{e}_\varphi + w_z \bar{e}_z}{\sqrt{u_\rho^2 + v_\varphi^2 + w_z^2}}. \quad (2.21)$$

Принимая во внимание наши рассуждения, для плоского деформированного состояния в цилиндрической системе координат имеем следующую постановку [88]:

$$\frac{\partial p}{\partial \rho} = - \frac{2\tau_s}{h} \cdot \frac{u_\rho}{\sqrt{u_\rho^2 + v_\varphi^2}}; \quad (2.22)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \varphi} = - \frac{2\tau_s}{h} \cdot \frac{v_\varphi}{\sqrt{u_\rho^2 + v_\varphi^2}}; \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial u_\rho}{\partial \rho} + \frac{u_\rho}{\rho} + \frac{\partial v_\varphi}{\rho \partial \varphi} - \frac{d\lambda}{dt} = 0; \quad (2.24)$$

где выражение (2.24) является условием несжимаемости;

$\lambda = \lambda(t) = \ln \frac{h_0}{h}$ – степень накопленной деформации;

h – конечная толщина деформируемого фланца.

Область очага деформации S_{11} ограничена радиусами и углами (см. рис. 2.2):

$$S_{1,1} = \left\{ (r, \varphi) \left| \begin{array}{l} 0 < \varphi < \varphi_0 - \bar{\varphi}_0 \\ R_0 < r < R_3 \end{array} \right. \right\}. \quad (2.25)$$

На границе этой области компонента скорости $v_\varphi = 0$, как показано на рис.

2.3, и при её подстановке в (2.22) и (2.23) имеем следующие уравнения:

Искомое контактное давление в рассматриваемой области:

$$p_{1,1} = \frac{2\tau_s}{h} r + 2\tau_s \left(1 - \frac{R_0}{h}\right). \quad (2.28)$$

С учетом компоненты скорости $v_\varphi \approx 0$ условие несжимаемости (2.24) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} - \frac{d\lambda}{dt} = 0. \quad (2.29)$$

Истинная степень деформации в момент времени деформирования t :

$$\lambda(t) = \ln \frac{h_0}{h} = \ln h_0 - \ln h. \quad (2.30)$$

После дифференцирования по времени $\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{1}{h} \frac{dh}{dt}$ и подстановки в (2.29) получим дифференциальное уравнение, выражающее условие несжимаемости, в виде:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = 0, \quad (2.31)$$

которое необходимо проинтегрировать для нахождения компоненты скорости v_r .

Разделяем переменные в уравнении (2.31):

$$\frac{1}{r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_r \right) + \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = 0;$$

$$\frac{\partial(rv_r)}{\partial r} = -r \frac{1}{h} \frac{dh}{dt};$$

После интегрирования:

$$rv_r = -\frac{r^2}{2} \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} + C_{1,1};$$

$$v_r = -\frac{1}{2} r \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} + \frac{C_{1,1}}{r}, \quad (2.32)$$

где $C_{1,1}$ – постоянная интегрирования, которую определим из граничных условий при $r = R_3$ скорость $v_r = 0$:

$$0 = -\frac{R_3^2}{2} \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} + C_{1,1};$$

$$C_{1,1} = \frac{R_3^2}{2h} \cdot \frac{dh}{dt}.$$

Подстановка $C_{1,1}$ в выражение (2.32) для компоненты скорости приводит к уравнению:

$$v_r = \frac{R_3^2 - r^2}{r2h} \cdot \frac{dh}{dt}. \quad (2.33)$$

Проинтегрируем уравнение (2.33):

$$\int v_r dt = \frac{R_3^2 - r^2}{2r} \int \frac{dh}{h};$$

И в результате получим перемещение:

$$u_r = \frac{R_3^2 - r^2}{2r} \ln|h| + \ln C. \quad (2.34)$$

Определим постоянную интегрирования C , воспользовавшись граничным условием при $r = R_3$ перемещение $u_r = 0$, тогда $C = 0$. При подстановке значения постоянной интегрирования в уравнение для определения радиального перемещения получим $u_r = f(h)$:

$$u_r = \frac{R_3^2 - r^2}{2r} \ln|h|. \quad (2.35)$$

Сила штамповки в пластической области $S_{1,1}$:

$$\begin{aligned} P_{S_{1,1}} &= \iint_{S_{1,1}} p_1 r dr d\varphi = \int_{R_0}^{R_3} r dr \int_0^{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} \left(\frac{2\tau_s r}{h} + 2\tau_s \left(1 - \frac{R_0}{h}\right) \right) d\varphi = \\ &= \int_{R_0}^{R_3} \left(\frac{2\tau_s r(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)}{h} + 2\tau_s \left(1 - \frac{R_0}{h}\right) (\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) \right) r dr = \end{aligned} \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{2\tau_s r^3}{3h} (\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) \Big|_{R_0}^{R_3} + 2\tau_s \left(1 - \frac{R_0}{h}\right) (\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) \frac{r^2}{2} \Big|_{R_0}^{R_3} \\ P_{S_{1,1}} &= \frac{2\tau_s}{3h} (R_3^3 - R_0^3) (\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) + \tau_s \left(1 - \frac{R_0}{h}\right) (\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) (R_3^2 - R_0^2). \end{aligned} \quad (2.37)$$

Рассмотрим следующую пластическую область $S_{2,1}$, ограниченную радиусами и углами:

$$S_{2,1} = \left\{ (r, \varphi) \left| \begin{array}{l} \varphi_0 - \bar{\varphi}_0 < \varphi < \varphi_0 - \bar{\varphi}_0 \\ R_\delta(\varphi) < r < R_3 \end{array} \right. \right\} \quad (2.38)$$

На границе этой области компонента скорости $v_r \approx 0$, поэтому уравнение (2.22) примет вид $\frac{\partial p}{\partial r} = 0$, уравнение (2.23) преобразуется в выражение $\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} = -\frac{2\tau_s}{h}$, которое после интегрирования даст соотношение для расчета давления:

$$p_{2,1} = -\frac{2\tau_s}{h} r \cdot \varphi + C_{2,1}. \quad (2.39)$$

Постоянную интегрирования найдем из граничных условий при $r = R_\delta(\varphi)$ $p = 2\tau_s$ и после подстановки в (2.39) получим выражение:

$$2\tau_s = -\frac{2\tau_s}{h} R_\delta(\varphi) \cdot \varphi + C_{2,1},$$

$$C_{2,1} = 2\tau_s \left(1 + \frac{R_\delta(\varphi)}{h} \cdot \varphi \right).$$

Окончательно давление в рассматриваемой пластической области:

$$p_{2,1} = -\frac{2\tau_s}{h} \cdot r \cdot \varphi + 2\tau_s \left(1 + \frac{R_\delta(\varphi)}{h} \cdot \varphi \right). \quad (2.40)$$

Из условия несжимаемости (2.24) находим скорость v_φ :

$$\frac{\partial v_\varphi}{r \partial \varphi} + \frac{1}{h} \cdot \frac{dh}{dt} = 0. \quad (2.41)$$

После разделения переменных $\partial v_\varphi = -\frac{r}{h} \cdot \frac{dh}{dt} \cdot \partial \varphi$ и интегрирования имеем

$$v_\varphi = -\frac{r}{h} \cdot \frac{dh}{dt} \cdot \varphi + C_{2,0}. \quad (2.42)$$

Постоянную интегрирования $C_{2,0}$ найдем из граничных условий $v_\varphi \approx 0$ при $\varphi = \varphi_0 - \bar{\varphi}_0$:

$C_{2,0} = \frac{r}{h} \cdot \frac{dh}{dt} (\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)$ и, подставив в уравнение для определения компоненты скорости (2.42), получим:

$$v_\varphi = -\frac{r}{h} \cdot \frac{dh}{dt} (\varphi - (\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)). \quad (2.43)$$

Для определения перемещения $u_\varphi = f(h)$ проинтегрируем выражение (2.43):

$$\int v_\varphi dt = -r [\varphi - (\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)] \frac{dh}{h};$$

$$u_\varphi = -r [\varphi - (\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)] \ln|h| + C. \quad (2.44)$$

Постоянную интегрирования C определим, используя граничные условия, при $\varphi = 0$ перемещение $u_\varphi = 0$:

$$C = r(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) \ln|h|,$$

тогда:

$$\begin{aligned} u_\varphi &= -r[\varphi - (\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)] \ln|h| + r(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) \ln|h| \quad \text{или} \\ u_\varphi &= -r\varphi \ln|h|. \end{aligned} \quad (2.45)$$

Найдем силу штамповки в пластической области $S_{2,1}$:

$$\begin{aligned} P_{S_{2,1}} &= \iint_{S_{2,1}} p_{2,1} r dr d\varphi = \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} d\varphi \int_{R_\delta(\varphi)}^{R_3} \left(-\frac{2\tau_s r}{h} \varphi + 2\tau_s + 2\tau_s \frac{R_\delta(\varphi)}{h} \varphi \right) r dr = \\ &= 2\tau_s \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} d\varphi \int_{R_\delta(\varphi)}^{R_3} \left(-\frac{r^2}{h} \varphi + r + \frac{R_\delta(\varphi)}{h} \varphi r \right) dr = \\ &= 2\tau_s \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} d\varphi \cdot \left(-\frac{r^3}{3h} \varphi + \frac{r^2}{2} \left(1 + \frac{R_\delta(\varphi)}{h} \cdot \varphi \right) \right) \Bigg|_{R_\delta(\varphi)}^{R_3} \end{aligned} \quad (2.46)$$

Подставим пределы интегрирования:

$$\begin{aligned} P_{S_{2,1}} &= 2\tau_s \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} \left(\frac{R_\delta^3(\varphi) \cdot \varphi}{3h} - \frac{R_3^3}{3h} \varphi + \frac{R_3^2}{2} \left(1 + \frac{R_\delta(\varphi)\varphi}{h} \right) - \frac{R_\delta^2(\varphi)}{2} \left(1 + \frac{R_\delta(\varphi)}{h} \varphi \right) \right) d\varphi = \\ &= 2\tau_s \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} \left(\frac{R_\delta^3(\varphi) \cdot \varphi}{3h} - \frac{R_\delta^3(\varphi) \cdot \varphi}{2h} - \frac{R_\delta^2(\varphi)}{2} + \frac{R_3^2 R_\delta(\varphi)\varphi}{2h} - \frac{R_3^3}{3h} \varphi + \frac{R_3^2}{2} \right) d\varphi = \\ &= 2\tau_s \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} \left(-\frac{R_\delta^3(\varphi) \cdot \varphi}{6h} - \frac{R_\delta^2(\varphi)}{2} + \frac{R_3^2 R_\delta(\varphi)\varphi}{2h} - \frac{R_3^3}{3h} \varphi + \frac{R_3^2}{2} \right) d\varphi \end{aligned} \quad (2.47)$$

Разобьем интеграл на составляющие:

$$P_{S_{2,1}} = 2\tau_s \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} \left(-\frac{R_\delta^3(\varphi) \cdot \varphi}{2h} \right) d\varphi - 2\tau_s \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} \frac{R_\delta^2(\varphi)}{2} d\varphi + \frac{R_3^2}{2h} \cdot 2\tau_s \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} R_\delta(\varphi)\varphi d\varphi -$$

$$-\frac{2\tau_s}{3h}R_3^3 \cdot \frac{\varphi^2}{2} \Big|_{\varphi_0-\bar{\varphi}_0}^{\varphi_0-\bar{\varphi}_0} + \frac{R_3^2}{2} \cdot \varphi \Big|_{\varphi_0-\bar{\varphi}_0}^{\varphi_0-\bar{\varphi}_0}. \quad (2.48)$$

Подставим найденное значение $R_\delta(\varphi)$ (2.12) в уравнение (2.48) и отдельно проинтегрируем слагаемые, входящие в его состав.

Слагаемое I.

$$\int_{\varphi_0-\bar{\varphi}_0}^{\varphi_0-\bar{\varphi}_0} \left(-\frac{R_\delta^3(\varphi)\varphi}{2h}\right)d\varphi = \frac{1}{2h} \int_{\varphi_0-\bar{\varphi}_0}^{\varphi_0-\bar{\varphi}_0} \frac{R_0^3}{(\sqrt{1+\Phi_{OB}^2})^3} \cdot \frac{\varphi}{(\varphi-A)^3} d\varphi.$$

В связи с тем, что часть функции интегрируется следующим образом:

$$\int \frac{\varphi-A+A}{(\varphi-A)^3} d\varphi = \int \frac{d\varphi}{(\varphi-A)^2} + A \int \frac{d\varphi}{(\varphi-A)^3} = -\frac{1}{\varphi-A} - \frac{A}{2(\varphi-A)^2},$$

то следующий шаг интегрирования слагаемого I приводит к выражению:

$$\begin{aligned} & \frac{R_0^3}{2h(1+\Phi_{OB})^{3/2}} \cdot \left[-\frac{1}{\varphi-A} - \frac{A}{2(\varphi-A)^2} \right]_{\varphi_0-\bar{\varphi}_0}^{\varphi_0-\bar{\varphi}_0} = \\ & = \frac{R_0^3}{2h(1+\Phi_{OB})^{3/2}} \left[\frac{1}{\left((\varphi_0-\bar{\varphi}_0) - \arctg \frac{1}{\Phi_{OB}} \right)} - \frac{1}{\left((\varphi_0-\bar{\varphi}_0) - \arctg \frac{1}{\Phi_{OB}} \right)} + \right. \\ & \quad \left. + \frac{\arctg \frac{1}{\Phi_{OB}}}{\left((\varphi_0-\bar{\varphi}_0) - \arctg \frac{1}{\Phi_{OB}} \right)^2} - \frac{\arctg \frac{1}{\Phi_{OB}}}{\left((\varphi_0-\bar{\varphi}_0) - \arctg \frac{1}{\Phi_{OB}} \right)^2} \right] \end{aligned} \quad (2.49)$$

Слагаемое II.

$$\begin{aligned} \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} \frac{R_0^2(\varphi)}{2} d\varphi &= \frac{1}{2} \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} \frac{R_0^2}{1 + \Phi_{OB}^2} \cdot \frac{d\varphi}{\varphi - A} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_0^2}{1 + \Phi_{OB}^2} \ln \left| \varphi - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}} \right| \Bigg|_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} = \\ &= \frac{R_0^2}{2(1 + \Phi_{OB}^2)} \ln \left| \frac{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}}{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}} \right| \end{aligned}$$

Слагаемое III.

$$\begin{aligned} \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} R_\delta(\varphi) \cdot \varphi d\varphi &= \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} - \frac{R_0}{\sqrt{1 + \Phi_{OB}^2}} \cdot \frac{\varphi}{\varphi - A} d\varphi = \\ &= - \frac{R_0}{\sqrt{1 + \Phi_{OB}^2}} \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} \frac{\varphi - A + A}{\varphi - A} d\varphi = \\ &= - \frac{R_0}{\sqrt{1 + \Phi_{OB}^2}} \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} d\varphi - \frac{R_0 A}{\sqrt{1 + \Phi_{OB}^2}} \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0} \frac{d\varphi}{\varphi - A} = \\ &= - \frac{R_0}{\sqrt{1 + \Phi_{OB}^2}} (\varphi_0 - \bar{\varphi}_0 - \varphi_0 + \bar{\varphi}_0) - \frac{R_0 A}{\sqrt{1 + \Phi_{OB}^2}} \ln \left| \frac{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0 - A}{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0 - A} \right| \end{aligned}$$

После интегрирования слагаемые подставим в (2.48) и получим уравнение для расчета силы в пластической области $S_{2,1}$:

$$\begin{aligned} P_{S_{21}} &= \frac{\tau_s}{h} \left[\frac{1}{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}} - \frac{1}{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}}{(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}})^2} - \frac{\operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}}{(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}})^2} \right] + \\ &\quad + \tau_s \frac{R_0}{1 + \Phi_{OB}^2} \ln \left| \frac{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}}{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}} \right| + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{R_0}{\sqrt{1+\Phi_{OB}^2}} \cdot \frac{R_3^2 \tau_s}{h} (\bar{\varphi}_0 - \bar{\varphi}_0) + \frac{R_0 \cdot \arctg \frac{1}{\Phi_{OB}}}{\sqrt{1+\Phi_{OB}^2}} \cdot \frac{R_3^2 \tau_s}{h} \cdot \ln \left| \frac{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0 - \arctg \frac{1}{\Phi_{OB}}}{\varphi - \bar{\varphi}_0 - \arctg \frac{1}{\Phi_{OB}}} \right| + \\
 & + \frac{\tau_s R_3^3}{3h} (\bar{\varphi}_0 - \bar{\varphi}_0) \cdot (2\varphi_0 - (\bar{\varphi}_0 + \bar{\varphi}_0)) + \frac{R_3^3}{2} (\bar{\varphi}_0 - \bar{\varphi}_0)
 \end{aligned} \quad (2.50)$$

Для поковки с несколькими продольными рёбрами в силу симметрии пластических областей в форме круговых секторов, их должно быть n (по числу рёбер), тогда общая сила деформирования фланцевой части поковки:

$$P_{\Sigma} = n(2P_{S_{1,1}} + 2P_{S_{2,1}}). \quad (2.51)$$

2.3. Деформированное состояние металла заготовки

По рассчитанным перемещениям материальных точек деформируемого тела и соотношениям Коши определим линейные и угловые деформации.

Проекция вектора перемещения на координатные оси:

$$u_r = \left(\frac{R_3^2}{2r} - \frac{r}{2} \right) \ln|h_z|; \quad u_{\varphi} = -r \ln|h_z| \varphi; \quad u_z = 2h_z (\ln|h_z| - 1) - 2h (\ln|h| - 1), \quad (2.52)$$

где h – высота фланцевой части заготовки;

h_z – текущая высота.

Соответствующие деформации по соотношениям Коши в цилиндрической системе координат:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}; \quad \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{1}{r} \frac{\partial u_{\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{u_r}{r}; \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (2.53)$$

$$\varepsilon_{r\varphi} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial u_{\varphi}}{\partial r} - \frac{u_{\varphi}}{r} \right).$$

Подставляя значения частных производных перемещений по соответствующим координатам, получим значения деформаций в зависимости от изменяющейся высоты заготовки на этапах деформирования:

$$\varepsilon_{rr} = \left(-\frac{R_3^2}{2r^2} - \frac{1}{2} \right) \ln|h| = -\frac{1}{2} \left(\frac{R_3^2}{r^2} + 1 \right) \ln|h|. \quad (2.54)$$

$$\varepsilon_{\varphi\varphi} = -\ln|h| + \frac{1}{2} \left(\frac{R_3^2}{r^2} - 1 \right) \ln|h| = \frac{1}{2} \left(\frac{R_3^2}{r^2} - 3 \right) \ln|h|. \quad (2.55)$$

$$\varepsilon_{zz} = 2\ln|h|. \quad (2.56)$$

$$\varepsilon_{r\varphi} = \frac{1}{2} (-\ln|h|\varphi - \ln|h|\varphi) = -\varphi \ln|h|. \quad (2.57)$$

Проверим выполнение условия несжимаемости:

$$\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{zz} = 0; \quad (2.58)$$

$$-\frac{1}{2} \left(\frac{R_3^2}{r^2} + 1 \right) \ln|h| + \frac{1}{2} \left(\frac{R_3^2}{r^2} - 3 \right) \ln|h| + 2\ln|h| = \left(-\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \right) \ln|h| + 2\ln|h| = 0.$$

Таким образом, условие несжимаемости выполняется.

2.4. Составляющая силы деформирования участка поковки с рёбрами с учетом трения

Как отмечалось ранее, большое влияние на силовые параметры оказывают силы трения, преодоление которых вызывает рост силы выдавливания на пуансоне. При неизменных размерах толщины и ширины ребра (рис. 2.4а) увеличивается высота выдавливаемого участка, а значит и силы трения, в связи с увеличением площади контакта металла с матрицей. Для определения составляющей силы на преодоление трения на контактных поверхностях воспользуемся схемой течения металла в плоскости rz (рис. 2.4б). Считая осевую деформацию постоянной по высоте деформируемой части поковки $\varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{\Delta h}{h}$, составим уравнение баланса работ для

определения силы на контактной поверхности стержневой части:

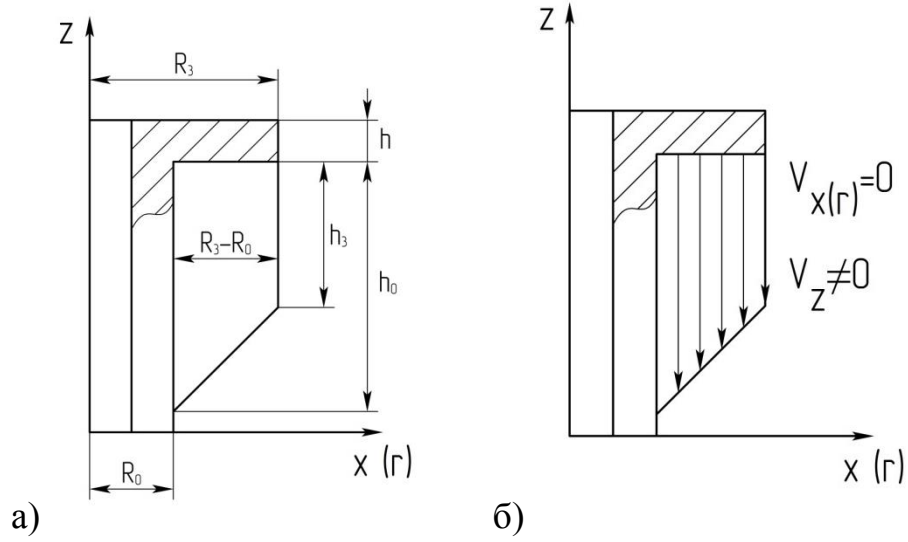


Рис. 2.4. Схема формирования ребра в плоскости \$rz\$ в цилиндрической системе координат: а – геометрические параметры; б – схема течения металла в ребре

$$P\Delta h = -\sigma_s \frac{\Delta h}{h} \int_0^{2\pi} \int_0^{R_0} \int_0^{h_0} r dr d\varphi dz - \tau_k \frac{\Delta h}{h} \int_0^{2\pi} \int_0^{R_0} r^2 dr d\varphi; \quad (2.59)$$

$$P = -\sigma_s \frac{1}{h} \int_0^{2\pi} \int_0^{R_0} \int_0^{h_0} r dr d\varphi dz - \tau_k \frac{1}{h} \int_0^{2\pi} \int_0^{R_0} r^2 dr d\varphi;$$

$$P = -\sigma_s \frac{2\pi R_0^2}{h} \frac{h_0}{2} - \tau_k \frac{2\pi R_0^3}{h} \frac{1}{3};$$

$$P = -\pi \sigma_s R_0^2 - \tau_k \frac{2\pi R_0^3}{3h} = -\pi R_0^3 \left(\frac{\sigma_s}{R_0} + \frac{2\tau_k}{3h} \right). \quad (2.60)$$

При максимальном значении $\tau_k = \frac{\beta \sigma_s}{2}$ сила на контакте стержневой

части поковки:

$$P = -\pi R_0^3 \left(\frac{\sigma_s}{R_0} + \frac{\beta \sigma_s}{3h} \right) = -\pi R_0^3 \sigma_s \left(\frac{3h + \beta R_0}{3h R_0} \right) = -\pi R_0^2 \sigma_s \left(1 + \frac{\beta R_0}{3h} \right). \quad (2.61)$$

$F_{mp} = [2(R_3 - R_0) + t]h_p n$ - площадь трения по плоскостям контакта
рёбер с матрицей;

где h_p – высота ребра;

t – толщина ребра.

Поскольку по площади, занимаемой рёбрами, силы трения отсутствуют, то силу (2.61) необходимо уменьшить на величину:

$$\begin{aligned} \Delta P &= -\frac{\sigma_s}{h} \int_0^{R_0} \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 + \bar{\varphi}_0} \int_0^h r dr d\varphi dz - \frac{\beta \sigma_s}{2h} \int_0^{R_0} \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 + \bar{\varphi}_0} r^2 dr d\varphi = \\ &= -\frac{\sigma_s R_0^2}{2h} 2\bar{\varphi}_0 h - \frac{\beta \sigma_s}{2h} \frac{R_0^3}{3} 2\bar{\varphi}_0 = -\sigma_s R_0^2 \bar{\varphi}_0 \left(1 + \frac{\beta R_0}{3h}\right) \end{aligned} \quad (2.62)$$

Отсюда сила, необходимая для выдавливания стержневой части поковки без учета рёбер:

$$\begin{aligned} P_{cm} &= -\pi R_0^2 \sigma_s \left(1 + \frac{\beta R_0}{3h}\right) + n \sigma_s R_0^2 \bar{\varphi}_0 \left(1 + \frac{\beta R_0}{3h}\right) = \\ &= -\sigma_s R_0^2 \left(1 + \frac{\beta R_0}{3h}\right) (\pi - n \bar{\varphi}_0) \end{aligned} \quad (2.63)$$

Определим силу выдавливания рёбер с учетом внешней контактной поверхности радиусом R_3 :

$$\begin{aligned} P_{вн} \Delta h &= -\sigma_s \frac{\Delta h}{h} \int_{R_0}^{R_3} \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 + \bar{\varphi}_0} \int_0^{h_3} r dr d\varphi dz - \frac{\beta \sigma_s}{2} \frac{\Delta h}{h} \int_{R_0}^{R_3} \int_{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}^{\varphi_0 + \bar{\varphi}_0} r^2 dr d\varphi \\ P_{вн} &= -\frac{\sigma_s}{h} \frac{r^2}{2} \Big|_{R_0}^{R_3} (\varphi_0 + \bar{\varphi}_0 - (\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)) h_3 - \frac{\beta \sigma_s}{2h} \frac{r^3}{3} \Big|_{R_0}^{R_3} 2\bar{\varphi}_0 = \\ &= -\frac{\sigma_s}{2} \frac{h_3}{h} (R_3^2 - R_0^2) 2\bar{\varphi}_0 - \frac{\beta \sigma_s}{3h} (R_3^3 - R_0^3) \bar{\varphi}_0 = \\ &= -\sigma_s \bar{\varphi}_0 (R_3 - R_0) \left[\frac{h_3}{h} (R_3 + R_0) + \frac{\beta}{3h} (R_3^2 + R_3 R_0 + R_0^2) \right] \end{aligned} \quad (2.64)$$

Составляющая силы трения на одной плоскости ребра:

$$P_{бок}^1 = \frac{\beta \sigma_s}{4} (h_0 + h_3) (R_3 - R_0). \quad (2.65)$$

Т.к. боковых поверхностей у ребра две, а всего рёбер n , то получим

уравнение для силы трения в виде:

$$P_{\text{тр}} = n \frac{\beta \sigma_s}{2} (h_0 + h_3) (R_3 - R_0). \quad (2.66)$$

Сила на преодоление трения при прямом выдавливании поковки с продольными рёбрами, действующей в плоскости rz :

$$P = -R_0^2 \sigma_s \left(1 + \frac{\beta R_0}{3h} \right) (\pi - n \bar{\varphi}_0) - n \frac{\beta \sigma_s}{2} (h_0 + h_3) (R_3 - R_0) - \\ - n \sigma_s \bar{\varphi}_0 (R_3 - R_0) \left[\frac{h_3}{h} (R_3 + R_0) + \frac{\beta}{3h} (R_3^2 + R_3 R_0 + R_0^2) \right] \quad (2.67)$$

2.5. Обсуждение результатов анализа технологии прямого выдавливания оребрённой поковки по разработанной математической модели

Расчеты по представленной математической модели прямого выдавливания поковок, имеющих продольные рёбра, проведены на примере штамповки алюминиевого сплава марки АК7, у которого при температуре 450°C предел прочности $\sigma_b = 21$ МПа.

В результате моделирования установлена взаимосвязь силы деформирования с геометрическими параметрами поковки.

Для выявления характера влияния геометрических размеров поковки на силовые параметры прямого выдавливания зафиксируем диапазоны их изменения в некоторых пределах: $2,5 \leq h \leq 62$; $45 \leq D_3 \leq 105$; $20 \leq D_0 \leq 70$; $4 \leq n \leq 12$.

Характер влияния толщины фланцевой части поковки на силовые параметры представлен графически на рис. 2.5. С увеличением толщины фланца в 10 раз (с 5 мм до 50 мм) сила деформирования снижается в 1,92 раза со значения 2300 кН до 1210 кН, а при увеличении диаметра заготовки в 2 раза с 50 мм до 100 мм, как показано на рис. 2.6, наблюдается интенсивный рост силы деформирования в 7 раз со значения 500 кН до значения 3500 кН, что не противоречит механике процесса выдавливания поковок с

продольным оребрением, т.к. площадь контакта является квадратичной функцией от D_3 .

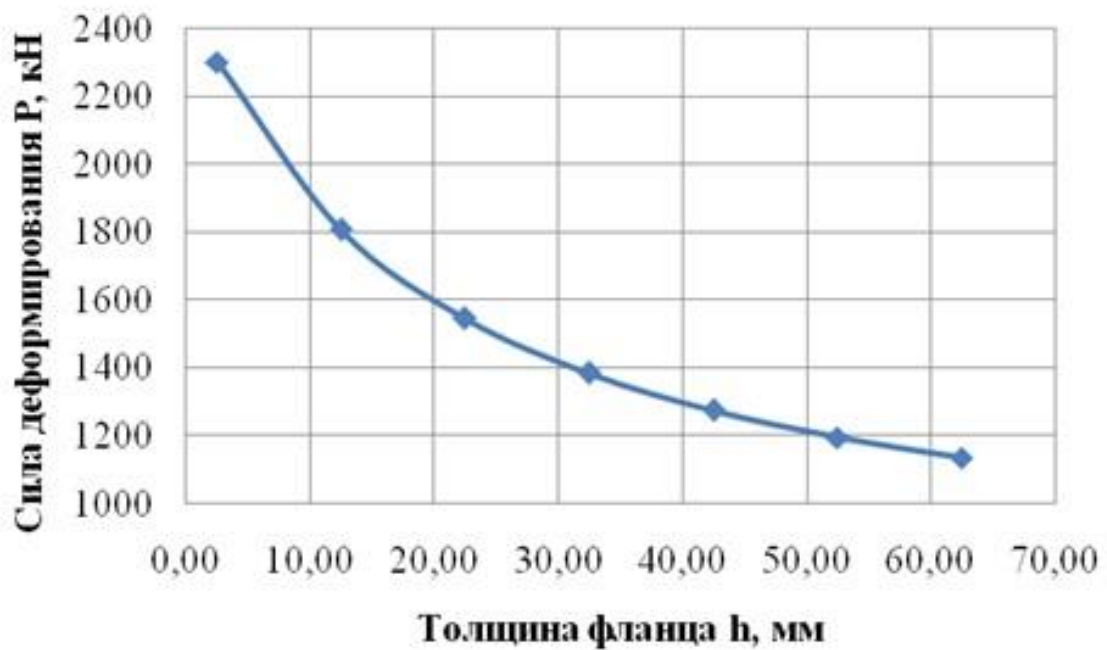


Рис. 2.5. Зависимость силы прямого выдавливания от изменения толщины фланца поковки

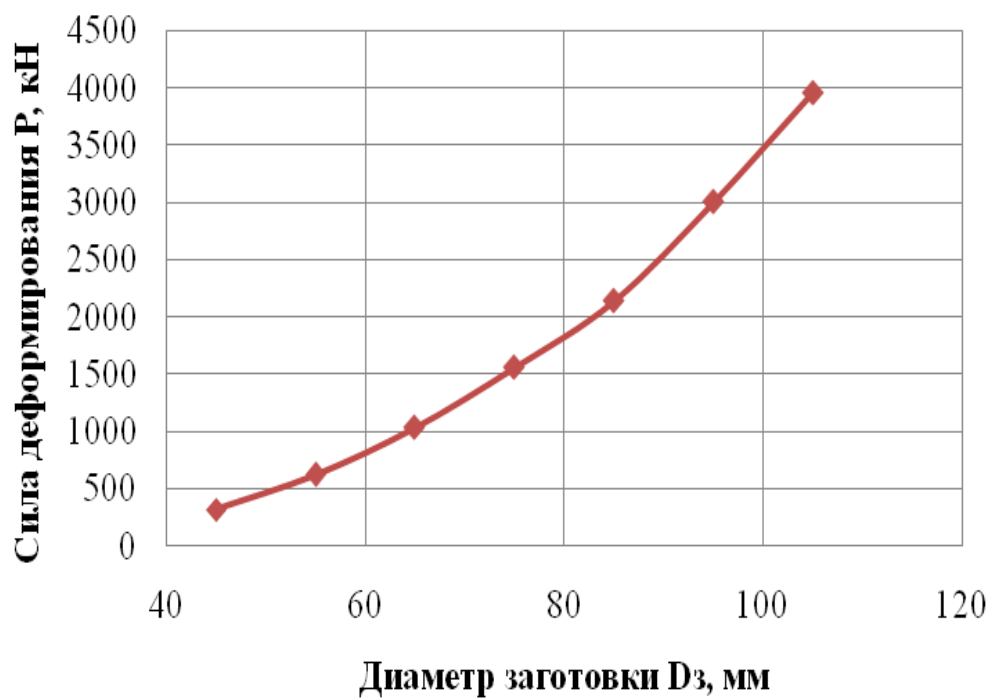


Рис. 2.6. Изменение силы деформирования в зависимости от диаметра заготовки

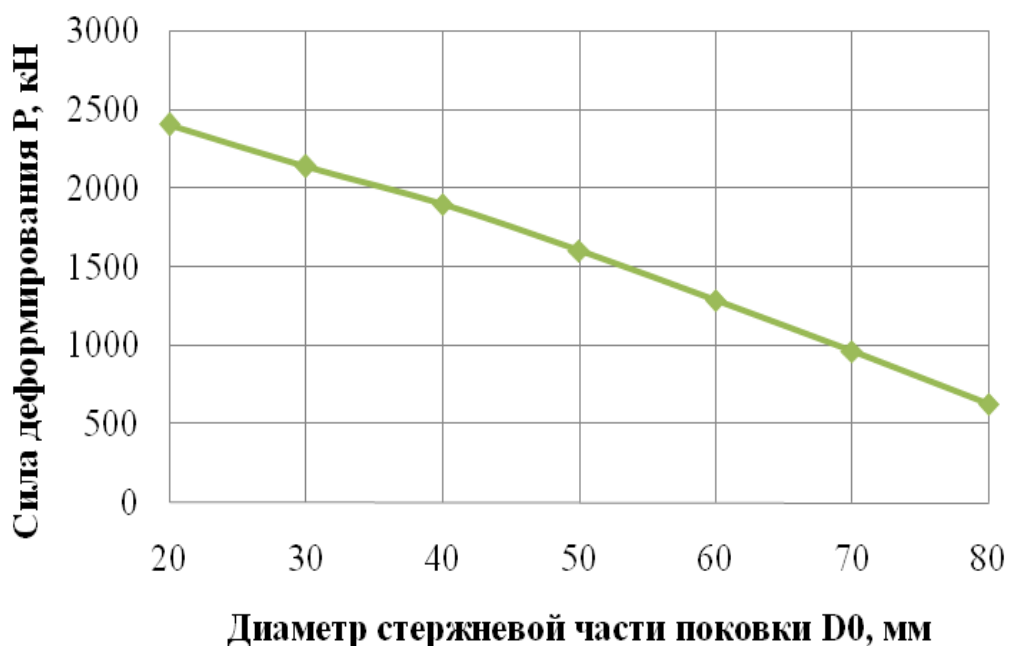


Рис. 2.7. Влияние диаметра стержневой части поковки на силовые параметры прямого выдавливания

На рис. 2.7 представлена зависимость силы прямого выдавливания от изменения диаметра стержневой части поковки, при увеличении которого в 4 раза в диапазоне $20 \leq D_0 \leq 80$ мм, сила прямого выдавливания продольных рёбер убывает в 3,8 раза со значения 2407 кН до значения 630 кН.

Это объясняется тем, что при фиксированных значениях других геометрических параметров поковки с увеличением диаметра стержневой части уменьшается ширина выдавливаемых рёбер, что влияет на уменьшение площади контакта ребра с матрицей и, следовательно, на уменьшение силы трения.

Рис. 2.8 иллюстрирует зависимость силы прямого выдавливания от количества рёбер поковки. Представленный график указывает на характерный рост силы выдавливания при увеличении количества рёбер поковки. Так, например, для выдавливания 4-х рёбер требуется сила 1250 кН, а при увеличении числа рёбер поковки до 12, т.е. в 3 раза, сила, необходимая для прямого выдавливания, возрастает до значения 3500 кН, т.е. увеличивается в 2,8 раза. В этом случае характер изменения силы

выдавливания также не вступает в противоречие с законами механики, т.к. с увеличением числа рёбер поковки неизменно увеличивается площадь контакта металла с матрицей, что ведёт к росту сил трения, на преодоление которых требуется увеличение суммарной силы прямого выдавливания.

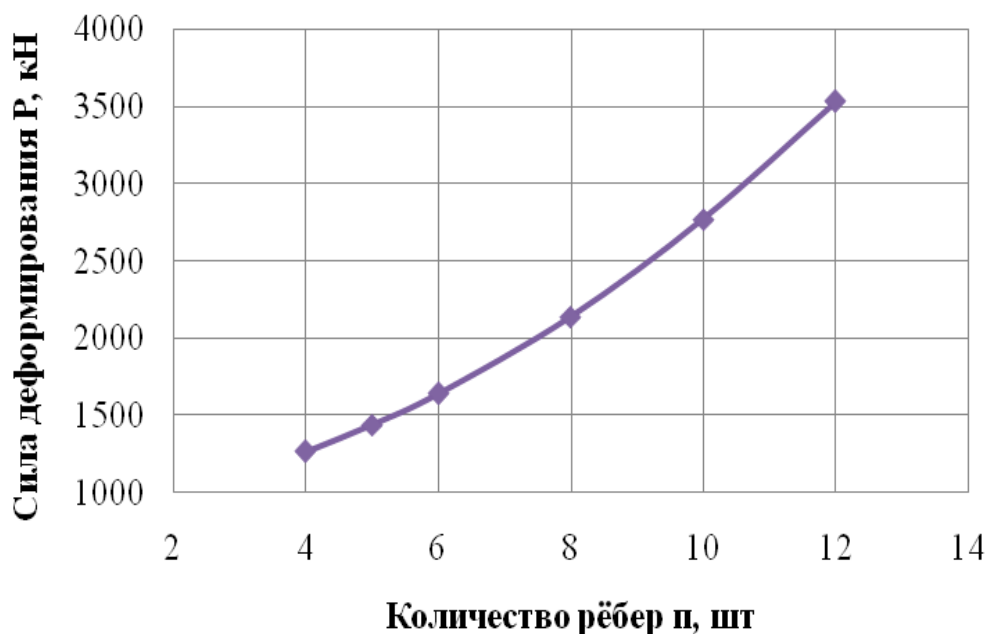


Рис. 2.8. Изменение силы прямого выдавливания в зависимости от количества рёбер поковки

Проанализируем изменение силовых параметров штамповки поковки, имеющей восемь рёбер, т.е. $n=8$. Основные геометрические параметры включают: $D_3=82$ – диаметр фланца, мм; $D_0=30_{-0,84}$ – диаметр стержневой части, мм; $h=2,5$ мм – толщина фланцевой части поковки; φ , φ_0 , $\bar{\varphi}$, $\bar{\bar{\varphi}}$ – угловые параметры пластических зон расчетной схемы (см. рис. 2.2). Материал поковки алюминиевый сплав АК7.

Для этой конкретной поковки сила деформирования в конце рабочего хода составила $P=2140$ кН, как показано на графиках рис. 2.9 [85]. Проведенная параллельно оси абсцисс горизонтальная линия при указанном фиксированном значении силы прямого выдавливания, пересекая кривые, образует точки пересечения, которые, будучи снесёнными на ось абсцисс,

определяют соответствующие геометрические параметры рассматриваемой в примере поковки.

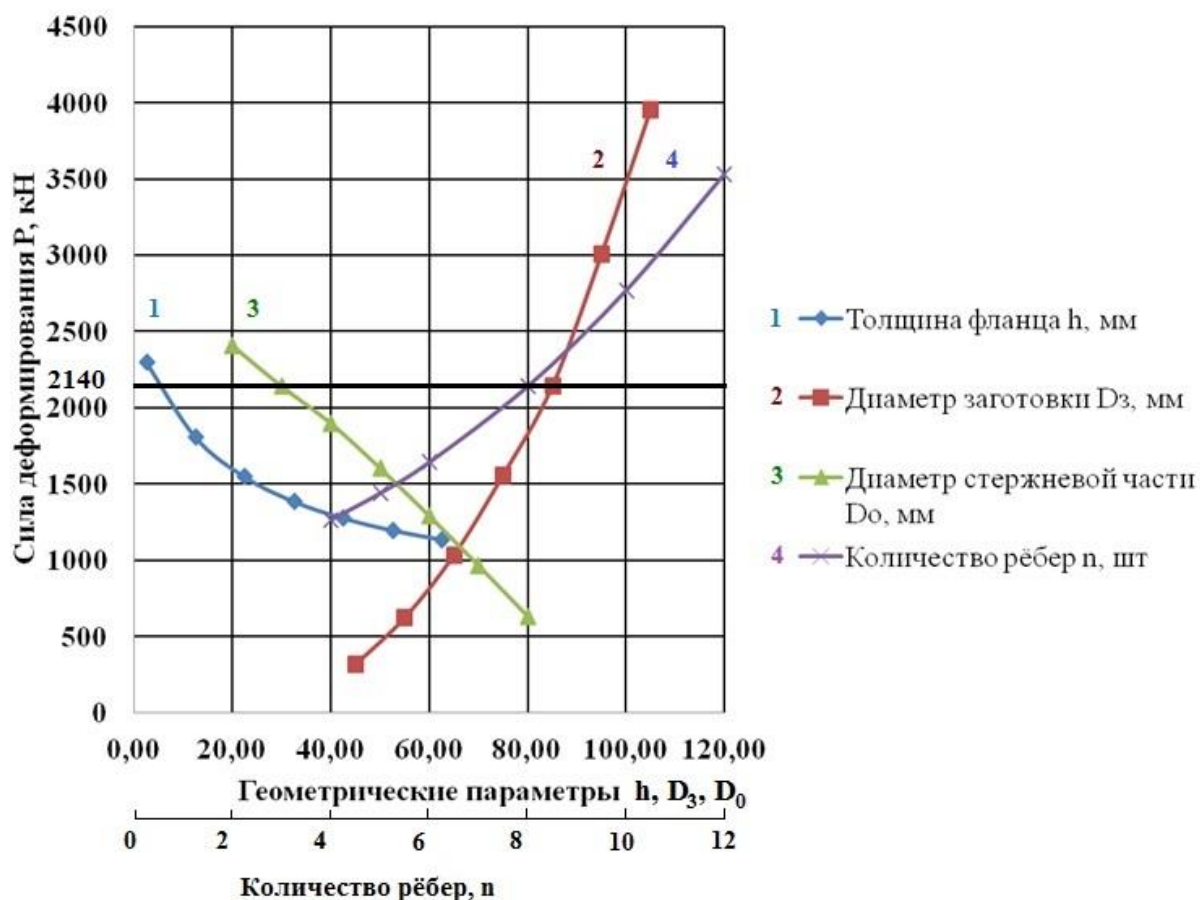


Рис. 2.9. Зависимость расчетной силы деформирования от геометрических параметров

Зная величину давления на контактной поверхности p и сопротивление деформированию σ_s , сделан пересчет полученных значений силы в безразмерный параметр относительной удельной силы $\frac{p}{\sigma_s}$. Полученные расчётом значения удельной силы сравнивались с данными независимых экспериментальных исследований, описанных в работе [48] (см. рис. 1.8). Результаты сопоставления удельных сил при штамповке алюминиевого сплава АК7 в зависимости от толщины полотна (фланца) представлены графически на рис. 2.10.

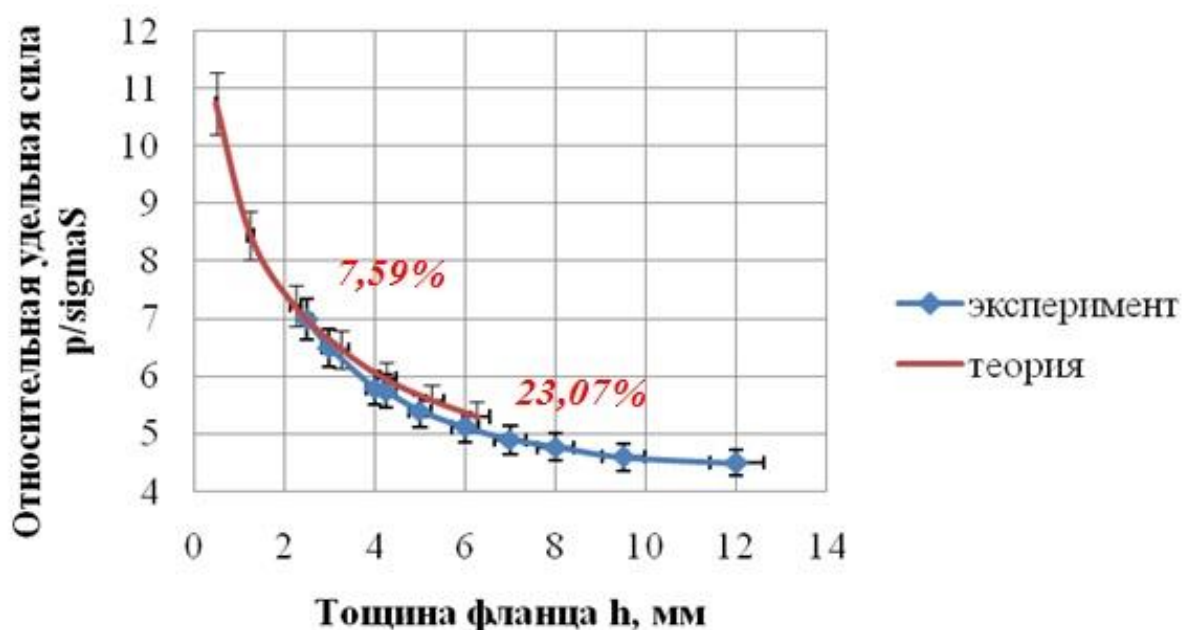


Рис. 2.10. Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных по удельной силе штамповки

Условия деформирования изотермические – заготовки в обоих случаях нагревались до температуры 450°С и в процессе деформирования в штампах с помощью тэнов поддерживалась температура 250°С. На графиках изображены планки погрешностей с относительными ошибками в сравниваемых диапазонах значений. Максимальное расхождение теоретических и экспериментальных данных составило 23,07%, минимальная относительная погрешность составила 7,59%, что не выходит за рамки допустимых погрешностей в инженерных расчетах.

Установлена величина и характер изменения силы на преодоление трения при прямом выдавливании поковки с продольными рёбрами в зависимости от её геометрических параметров. Направление силы противоположно направлению действия внешней нагрузки, поэтому она отрицательна. Результаты расчета по формуле (2.67) представлены в виде графиков на рис. 2.11 – 2.14, на которых выделены значения силы трения для поковки, приведенной в примере.

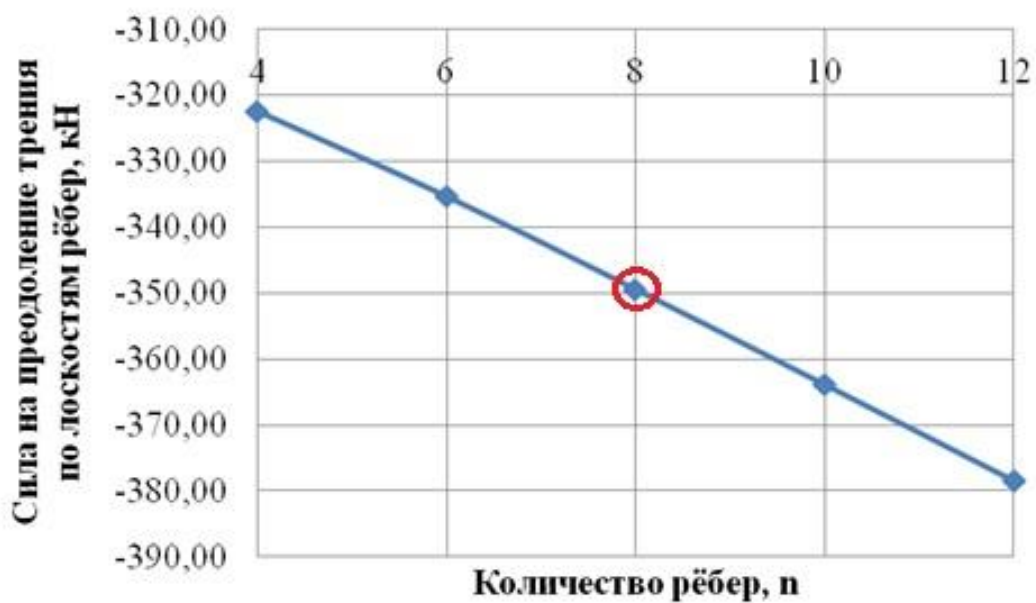


Рис. 2.11. Влияние количества рёбер на силу сопротивления трению



Рис. 2.12. Зависимость силы трения от радиуса заготовки



Рис. 2.13. Связь силы на преодоление трения с толщиной фланца

При увеличении количества рёбер с 4-х до 12-ти сила трения по абсолютной величине увеличивается от значения 322,44 кН до 378,47 кН. Увеличение радиуса заготовки в интервале $22,5 \leq R_3 \leq 52,5$ мм также ведет к увеличению силы трения по абсолютной величине от значения 64,23 кН до 617,92 кН. Если увеличивать толщину фланцевой части поковки в диапазоне $2,5 \leq h_0 \leq 62,0$, абсолютная величина силы на преодоление трения увеличивается с 327,71 кН до значения 357,44 кН, а при увеличении радиуса стержневой части поковки в диапазоне $10 \leq R_0 \leq 35$ мм абсолютная величина силы убывает от 568,37 кН до значения 5,90 кН.

Для учета сил трения, возникающих по плоскостям рёбер при их прямом выдавливании, необходимо суммировать найденные по двум моделям компоненты по формулам (2.51) и (2.67).



Рис. 2.14. Влияние радиуса стержневой части поковки на силу трения

В нашем примере для поковки с 8-ю рёбрами и известными геометрическими размерами сила прямого выдавливания 2140 кН с учетом трения 349,44 кН (выделено на графиках) составит 2489,44 кН.

Проанализируем величины деформаций при штамповке поковки, имеющей 8 рёбер. На рис. 2.15 представлены деформации сдвига при изменении угловой координаты пластической области.

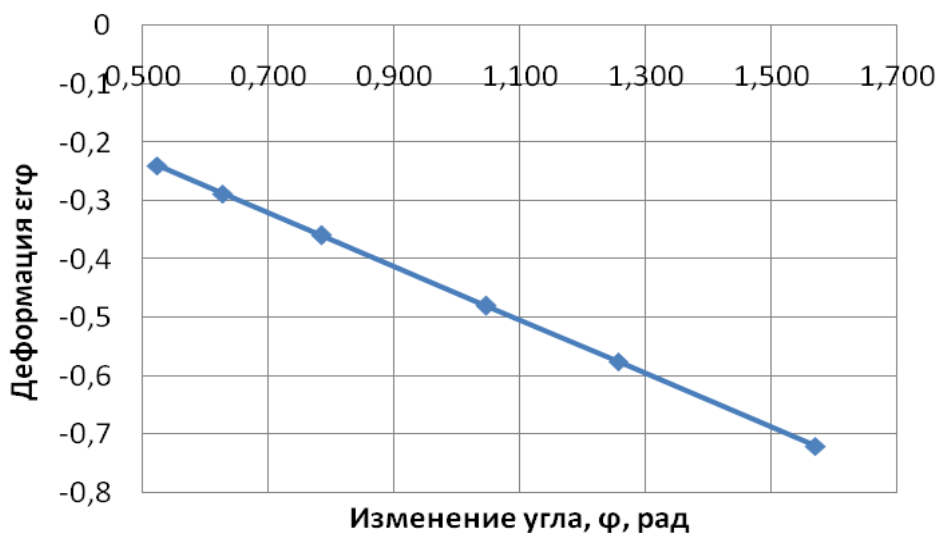


Рис. 2.15. Характер изменения деформаций сдвига $\epsilon_{гф}$

Характер изменения соответствует линейному закону, по которому

деформации сдвига по абсолютной величине увеличиваются пропорционально изменению угла. Выбранный диапазон изменения угловой координаты пластической области: $28,65^{\circ} \leq \varphi \leq 97,40^{\circ}$.

Рис. 2.16 иллюстрирует влияние значений диаметра фланца поковки на характер и интенсивность изменения радиальной, тангенциальной и осевой деформаций.

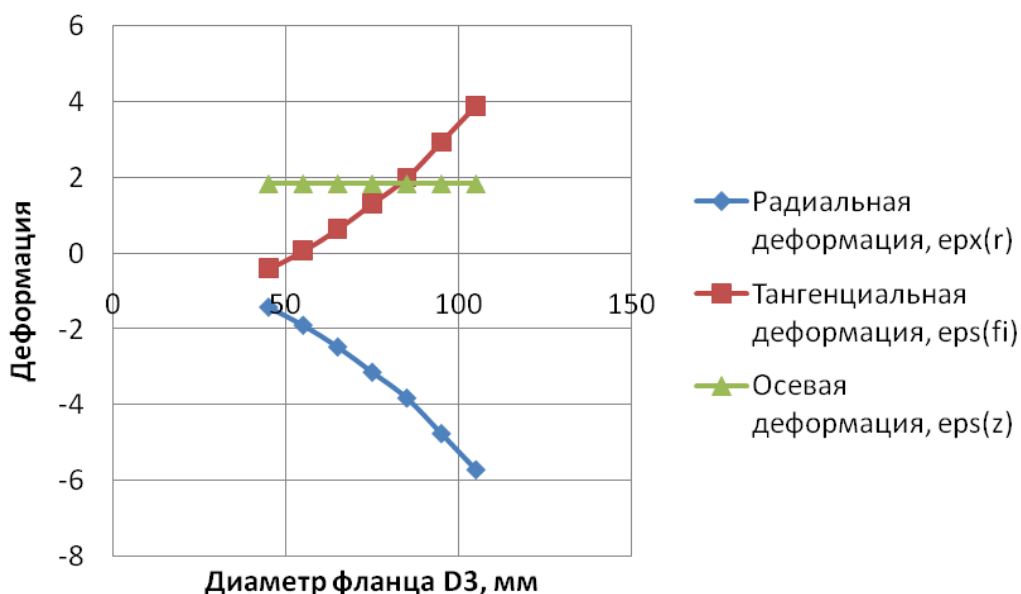


Рис. 2.16. Радиальная, тангенциальная и осевая компоненты деформации в зависимости от изменения диаметра фланца поковки

Увеличение диаметра фланцевой части поковки в диапазоне $45 \leq D_3 \leq 105$ мм влечет за собой рост тангенциальной составляющей деформации со значения -0,7 до значения 3,9 с одновременным увеличением абсолютной величины радиальной составляющей деформации со значения 1,4 до значения 5,7. Поскольку осевая деформация от диаметра фланцевой части поковки не зависит, то ее значение постоянно.

Рис. 2.17 показывает характер изменения компонент деформаций в зависимости от диаметра стержневой части поковки.

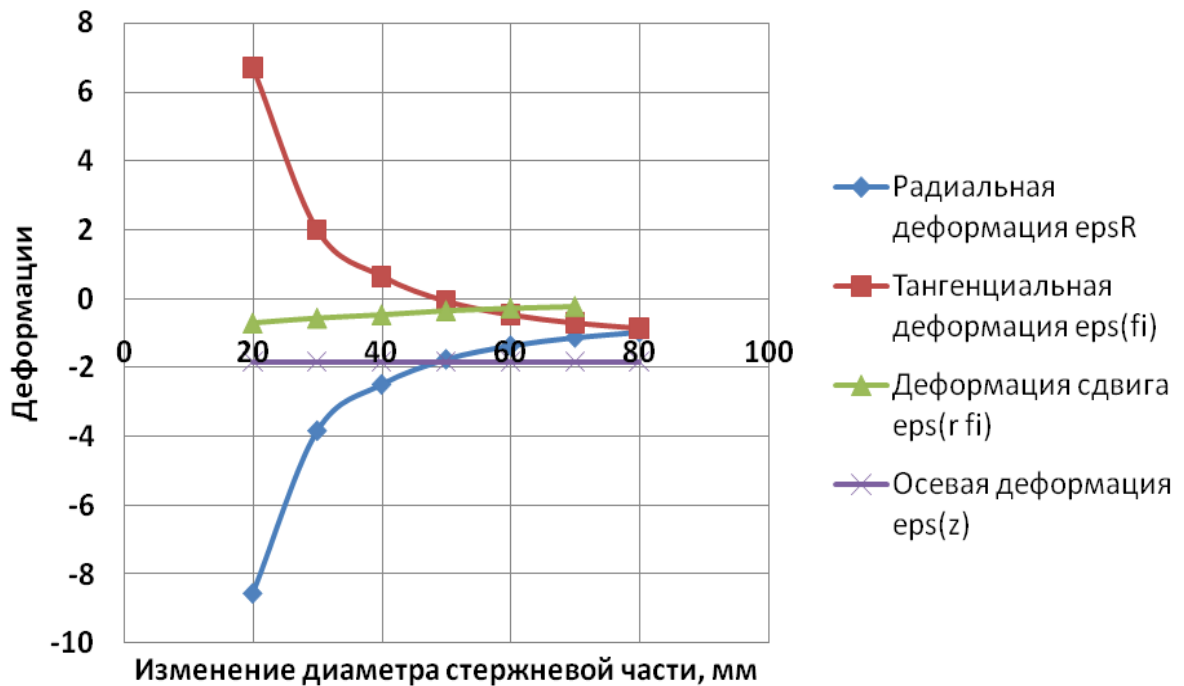


Рис. 2.17. Изменение значений компонент деформаций в зависимости от диаметра стержневой части поковки

Деформации сдвига имеют наименьшие по абсолютной величине значения по сравнению с двумя другими составляющими деформации. При этом радиальная и осевая деформация имеет знак «минус», т.к. течение происходит противоположно положительному направлению соответствующей координатной оси. При варьировании диаметром стержневой части поковки кривые радиальной и тангенциальной компонент деформации асимптотически приближаются к друг другу, что объясняется приближением значений диаметра стержневой части поковки к диаметру её фланца. Тангенциальная деформация по абсолютной величине убывает со значения 6,7 до 0,8, а абсолютная величина радиальной составляющей деформации увеличивается со значения 0,96 до значения 8,5. Осевая деформация остается постоянной, т.к. не зависит от диаметра стержневой части. Деформация сдвига $\epsilon_{r\phi}$ по абсолютной величине увеличивается от значения 0,24 до значения 0,72.

Графиками на рис. 2.18 определяются оценки компонент деформации от изменения толщины фланцевой части поковки. В этом случае характер изменения деформаций нелинейный. Тангенциальная компонента деформации является деформацией растяжения и увеличивается с 0,97 до значения 8,0, а радиальная и осевая составляющие деформации имеют знак «минус», что соответствует сжатию. Радиальная деформация по абсолютной величине уменьшается от 5,8 до 0,7; осевая компонента деформации по абсолютной величине также уменьшается от значения 3,7 до значения 0,5. Величина деформации сдвига уменьшается от 0,46 до значения 0,14.

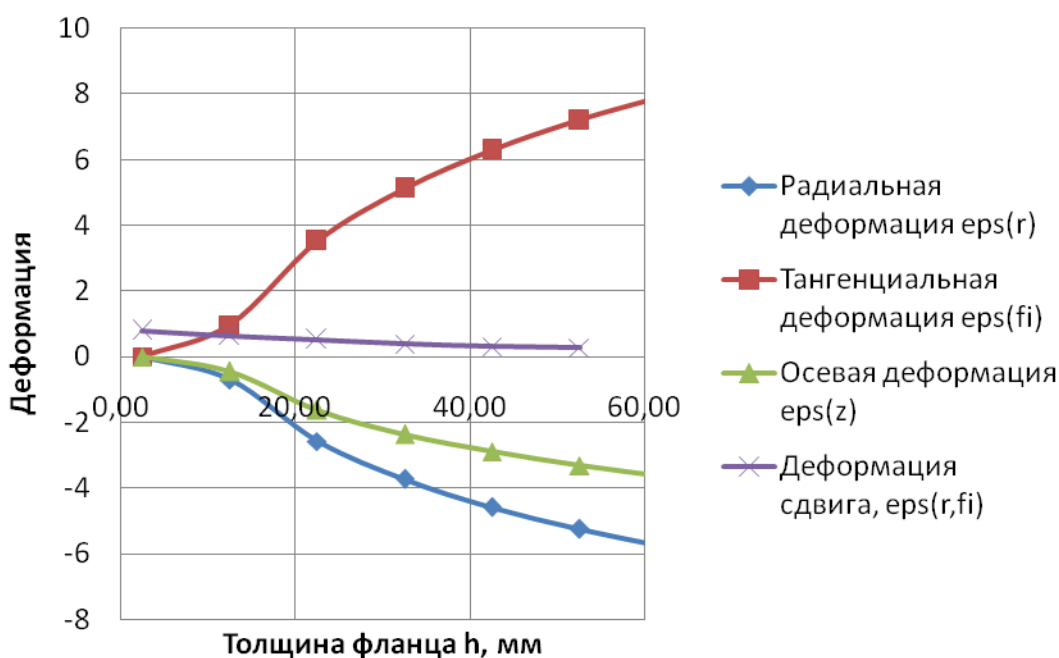


Рис. 2.18. Зависимость деформаций от толщины фланца поковки

2.6. Выводы по главе 2

1. При помощи разработанной математической модели установлены характер изменения и величины давления на контакте деформируемого металла с инструментом, а также значения и интенсивность изменения силовых и деформационных параметров технологического процесса прямого выдавливания поволоков, имеющих продольные ребра.

2. Выявлено, что сила прямого выдавливания убывает при росте двух геометрических параметров: толщины фланцевой части и диаметра стержневой части поковки. При варьировании толщиной фланца поковки в диапазоне $2,5 \leq h_0 \leq 62$ мм, например, с увеличением толщины фланца в 10 раз (с 5 мм до 50 мм) сила деформирования снижается в 1,92 раза со значения 2300 кН до 1210 кН. Изменение толщины фланцевой части поковки приводит к изменению значений деформаций. Тангенциальная составляющая деформации увеличивается с 0,97 до значения 8,0; радиальная деформация по абсолютной величине уменьшается от 5,8 до 0,7; осевая компонента деформации также уменьшается по абсолютной величине от значения 3,7 до значения 0,5. Деформация сдвига уменьшается от 0,46 до значения 0,14.

При увеличении диаметра стержневой части поковки в 4 раза в диапазоне $20 \leq D_0 \leq 80$ мм, сила прямого выдавливания продольных рёбер также убывает в 3,8 раза со значения 2407 кН до значения 630 кН, т.к. изменение D_0 в сторону увеличения влияет на уменьшение площади контакта ребра с матрицей и, следовательно, на уменьшение силы трения.

Установлен также характер влияния диаметра стержневой части на компоненты деформации. Тангенциальная деформация по абсолютной величине убывает со значения 6,7 до 0,8, а абсолютная величина радиальной составляющей деформации увеличивается со значения 0,96 до значения 8,5. Осевая деформация остается постоянной, т.к. не зависит от диаметра стержневой части. Деформация сдвига $\varepsilon_{r\phi}$ по абсолютной величине увеличивается от значения 0,24 до значения 0,72.

3. На рост силы деформирования оказывает влияние диаметр фланцевой части поковки, при увеличении которого в 2 раза с 50 мм до 100 мм прослеживается интенсивный рост силы деформирования в 7 раз со значения 500 кН до значения 3500 кН, что не противоречит механике процесса выдавливания стержневых поковок с продольным оребрением, т.к. площадь контакта является квадратичной функцией от D_3 . В этом случае также установлен рост тангенциальной составляющей деформации со

значения -0,7 до значения 3,9 с одновременным увеличением радиальной составляющей деформации по абсолютной величине со значения 1,4 до значения 5,7.

Увеличение количества выдавливаемых рёбер вызывает рост силы прямого выдавливания. Так, например, для выдавливания 4-х рёбер требуется сила 1250 кН, а при увеличении числа рёбер поковки до 12, т.е. в 3 раза, сила, необходимая для прямого выдавливания, возрастает до значения 3500 кН, т.е. увеличивается в 2,8 раза. С добавлением рёбер неизменно увеличивается площадь контакта металла с матрицей, что ведёт к росту сил трения, на преодоление которых требуется увеличение суммарной силы прямого выдавливания.

4. Проведенный сравнительный анализ в пересекающихся диапазонах значений относительных удельных сил процессов выдавливания с затеканием металла в рёбра позволил определить погрешности с относительными ошибками расчётных данных и данных эксперимента независимых исследователей. Максимальное расхождение теоретических и экспериментальных данных составило 23,07%, минимальная относительная погрешность составила 7,59%, что не выходит за рамки допустимых погрешностей в инженерных расчетах.

5. Установлены характер изменения и величина силы на преодоление трения по плоскостям рёбер, действующая в плоскости rz . При увеличении количества рёбер с 4-х до 12-ти сила трения по абсолютной величине увеличивается от значения 322,44 кН до 378,47 кН. Увеличение радиуса заготовки в интервале $22,5 \leq R_3 \leq 52,5$ мм ведет также к увеличению силы трения по абсолютной величине от значения 64,23 кН до 617,92 кН. Если увеличивать толщину фланцевой части поковки в диапазоне $2,5 \leq h_0 \leq 62,0$, сила на преодоление трения по абсолютной величине увеличивается с 327,71 кН до значения 357,44 кН, а при увеличении радиуса стержневой части поковки в диапазоне $10 \leq R_0 \leq 35$ мм сила по абсолютной величине убывает от 568,37 кН до значения 5,90 кН.

Для конкретной поковки с 8-ю рёбрами и известными геометрическими размерами значение силы трения 349,44 кН увеличивает силу прямого выдавливания 2140 кН до значения 2489,44 кН.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И КОНСТРУКЦИЙ ШТАМПОВ ДЛЯ ВЫДАВЛИВАНИЯ ОРЕБРЕННЫХ ПОКОВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Проектирование технологического процесса выдавливания и конструкции штампа для его реализации во многом определяется формой штампуемой поковки.

При сравнении процессов формоизменения предпочтение отдается тем, которые обеспечивают изменение формы заготовки за меньшее количество переходов, точность размеров и заданную шероховатость поверхности, высокий уровень эксплуатационных характеристик металла и низкую себестоимость изготовления поволоков.

Отсутствие стандартов и технических условий на проектирование поволоков, деформируемых в холодном состоянии, не может являться причиной отказа от перспективных технологий штамповки, поскольку основные этапы остаются теми же, что приняты в области горячей штамповки стальных поволоков. Руководствуясь производственным опытом, поволоков для ХОШ и ПГОШ могут иметь меньшие припуски на механическую обработку, а сами процессы пластического деформирования отличаются термомеханическими режимами деформирования, поскольку температурный интервал ПГОШ существенно ниже температур горячей штамповки поволоков. Снижение величин контактных давлений при деформировании алюминиевых сплавов, даже при обработке давлением в холодном состоянии, обеспечивает более высокие показатели стойкости рабочих деталей штампового инструмента. Что касается используемого в заготовительных цехах машиностроительных предприятий кузнечно–штамповочного оборудования, то какой–либо модернизации при переходе на штамповку алюминиевых сплавов не требуется.

3.1. Технологичность деталей, подлежащих штамповке

Проектирование маршрутного технологического процесса штамповки начинается с анализа технологичности готовой детали.

Основные требования технологичности при изготовлении поковок сводятся к следующему [91]: максимально возможное упрощение конструкции поковки; рациональное назначение припусков и напусков на поковку для снижения ее металлоемкости; рациональное ограничение количества марок и сортов металлов, более широкое применение недефицитных легкообрабатываемых металлов; выбор рациональной заготовки; использование принципов унификации на различных этапах технологической подготовки производства. Эти требования конкретизируются с учетом особенностей технологических процессов, и их выполнение способствует повышению технического уровня производства.

На рис. 3.1 изображен чертёж стержневой детали с продольными рёбрами, который необходим для разработки чертежа поковки и технологии её изготовления. Анализ детали показывает, что периферийные отверстия и поднутрения изготовить способами обработки давлением не представляется возможным, поэтому эти нетехнологичные элементы будут закрыты напуском. Определенная сложность может возникнуть при выдавливании рёбер.

Требования по точности основных размеров детали лежат в диапазоне 13–16 квалитетов. Анализ размерной точности детали, подлежащей изготовлению, и сравнение с параметрами операций по табл. 1.2 показывает, что полугорячее выдавливание полностью соответствует заданным точностным параметрам, а размеры после холодного выдавливания точнее на два квалитета, т.е. заданную точность можно обеспечить способами холодной или полугорячей объемной штамповки.

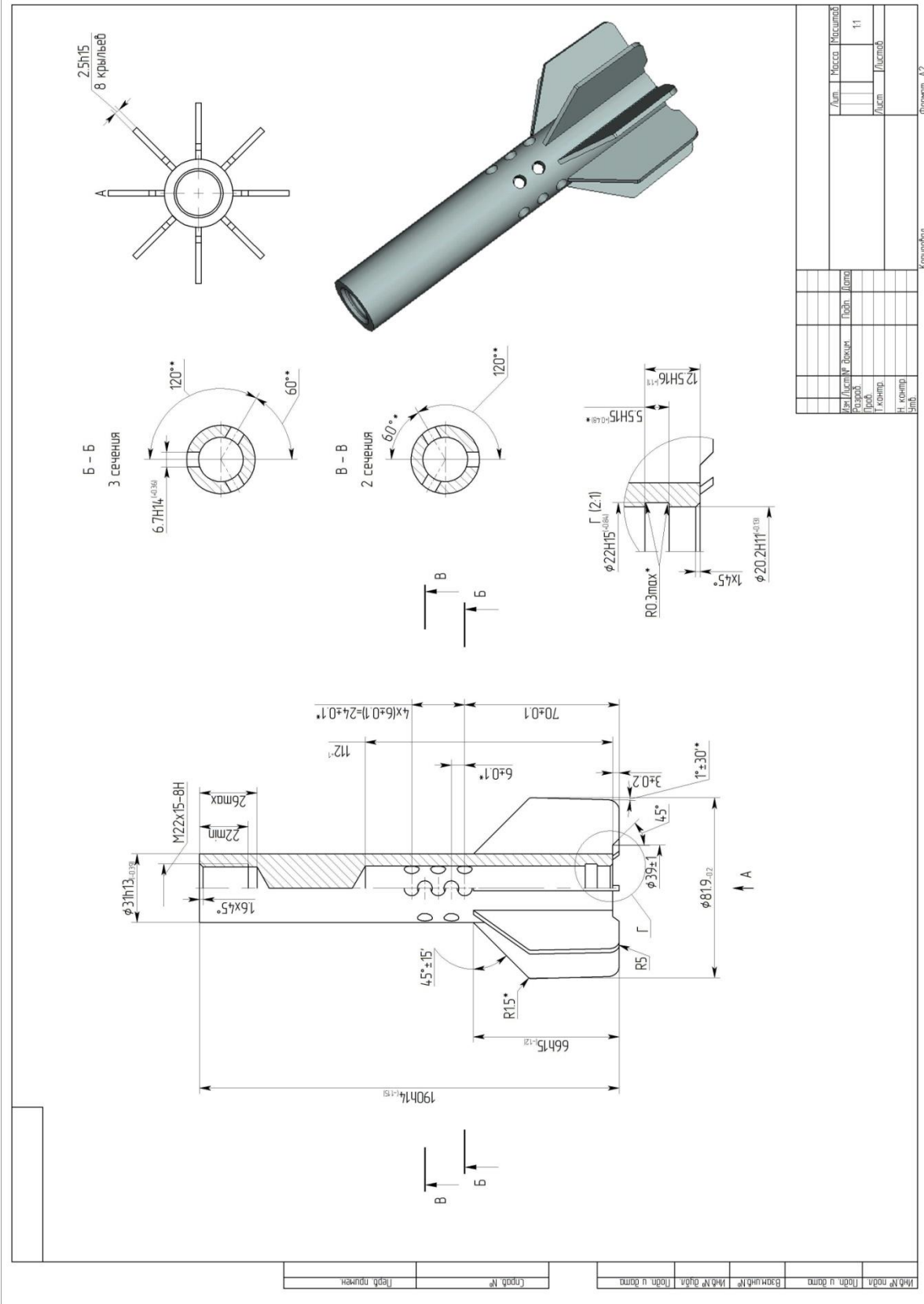


Рис. 3.1. Чертеж детали, подлежащей изготовлению, и её 3D модель

3.2. Анализ вариантов технологических процессов штамповки

Система ограничений возможностей реализации штамповочных операций включает геометрические ограничения, силовые ограничения, а также ограничения по числу применяемых переходов.

Выбор диаметра заготовки под штамповку при условии постоянства объемов может осуществляться в соответствии с диаметрами участков поковки. На рис. 3.3 рассмотрена схема генерирования возможных вариантов технологического процесса штамповки стержневой поковки с продольными рёбрами с составом необходимых операций. Различные геометрические размеры заготовок влияют как на число переходов, необходимых для получения поковки заданной конфигурации, так и на последовательность и состав применяемых операций, что отражает схема, приведенная на рис.3.4.

Первый вариант технологического процесса штамповки стержневой поковки с продольными рёбрами предусматривает использование заготовки диаметром равным или близким значению диаметра стержневой части. В этом случае необходимы два высадочных перехода: наборный в конической полости пуансонов и высадка плоским пуансоном фланцевой части. Затем выполняются наметка осевого отверстия, прошивка и прямое выдавливание рёбер. Рассматриваемый вариант содержит пять переходов штамповки.

Второй вариант предусматривает использование заготовки с увеличенным диаметром, по сравнению с первым вариантом. Выполняется прямое выдавливание стержневой части, далее переход высадки плоским пуансоном на промежуточный диаметр фланцевой части полуфабриката. Однако добавляется высадочный переход фланца. Затем следуют 2 перехода прошивки осевого отверстия, и прямое выдавливание рёбер. По второму варианту всего переходов шесть. Следует заметить, что для осуществления этого варианта потребуются несколько пуансонов для высадки на разные диаметры фланца.

Третий вариант предусматривает выбор заготовки с диаметром равным

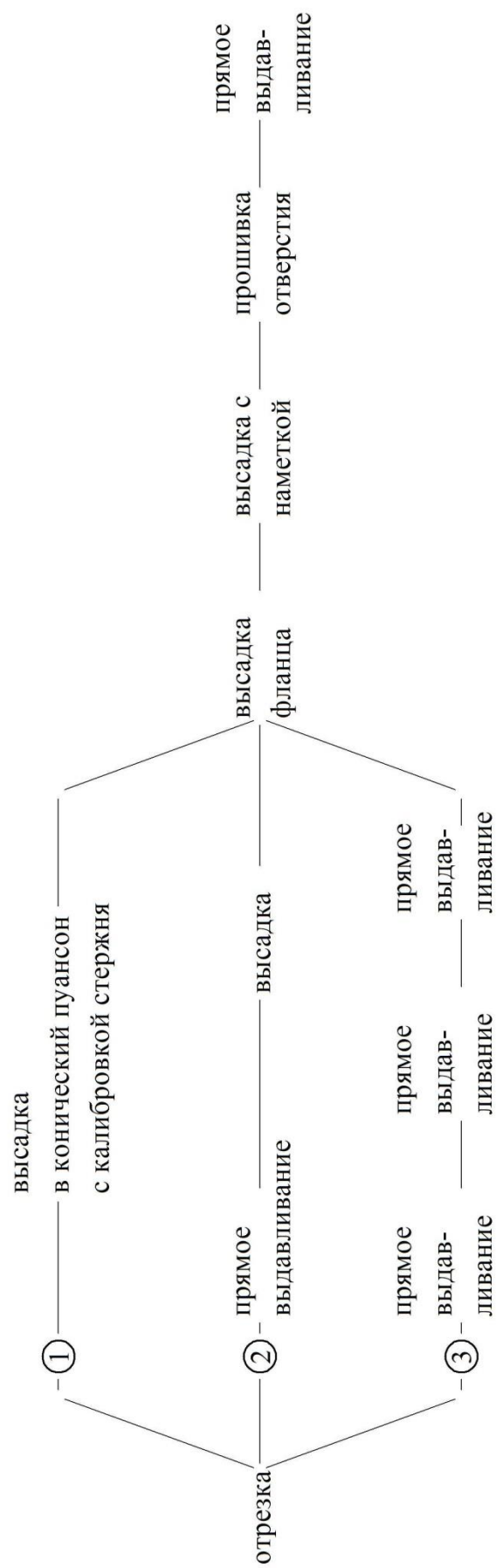


Рис. 3.3. Состав операций технологических процессов штамповки стержневой поковки с продольными рёбрами

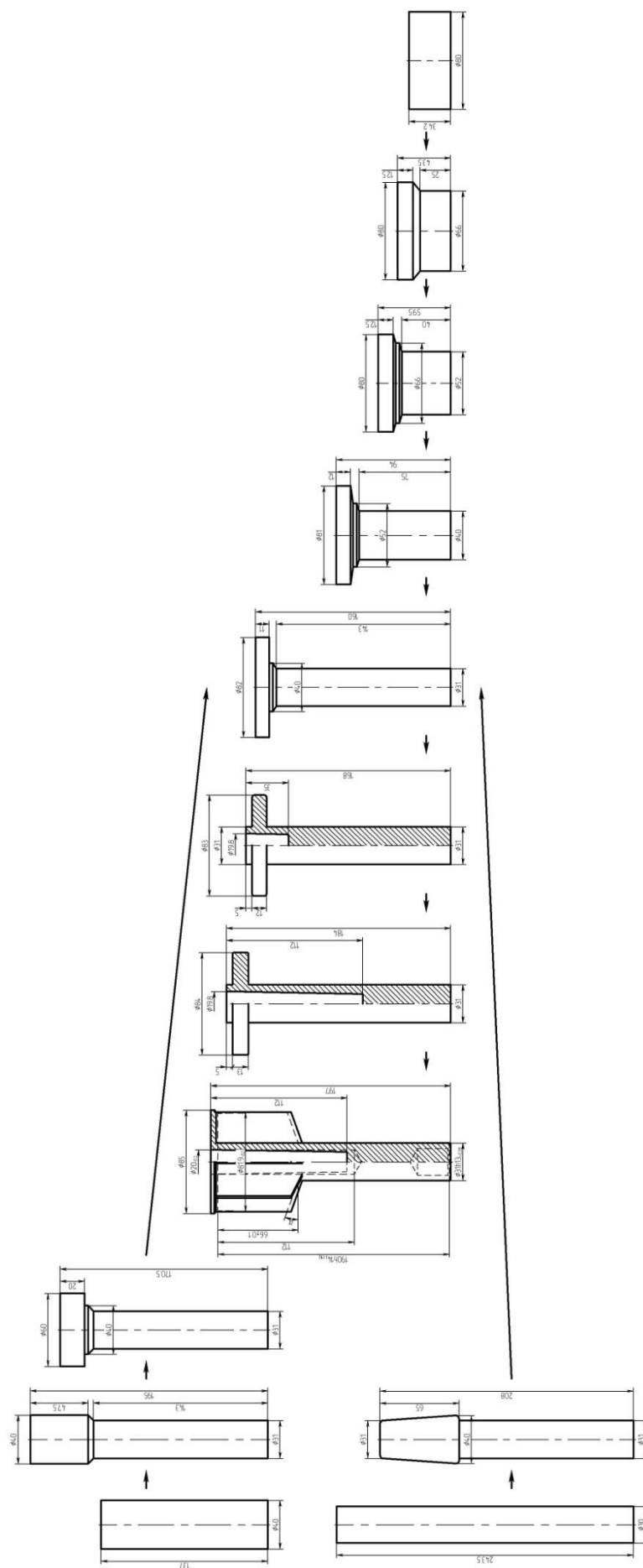


Рис. 3.4. Схемы переходов альтернативных вариантов штамповки

или близким по значению к диаметру фланца поковки. Вариант содержит четыре перехода прямого выдавливания для оформления стержневой части полуфабриката, затем следуют два перехода прошивки для оформления осевого отверстия и, наконец, прямое выдавливание рёбер. По этому варианту число переходов семь. Матриц для прямого выдавливания стержневой части нужно четыре, а большие степени деформации и технологические силы на переходах прямого выдавливания стержня могут служить причиной преждевременного износа рабочих поверхностей матриц.

Анализ возможных технологических процессов штамповки указывает на предпочтительное использование первого варианта, т.к. высадочные переходы менее нагружены, а конструкция пуансонов отличается простотой формы, что удешевит их изготовление.

3.3. Формализация принятия технологических решений

Выбор рационального варианта технологического процесса из ряда нескольких альтернатив относится к классу сложных задач принятия решения, требующих разработки специальных алгоритмов и методик технологического проектирования. Разработан один из алгоритмов выбора варианта технологии штамповки стержневой поковки, имеющей продольные рёбра. Выбор основывается на проведении технологических расчетов и сравнения параметров спроектированных альтернативных вариантов. К числу параметров относятся геометрические ограничения, выражающиеся в относительных размерах поковки, силовых параметров по переходам и количеству переходов, входящих в технологию. Кроме того, ГОСТ 21488-97 «Прутки прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия» ограничивает размерный ряд прутков из данного металла.

На рис. 3.5 представлен алгоритм расчета технологических параметров штамповки стержневой поковки и выбора рационального варианта пластического формоизменения.

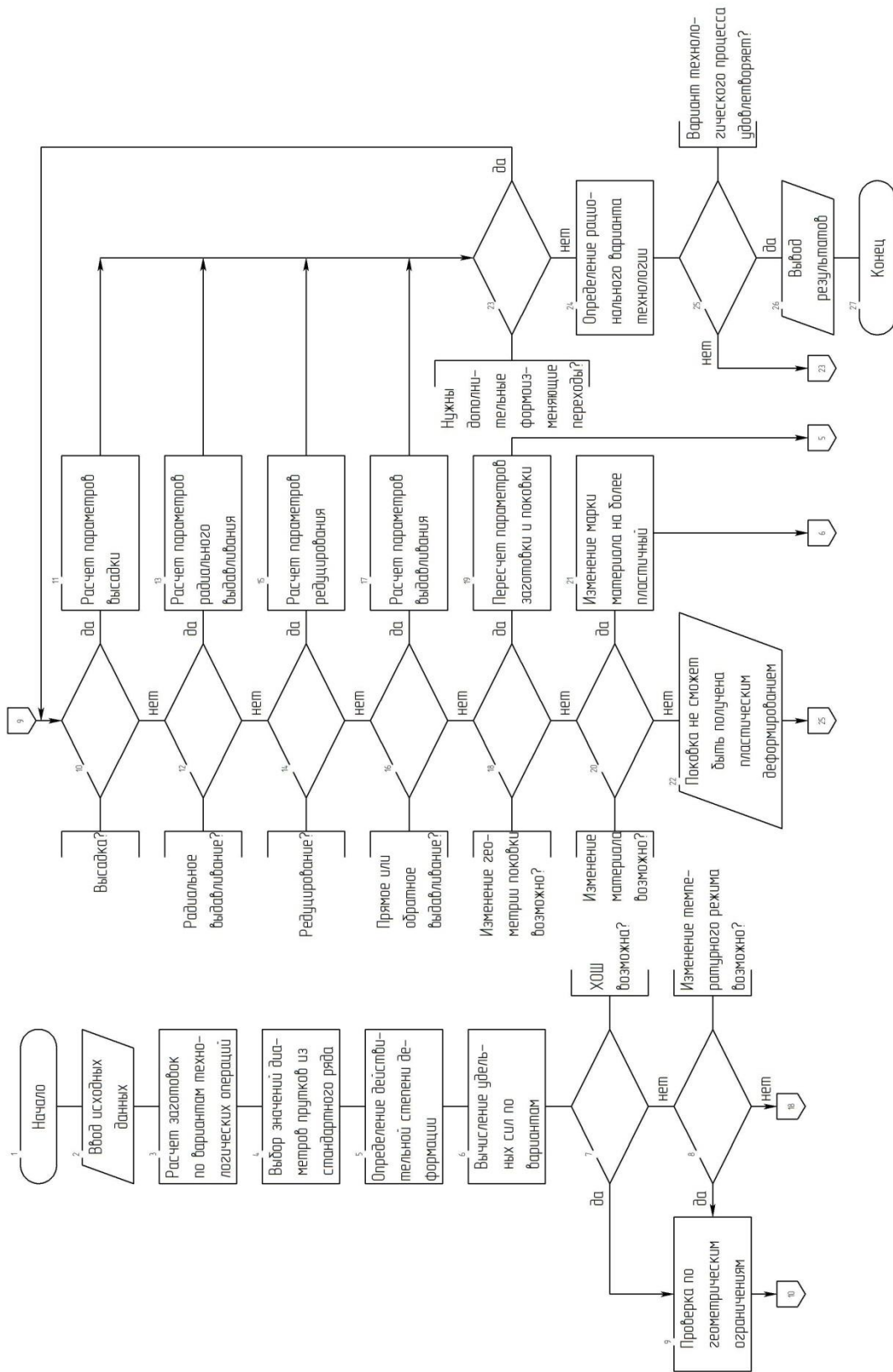


Рис. 3.5. Алгоритм принятия решения при сравнении вариантов технологических процессов штамповки стержневых

Исходными данными для проведения необходимых расчетов являются конструктивно–технологические признаки поковок, допустимые значения удельных сил на штамповый инструмент и степени деформаций, а также набор логических переменных, запрещающих или разрешающих изменение хода расчетов на том или ином этапе моделирования. Ввод исходных данных осуществляется с помощью блока 2 алгоритма.

Нормативно–справочные данные, практически не изменяющиеся в рассматриваемых условиях производства, заложены в программный комплекс в виде информационных массивов, обращение к которым производится по мере необходимости.

Определив предварительно относительные размеры заготовки, производят укрупненный выбор технологических операций, являющихся претендентами на включение в процесс изготовления поковки, и приступают к расчету параметров заготовок по вариантам (блок 3).

С помощью блока 4 алгоритма осуществляется обращение к одному из информационных массивов, содержащему стандартные значения диаметров прутков. Производится выбор значения диаметра прутка для проектируемого технологического процесса.

Вычисление действительных степеней деформаций и удельных сил по вариантам возможных технологических операций производится с помощью блоков 5 и 6 по зависимостям, представленным в [11].

С помощью блока 7 проверяется осуществление операции в условиях холодной объемной штамповки.

Необходимость изменения температурного режима в сторону полугорячей или горячей деформации проверяется с помощью блока 8.

С помощью блока 9 осуществляется просмотр диапазонов допустимых значений относительных размеров и в зависимости от того, в какую из областей попадают параметры поковки, выбирается технологическая операция для участия в разработке процесса изготовления.

Если ограничения не позволяют использовать рассматриваемый технологический процесс, то либо он отбрасывается как непригодный, либо конструктивно-технологические признаки поковки корректируются, и процесс продолжает участвовать в сравнительном анализе альтернативных вариантов (блоки 10 – 18).

Блоки 19–22 алгоритма предусматривают возможность изменения диаметра заготовки d_0 , признаков поковки k , m , n и марки металла в допустимых пределах. Решение о необходимости такого изменения принимается технологом в режиме диалога. После расчета одного из вариантов технологического процесса штамповки изменяют параметр d_0 . В результате такого изменения требуется дополнительная операция и алгоритмом предусмотрено ее назначение. Проверка целесообразности увеличения числа переходов проводится с помощью блока 23. В конце моделирования получают поковку, требуемой конфигурации и фиксируется значение d_0 . Блоком 24 определяется рациональный вариант технологии.

Если конструктивно-технологические признаки поковки таковы, что она может быть получена с помощью нескольких вариантов технологических процессов, то следует принимать решения по выбору рациональной технологии из ряда возможных альтернатив, что производится блоком 25.

Блок 26 предоставляет технологу возможность оценить рассчитанный вариант технологического процесса.

На основе программной реализации технологических расчетов спроектирован технологический процесс штамповки стержневой поковки с продольными рёбрами, последовательность переходов которого представлена на рис. 3.6.

Поковка из сплава АК6, представленная на рис. 3.7, штампуется за один переход прямого выдавливания из заготовки круглого сечения. Диаметр заготовки согласовывался со стандартным значением прессованных прутков. Схема однопереходного процесса выдавливания в холодном состоянии поковки со сквозным отверстием представлена на рис. 3.8.

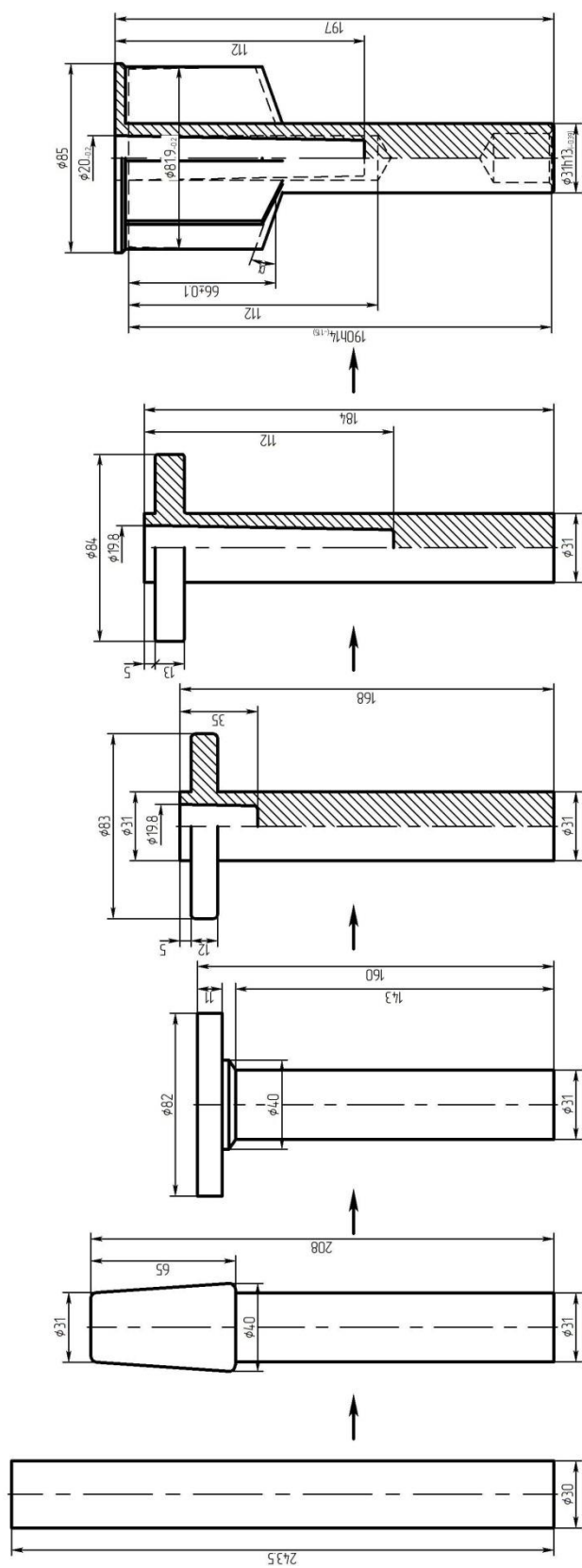


Рис. 3.6. Технологические переходы штамповки стержневой поковки с продольными рёбрами

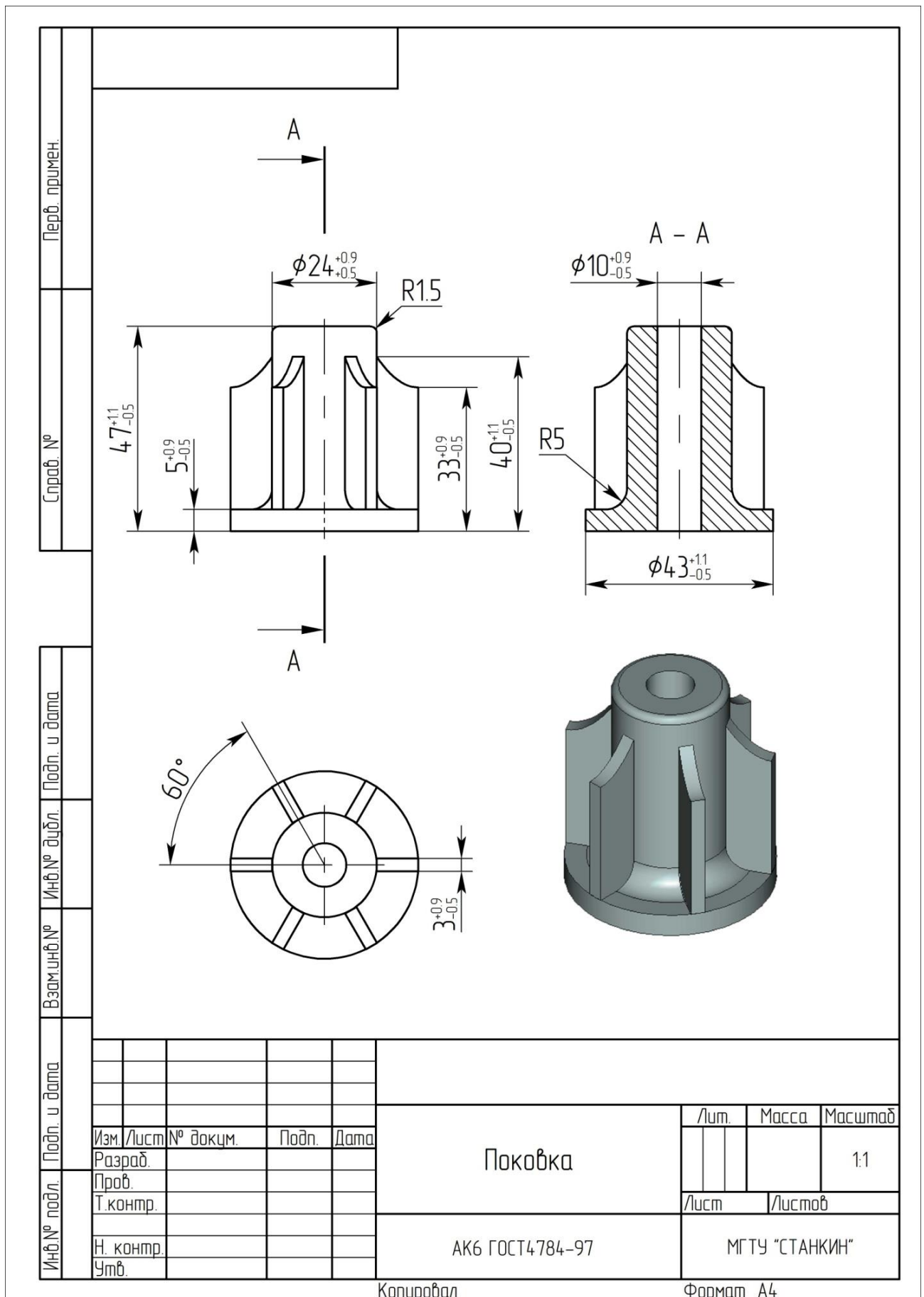


Рис. 3.7. Чертеж поковки и 3D модель с шестью продольными рёбрами

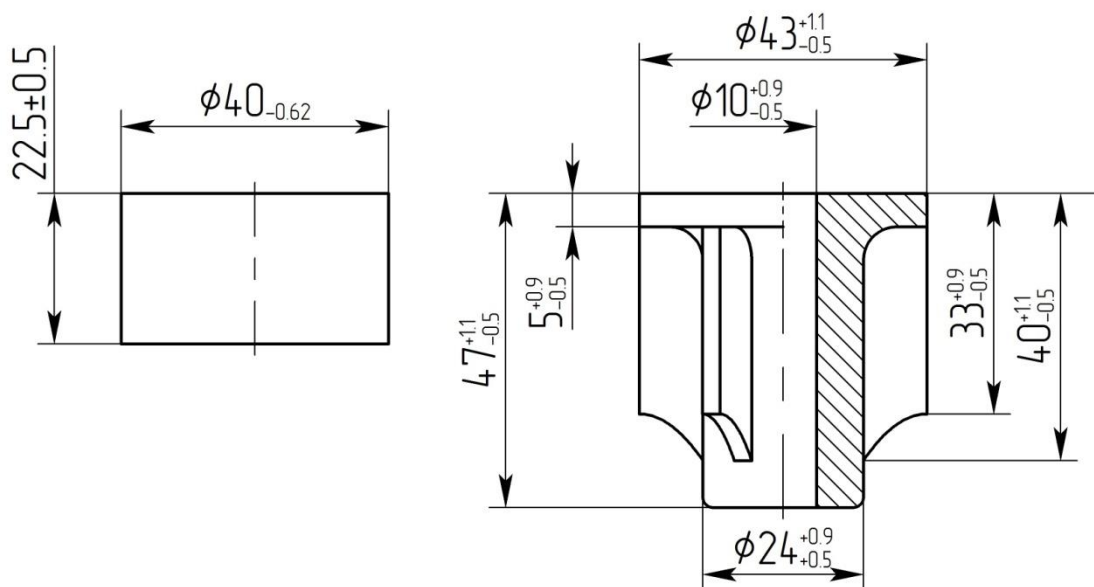


Рис. 3.8. Схема технологического процесса штамповки поковки с 6-ю рёбрами за один переход

3.4. Способы реализации спроектированной технологии и конструкции штампов

Согласно разработанной технологии штамповки поковки стержневого типа с продольными рёбрами необходимо реализовать пять переходов штамповки (см. рис. 3.6). Четыре из них являются типовыми: переход высадки с набором металла в коническую полость пуансона; высадка фланца плоским пуансоном; прошивка наметки под осевое отверстие во фланце с образованием бобышки; прошивка осевого отверстия на необходимую глубину. Полуфабрикаты могут быть получены на высадочных автоматах [92] с применением набора пуансонов и матриц с соответствующими полостями и размерами; с использованием горизонтально-ковочной машины в четырех переходном штампе или на вертикальном прессе с достаточным ходом [93].

Уникальность пятого перехода – прямого выдавливания продольных рёбер заключается в том, что при выполнении выдавливания рёбер требуется

создание противодействия для исключения возможности образования микротрещин в местах соединения рёбер со стержневой частью поковки на протяжении рабочего хода. Проблемы могут возникнуть и на обратном ходе при выталкивании поковки из полости штампа, т.к. рёбра имеют небольшую толщину (см. рис. 3.2) и может произойти либо смятие рёбер, либо их отрыв от стержневой части.

Во избежание брака на заключительном переходе штамповки при оформлении рёбер и удалении поковки из штампа необходима разработка нового способа осуществления прямого выдавливания и конструкции штампа для его реализации.

3.4.1. Выдавливание оребрённых поковок в холодном состоянии

Научным коллективом кафедры «Системы пластического деформирования» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» под руководством д.т.н., проф. А.Э. Артеса и д.т.н., проф. Е.Н. Сосенушкина разработан специальный штамп для прямого выдавливания в холодном состоянии стержневых поковок из алюминиевых сплавов с оребрённой наружной поверхностью [94] (рис. 3.9), работающий по гидромеханическому принципу.

Формообразующие детали штампа, непосредственно контактирующие с деформируемым металлом – пуансон и матрица, были изготовлены на Рязанском заводе ОАО «Тяжпрессмаш». Число пазов для выдавливания ребер на наружной поверхности поковок равно шести. Для создания высокого давления в контейнере матрицы в штампе используется жидкофазная среда (рабочая жидкость), что обеспечивает создание противодействия на протяжении всего рабочего хода пуансона. Конструкция штампа позволяет изготавливать поковки с осевым отверстием, для чего в пуансоне выполнено отверстие для центрирования инструментальной оправки.

Деформируемый металл полуфабриката находится в состоянии

всестороннего квазиравномерного сжатия. Такое напряженное состояние позволяет с большими степенями деформации выдавливать металл. После рабочего хода во время выталкивания поковки из полости матрицы жидкостная среда, находящаяся под высоким давлением способствует качественному удалению из штампа поковки с тонкими ребрами, без нарушений их геометрической формы.

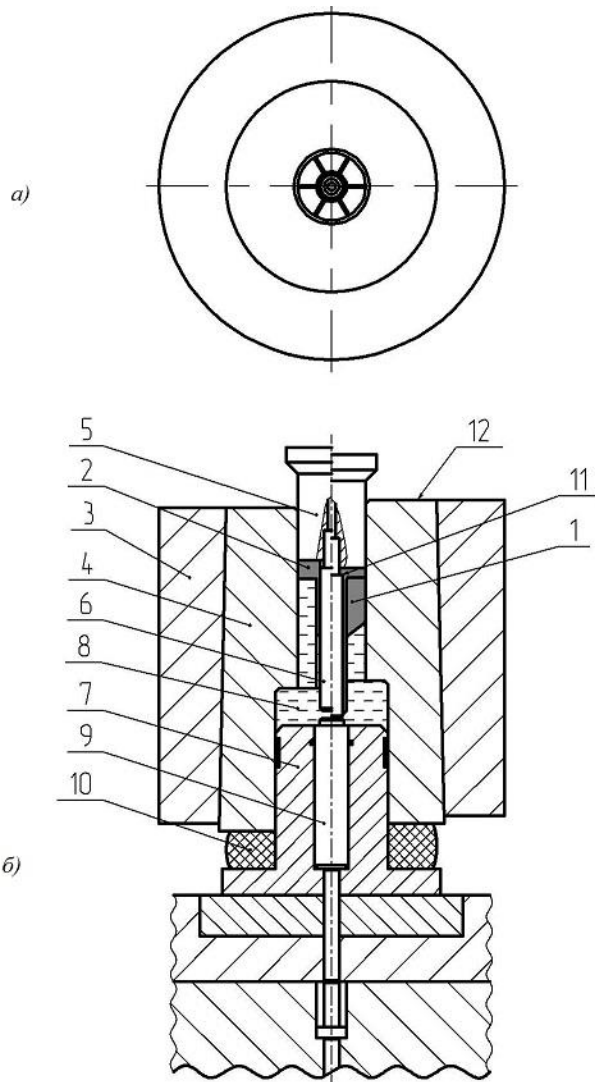


Рис.3.9. Специальный штамп для прямого выдавливания в условиях холодной деформации полых цилиндрических изделий из алюминиевых сплавов с оребрѐнной наружной поверхностью: а – вид сверху; б – схема главного вида (разрез): 1 – поковка; 2 – полуфабрикат; 3 – бандаж; 4 – матрица; 5 – пуансон; 6 – оправка; 7 – плунжер; 8 – жидкофазная среда (рабочая жидкость); 9 – выталкиватель; 10 – буфер; 11 – уступ оправки технологический; 12 – торцевая поверхность матрицы верхняя

Схема выдавливания с противодавлением позволяет создать благоприятное напряженно-деформированное состояние металла и изготавливать полые цилиндрические изделия с оребрением по наружной поверхности из малопластичных алюминиевых сплавов, например, заэвтектических силуминов.

Проследим основные этапы технологического процесса и работу штампа. Для повышения прочностных характеристик рабочих деталей

штампа матрица 4 запрессована в бандаж 3 с натягом, обеспечивающим создание напряжений предварительного сжатия матрицы. Полученный высадкой на предварительном переходе фланцевый полуфабрикат 2 перед выдавливанием помещается в контейнер матрицы 4. Для получения внутреннего диаметра стержневой части необходимого размера с заданной точностью в отверстие полуфабриката вставляется инструментальная оправка [95, 96]. С целью беспрепятственной установки в штамп полуфабриката 2 диаметр его фланцевой части делается меньше по сравнению с максимальным диаметром полости контейнера матрицы 4. По тому же принципу изготавливается внешний диаметр стержневой части. Его выполняют меньше внутреннего диаметра контейнера матрицы, а размер внутреннего диаметра полости в стержневой части изготавливают больше, чем диаметр оправки 6. Пуансон 5 на рабочем ходе при его движении вниз, преодолевает сопротивление металла полуфабриката 2 и пластически деформирует его с уменьшением высоты и одновременным заполнением металлом пазов матрицы 4 в результате затекания в них деформируемого металла с формообразованием ребер на участке наружной поверхности поковки, а оформление стержневой части изделия обеспечивается течением деформируемого металла в зазор между оправкой 6 и матрицей 4. На протяжении всего процесса штамповки жидкостная среда 8, находясь в замкнутой полости контейнера матрицы между внутренними стенками матрицы 4 и торцевой поверхностью плунжера 7, создает противодействие при течении металла. Постоянный подпор реализует схему всестороннего квазиравномерного сжатия, создавая благоприятные условия для деформирования полуфабриката 2, что препятствует нарушению сплошности металла. При этом жидкостное трение приводит к уменьшению касательных напряжений на поверхности контакта металла со стенками матрицы 4. Кроме того, в результате действия создаваемого в контейнере матрицы противодействия рабочей жидкости 8, на начальном этапе деформирования полуфабриката происходит осадка его фланцевой части с заполнением зазора

в верхней части оправки 6, примыкающей к торцу пуансона 5, соответствующей меньшему диаметру оправки, с формированием технологического уступа 11.

При совершении рабочего хода пуансон 5 движется в осевом направлении и через деформируемый полуфабрикат 2 и оправку 6 воздействует на рабочую жидкость 8, уменьшая объем внутри замкнутой полости контейнера матрицы. В результате под действием давления, созданного рабочей жидкостью 8, для компенсации объема, занимаемого оправкой 6 и материалом полуфабриката 2, матрица 4 смещается в направлении, противоположном направлению движения пуансона.

После окончания пластического деформирования пуансон 5 удаляется из матрицы для обеспечения возможности извлечения поковки 1 из контейнера матрицы 4, при этом инструментальная оправка 6 остается в поковке 1, удерживаемая в ней технологическим уступом 11.

Выталкивание поковки 1 из контейнера матрицы 4 происходит силовым воздействием на торцевую поверхность 12 матрицы 4 с перемещением ее вниз, например, ползуном прессы при помощи специальной проставки во время его второго хода, либо за счет дополнительного гидравлического привода с силовым перемещением матрицы вниз. Вынужденное перемещение матрицы способствует уменьшению объема рабочей жидкости 8, создавая дополнительное давление, что приводит к началу перемещения поковки в сторону открытого торца контейнера матрицы, сброс давления происходит на этапе выталкивания поковки 1 из контейнера матрицы 4, сама матрица 4 опускается ниже первоначального уровня, что сопровождается сжатием буферного устройства 10.

Существующая возможность неравномерного заполнения продольных пазов матрицы 4 связана с вероятностью образования зазора между формируемыми продольными ребрами на наружной поверхности поковки 1 и стенками матрицы 4, через который может проникать рабочая жидкость 8 до наступления этапа удаления поковки 1 из полости контейнера матрицы 4.

В этом случае выталкивание поковки происходит при помощи осевого перемещения оправки 6 вверх, за счет поступательного перемещения выталкивателя 9. При этом матрица 4 возвращается в исходное положение, за счет восстановления формы буферного устройства 10.

3.4.2. Выдавливание оребренных поволоков с предварительным нагревом заготовок

Для расширения сортамента получаемых изделий за счет обеспечения возможности получения поволоков из малопластичных алюминиевых сплавов с продольными ребрами с соотношением длины стержневой части к диаметру до трех и более $3,0 \leq k = \frac{h}{d} \leq 4,0$ и соотношением ширины ребра к его толщине до десяти и более $10 \leq \frac{R_3 - R_0}{t} \leq 12$ разработан технологический процесс штамповки стержневых поволоков с предварительным нагревом заготовок, включающий несколько операций [97].

На первом этапе штампуют фланцевую часть 2 полуфабриката 1 посредством набора металла высадкой заготовки круглого сечения из алюминиевого сплава необходимой марки. Высаживаемую часть полуфабриката 1 нагревают до температуры рационального интервала обработки алюминиевых сплавов, составляющей 450–470°C, что обеспечивает увеличение пластических свойств материала и уменьшение технологической силы прессового оборудования. Поскольку номенклатура поволоков не ограничивается одним типоразмером, воспользуемся для рассуждений параметрической моделью полуфабриката (рис. 3.10) [96], изготовленного на первом этапе и представляющим собой стержень с цилиндрическим фланцем 2 высотой H_1 . Полуфабрикат содержит внутреннюю полость 3 вдоль оси симметрии глубиной H_2 не менее 1,5

высоты фланца: $H_2 \geq 1,5H_1$. На торце фланцевой части 2 полуфабриката 1 выполнен выступ 4 для предотвращения образования утяжины (на последующем этапе выдавливания ребер). Толщина выступа 4 S_1 равна толщине стенки цилиндрической части S_2 : $S_1=S_2$, а высота выступа 4 H_3 составляет 0,4–0,6 его толщины: $H_3=(0,4-0,6)S_1$. На втором этапе осуществляют формообразование продольных ребер в зоне фланца 2 полуфабриката 1 посредством операции прямого выдавливания.

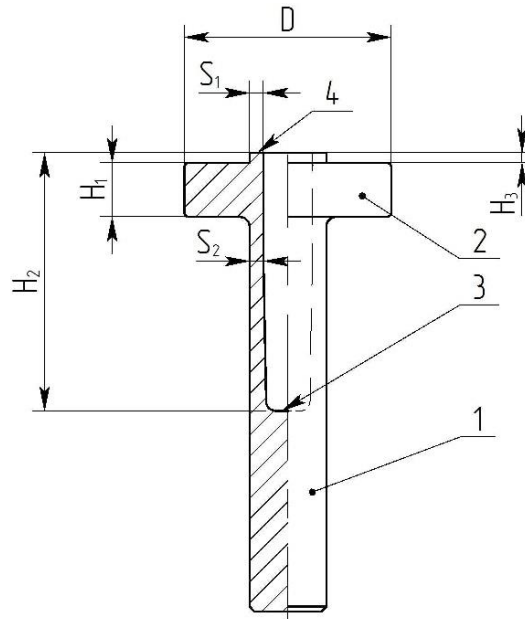


Рис. 3.10. Параметрическая модель полуфабриката для выдавливания
рёбер

Штамп для реализации операции выдавливания ребер показан на рис. 3.11 [97, 98]. Перед установкой в рабочую зону штампа фланцевую часть 2 полуфабриката 1 подвергают повторному нагреву до температуры 450–470°C, в то время как матрицу 5 нагревают до температуры 250–300°C встроенным в штамп тэном 6. Стержневая часть полуфабриката 1 центрируется по отверстию диаметром d_1 в поршне 7, которое соответствует диаметру заготовки d_2 : $d_1=d_2$, в пределах посадки с зазором, обеспечивающим допуск на посадку F10/h10. При выдавливании пуансон 8 оправкой 9 в виде запрессованного в пуансон ступенчатого стержня заходит в отверстие 3 полуфабриката 1 с фланцем 2. В момент соприкосновения торца пуансона 8 с поверхностью фланца 2

полуфабриката 1 образуется кольцевой зазор 10 между калибрующей частью матрицы 5 и оправкой 9. При движении пуансона 8 вниз обеспечивается выдавливание металла в пазы 11 (рис. 3.12) матрицы 5 и во втулочную часть стержня через упомянутый кольцевой зазор 10 до образования ребер требуемой конфигурации.

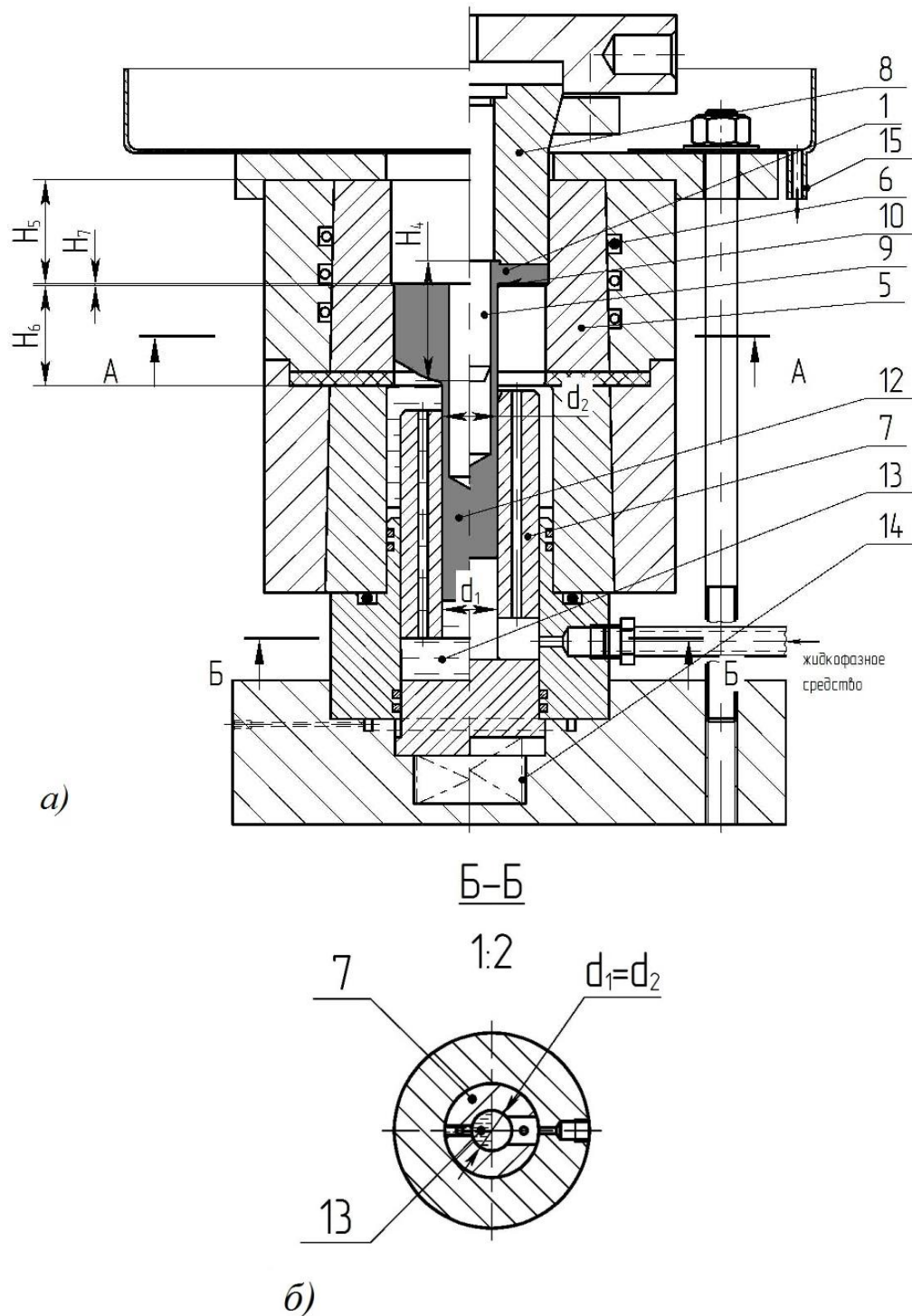


Рис. 3.11. Штамп гидромеханический для прямого выдавливания
оробрённой поковки (а) и сечение Б–Б (б)

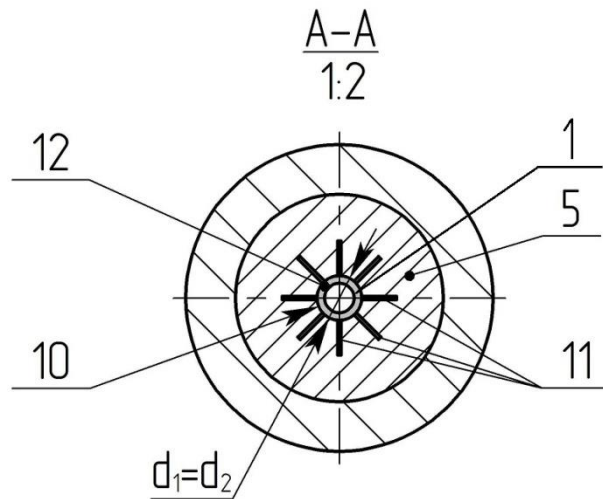


Рис. 3.12. Сечение А–А штампа

При этом глубина внутреннего отверстия H_2 составляет не менее 1,5 высоты фланца H_1 полуфабриката 1 под выдавливание: $H_2 \geq 1,5H_1$, а длина оправки 9 составляет 0,7–0,9 глубины отверстия 3: $H_4 = 0,7–0,9H_3$ (см. рис.3.10). В процессе деформации полуфабриката 1 под выдавливание в отверстии 3 образуется закрытая полость, прилегающая к оправке 9 (см. рис. 3.11). При дальнейшем течении материала полуфабриката 1 ее донная часть движется быстрее, чем оправка 9, что приводит к увеличению объема закрытой полости и к образованию области пониженного давления. Это, в свою очередь, приводит к невозможности снятия поковки 12 с оправки 9 без дополнительного приложения силы. Для компенсации области пониженного давления в отверстии 3 поковки 12 и устранения возможности «присасывания» последней к оправке 9 предусмотрено воздушное сообщение отверстия 3 с внешней средой. Оно осуществляется через канал (отверстие), выполненный вдоль оси оправки 9.

При обратном ходе ползуна прессы и возвращении пуансона 8 в исходное крайнее верхнее положение в закрытую полость матрицы 5 происходит подача жидкофазной среды 13 от используемой гидростанции, например, любого смазочного материала для горячей штамповки (см. рис. 3.11). Жидкофазная среда 13 заполняет закрытую полость, образованную матрицей 5 и поковкой 12. При ее контакте с горячей поковкой 12 и

матрицей 5 происходит резкое повышение давления. Для предотвращения скачкообразного увеличения давления в полости штампа поршень 7 выполнен с возможностью ограниченного перемещения в осевом направлении. Поршень 7 отклоняется вниз под действием резко увеличившегося давления жидкофазной среды 13, и увеличивает объем внутри матрицы 5, в результате чего давление жидкофазной среды 13 стабилизируется.

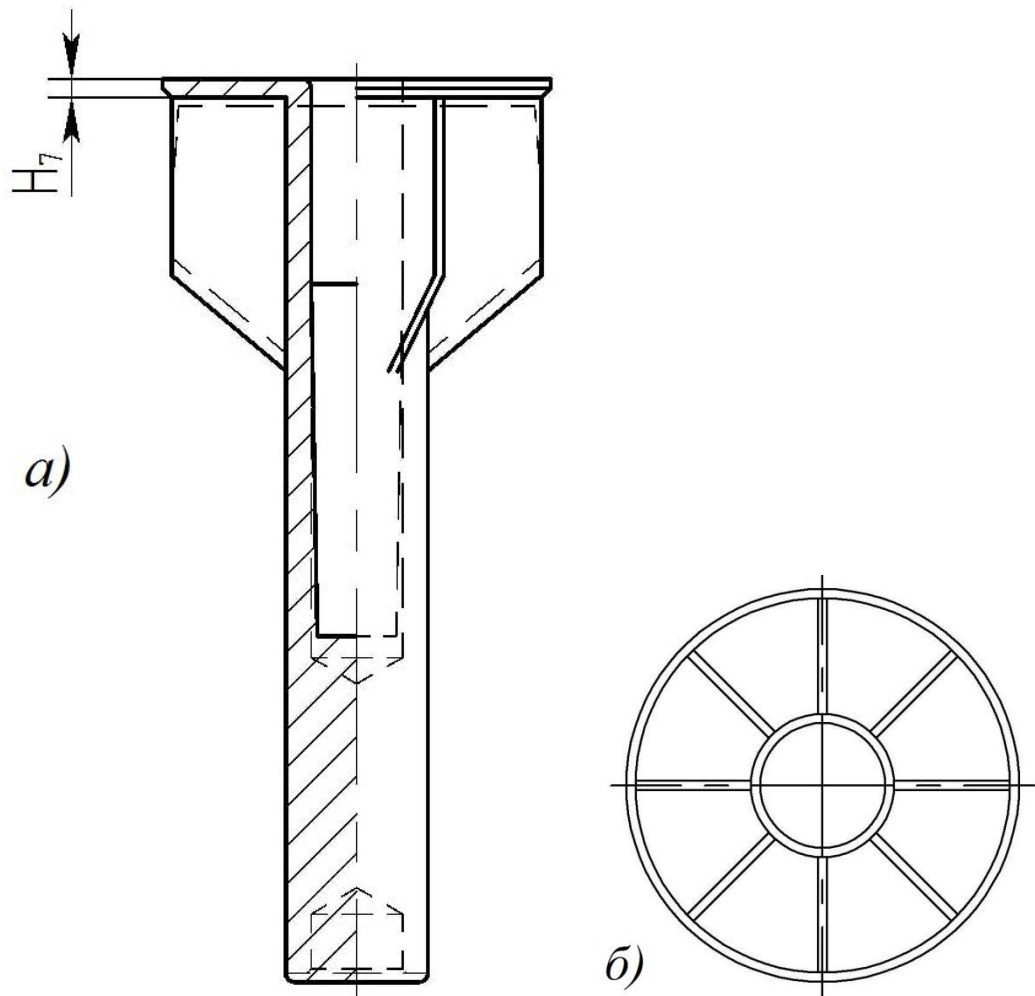


Рис. 3.13. Схема поковки с продольным ребрением (а) и вид на фланец (б)

Под давлением жидкофазной среды 13 поковка 12 выталкивается из матрицы 5. При этом обеспечивается качественное извлечение выдавленных ребер поковки 12 из пазов 11 матрицы 5. Выталкивание ребер поковки 12 из пазов 11 наступает раньше удаления поковки 12 из

контейнера матрицы 5 за счет того, что высота контейнера матрицы H_5 больше высоты пазов матрицы H_6 : $H_5 = 1,1 - 2,0 H_6$. Выплеск жидкофазной среды 13 до полного извлечения ребер поковки 12 исключен благодаря цилиндрическому пояску (пресс-остатку) высотой H_7 (рис.3.13) [97, 99], образующих герметичную полость внутри матрицы 5. Поршень 7 при уменьшении давления в полости штампа под действием пружинного элемента 14 возвращается в исходное положение. Выплеснувшая из матрицы 5 жидкофазная среда 13 сливается в бак-отстойник 15 через специальные каналы, оставляя на поверхности матрицы 5 тонкий слой смазочного материала жидкофазной среды 13. Установка готова принять следующую заготовку под выдавливание.

3.5. Методика проектирования технологического процесса выдавливания поволоков с продольными рёбрами

На основе сложившейся практики проектирования технологических процессов объемной штамповки разработана соответствующая методика, которая представляет собой последовательность этапов технологического проектирования.

1. В зависимости от показателей пластичности металла выбрать вид обработки давлением: в холодном, полугорячем или в горячем состоянии с предварительным определением типа кузнечно-штамповочного оборудования.

2. В соответствии с видом обработки давлением и маркой металла назначить температурный интервал штамповки и провести подготовку исходных данных для проектирования чертежа поковки, включая группу материала, степень сложности поковки, класс точности, конфигурацию поверхности разъема, расчетную массу поковки.

3. Анализ технологичности по чертежу механически обработанной детали и назначение напусков на нетехнологичные элементы; при

необходимости назначение штамповочных уклонов; назначение припусков на номинальные размеры в соответствии с классом точности на функциональные поверхности детали, руководствуясь при штамповке в холодном и полугорячем состоянии рекомендациями справочной литературы, или, пользуясь ГОСТ 7505–89 [100] при штамповке в горячем состоянии, а также провести назначение радиусов закруглений контура поковки.

4. Назначение допусков на размеры проектируемой поковки и составление её чертежа с размерами в холодном состоянии.

5. При штамповке с предварительным нагревом составление чертежа поковки с размерами в горячем состоянии.

6. Расчет объёма и массы поковки и при необходимости отдельных её элементов. Выбор сортамента исходного металла и определение формы сечения и размеров исходной заготовки. В зависимости от масштаба производства, размеров поперечного сечения исходного металла провести выбор способа разрезки на мерные заготовки, отрезного оборудования и способа очистки поверхности и её дальнейшей подготовки.

7. В соответствии с предварительно выбранным типом кузнечно-штамповочного оборудования назначить состав формоизменяющих операций.

8. Провести расчет силовых параметров и степеней деформаций по операциям, согласно предложенным математическим моделям прямого выдавливания поковки с продольными рёбрами, сравнить полученные значения деформаций с предельно-допустимыми и, при необходимости, провести дробление деформаций по переходам штамповки с разработкой чертежей полуфабрикатов.

9. В зависимости от масштаба производства, конфигурации заготовок, полуфабрикатов по переходам и поковок, точности их размеров и силовых параметров провести выбор моделей кузнечно-штамповочного оборудования для реализации технологии по операциям и переходам.

10. Согласовать выбор типов штампов и их габаритов с размерами рабочего пространства оборудования.

11. В зависимости от типа применяемого штампа (специальный или переналаживаемый), числа и последовательности переходов технологического процесса, а также расположения нагревательного устройства, разместить переходы в штампе в виде ручьев, сменных вставок или набора сменных рабочих деталей.

12. При сложной конфигурации поковки, имеющей продольные рёбра, в связи с особенностями переходов технологического процесса штамповки, течения металла и схемы удаления готовой поковки из штампа, следует отказаться от типовых решений и воспользоваться предложениями независимых исследователей или научно обоснованными конструктивно-технологическими решениями автора, приведёнными в главе 2 по расчету силовых параметров и в главе 3, касающихся как переходов штамповки, так и конструкций штампов.

3.6. Выводы по главе 3

1. Предложен ряд схем альтернативных вариантов многопереходных технологических процессов объемной штамповки стержневой поковки с продольными рёбрами. Наиболее сложным для реализации переходом является заключительный переход прямого выдавливания продольных рёбер из фланцевой части полуфабриката. Необходимость подпора деформируемого металла на протяжении всего рабочего хода и условия выталкивания готовой поковки из матрицы требует разработки нетрадиционных конструкций штампов, работающих по гидромеханическому принципу.

2. Разработаны новые технологические процессы выдавливания поволоков с продольным оребрением и конструкции штампов для их реализации. Один из вариантов технологии предназначен для штамповки в

условиях холодной пластической деформации, другой процесс реализуется в условиях деформации с предварительным нагревом заготовок.

В частности, разработана и опробована в промышленном производстве технология холодного выдавливания цилиндрических поковок со сквозным отверстием на плавающих оправках (патент РФ № 2356682 на изобретение). Это дает возможность получать поковки с соотношением высоты к внутреннему диаметру более трех, оправка при этом не связана жестко с пуансоном. Такой прием использован в конструкции штампа для выдавливания оребренных поковок.

3. Для холодной штамповки поковок с продольным оребрением из трудно деформируемых алюминиевых сплавов разработана и запатентована конструкция гидромеханического штампа. Новая технология и штамп для выдавливания стержневой поковки с продольными ребрами (патент РФ № 78450 на полезную модель) опробованы в лабораторных условиях, отштампована партия поковок, которые полностью соответствуют требованиям технического задания АО «НПО «Базальт» г. Москва.

4. С целью интенсификации процесса выдавливания тонких ребер на стержневых поковках разработан способ объемной штамповки и конструкция гидромеханического штампа с зональным нагревом фланцевой части полуфабриката подвергаемого выдавливанию (патент РФ на изобретение №2484913), а для получения в поковках глубоких глухих отверстий разработана конструкция пуансона для горячего деформирования с наконечником одноразового использования (патент РФ №86510 на полезную модель);

5. Разработанная методика технологического проектирования, отличающаяся наличием математического аппарата для расчета сил деформирования по операциям, входящим в технологический процесс штамповки, позволяет генерировать процессы выдавливания поковок с продольными рёбрами, а созданный алгоритм на основе формализованного

описания этапов расчетов по существующим и разработанным моделям позволяет принять рациональное решение по выбору варианта из множества альтернатив.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЫДАВЛИВАНИЮ ПОКОВОК С ПРОДОЛЬНЫМИ РЁБРАМИ

Эксперименты по штамповке оребрённых поковок из алюминиевых сплавов проводились с использованием гидравлического пресса номинальной силой 2500 кН производства завода «Гидропресс» г. Оренбург, который изображен на рис. 4.1 и установлен в лаборатории технологического полигона ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».



Рис. 4.1. Общий вид гидропресса модели ПЗ234А для проведения экспериментов

4.1. Устранение причин возникновения брака

Попытки провести штамповку прямым выдавливанием продольных рёбер на фланцевом участке поковок в штампе простой конструкции без гидравлического подпора приводили к отрыву рёбер в местах перехода их к основанию, как показано на рис. 4.2.



Рис. 4.2. Отрыв рёбер от стержневой части поковки

Этот факт можно объяснить тем, что при прямом выдавливании рёбер с увеличением хода пуансона происходит одновременное увеличение поверхности контакта рёбер с матрицей. Несмотря на применение смазочных материалов, силы трения настолько высоки, что приводит к опережению продвижения стержневой части в канале по сравнению с перемещением самих рёбер в пазах. Усугубляется это наличием концентраторов напряжений в местах сопряжения выдавливаемых рёбер со стержневой частью. При наступлении момента, когда интенсивность напряжений в местах их концентрации превышает предел прочности – происходит отрыв рёбер от

стержневой части поковки, что приводит к браку. После выталкивания поковки из матрицы, после снятия упругих деформаций рёбра в местах отрыва получают изгиб и их неприкрепленные концы отходят от стержневой части.

Другой проблемой при штамповке алюминиевых сплавов является склонность к адгезии с поверхностью штампового инструмента, что приводит к налипанию частичек алюминия на инструмент (холодная сварка) и в дальнейшем к браку в виде вырывов на поверхности поковок.

Нельзя не отметить появление утяжин при небольшой толщине фланца поковки со стороны обратной расположению рёбер, т.е. на поверхности контакта пуансона с фланцем. Для компенсации этого вида дефектов при необходимости независимыми исследователями предложено вводить в конструкцию пуансонов рассекатели, локально увеличивающие толщину фланцевой части напротив расположения рёбер. Подобные примеры описаны в разделах 1.5 и 1.6.

Появление брака, обусловленного отрывом рёбер от стержневой части, привело к разработке новой конструкции штампа с гидравлическим подпором штампуемого металла, описанной в главе 3 (см. рис. 3.9, рис. 3.11). На этапе выталкивания поковки жидкость облегчает удаление из матрицы поковки без ее коробления или разрушения.

В лаборатории технологического полигона МГТУ «СТАНКИН» опробована технология и штамп для получения поковок с продольным оребрением с числом рёбер на наружной цилиндрической поверхности – 6.

На рис. 4.3 представлена поковка (а) с выдавленными рёбрами и не доштампованный полуфабрикат (б) с предыдущей стадии деформирования. Для проведения экспериментов в конструкцию поковки добавлен элемент – осевое отверстие, при формировании которого применялась плавающая оправка необходимого диаметра, которая не связана жестко с пуансоном. Процесс выдавливания подробно описан в разделе 3.3.



Рис.4.3. Поковка с 6-ю продольными рёбрами на разных этапах деформирования

Причем после выталкивания из штампа готовой поковки (слева) внутри осевого отверстия остаётся оправка, удаление которой осуществляется вне штампа.

4.2. Реализация перехода прямого выдавливания оребрения

Для реализации способа получения поковки с продольными рёбрами из алюминиевых сплавов использовался стержневой полуфабрикат с фланцем и внутренним отверстием. Модельный полуфабрикат с диаметром стержня $d_2=31_{-0,84}$ мм, общей длиной 150 мм, с фланцем диаметром $D=84$ мм, при толщине/высоте фланца $H_1=15$ мм, внутренним отверстием диаметром $d=21$ мм и его глубиной $H_2=50$ мм из алюминиевого сплава АК7 получили прямым выдавливанием стержневой части (рис. 4.4).

Нагрев полуфабриката до температуры 450°C осуществлялся в камерной электропечи сопротивления марки СНОЛ–1.6.2,5.1/9–М2У4.2. Точность автоматического регулирования номинальной рабочей температуры составляла ± 10 К. Измерение температуры полуфабриката проводилось инфрокрасным пирометром Optris P20LT с оптическим

разрешением 120:1 при бесконтактном измерении температуры в интервале от 0 до 1573 К по тепловому излучению в диапазоне длин волн 8–14 мкм.



Рис. 4.4. Полуфабрикат после первого этапа

Выдавливание проводилось с использованием гидромеханического штампа, матрица которого нагревалась встроенными тэнами до температуры 250°C. Штамповка осуществлялась на прессе с гидравлическим приводом модели П3234А номинальной силой 2500 кН производства Оренбургского завода «Гидропресс» (см. рис. 4.1) со скоростью перемещения ползуна 6 мм/сек.

а)



б)



Рис. 4.5. Гидромеханический штамп:

а – штамп в рабочем пространстве гидравлического прессы
модели ПЗ234А номинальной силой 2500 кН;

б – рабочие детали штампа

Для исключения возможности налипания металла поковки на поверхность рабочих деталей штампа применялся технологический смазочный материал в виде суспензии высокодисперсного графита, который при нанесении на пуансон, матрицу и оправку создает пограничную прослойку между поверхностями штампуемой поковки и инструмента. Штамп в рабочей зоне прессы показан на рис. 4.5.

Выталкивание отштампованной поковки из контейнера матрицы в лабораторных условиях осуществлялось жидкостью, находящейся под высоким давлением. Для этого установка переворачивалась на 180° . Зона матрицы заполнялась жидкофазной средой (маслом И20), после чего устанавливался поршень. При воздействии ползуна прессы на поршень он вытеснял жидкофазную среду, посредством которой поковка удалялась из матрицы.

Полученная поковка (рис. 4.6) должного качества имела длину стержневой части 160 мм при ее диаметре 31 мм; ширину ребра 20 мм при его толщине 2,5 мм, что соответствует техническому заданию.

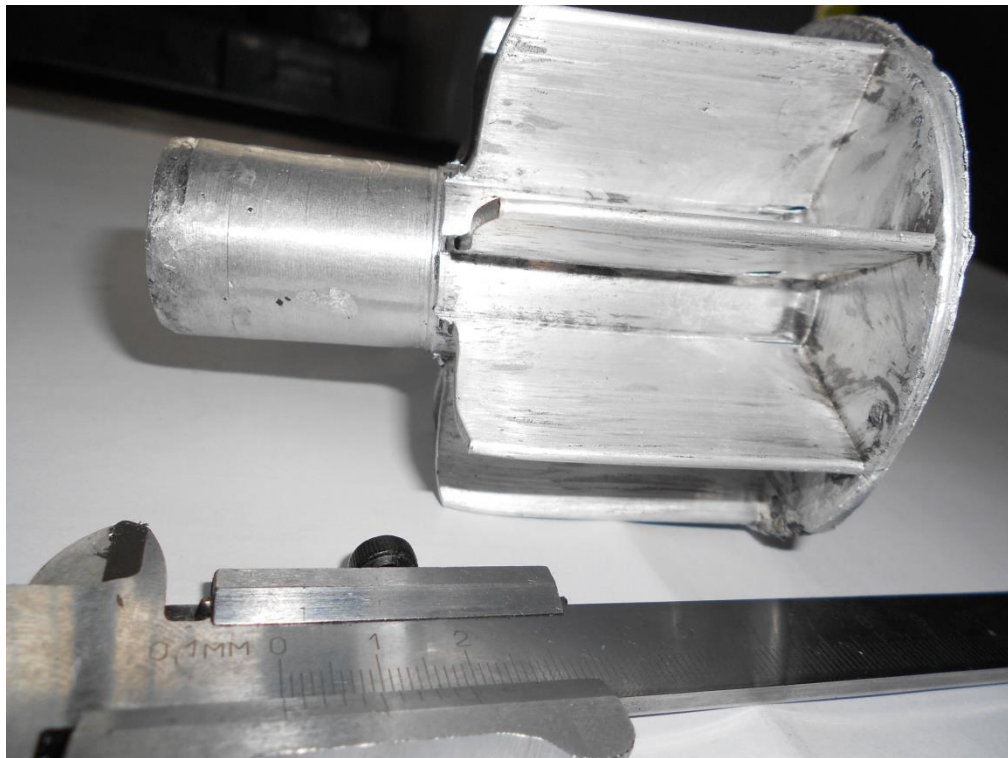


Рис. 4.6. Оребрённая поковка после выдавливания, число ребер – 8

Наибольшие трудности при изготовлении штампа вызвала обработка матрицы для выдавливания, имеющей 8 рёбер [98, 99]. Формообразование пазов было выполнено с высокой точностью на электроэрозионном станке благодаря использованию программного комплекса Pro/Engineer. Выполненная трехмерная модель поковки была импортирована из стандартного формата IGES цифрового представления при коммуникации данными определения продукта в 2D или 3D формат векторной графики, используемый в качестве универсального большинством CAD/CAM – системами. Далее использовали методику проектирования двухкоординатной электроэрозионной обработки для представления зоны обработки матрицы с целью моделирования траектории непрофилированного электрода–инструмента (проволоки) в соответствии к компьютерной моделью матрицы. В качестве непрофилированного электрода–инструмента использована проволока из латуни диаметром 0,25 мм. С помощью разработанного специалистами МГТУ «СТАНКИН» постпроцессора в соответствии со спроектированной моделью обработки была сгенерирована программа на станок с ЧПУ [101]. Необходимую точность изготовления глубоких пазов в матрице обеспечило использование двухкоординатного электроэрозионного оборудования фирмы SEIBU (Япония). Для ориентации заготовки матрицы в рабочей зоне станка было спроектировано и изготовлено специальное приспособление.

Проведенные натурные испытания показали возможность использования технологического процесса и штампа для его реализации при изготовлении поволоков со стержневой частью и тонкими ребрами с преимущественным соотношением длины стержня к диаметру более трех, при отношении ширины ребра к его толщине более десяти и при отношениях толщин стенок стержневой части к толщинам ребер от двух

до пяти $2 \leq \frac{(d - d_{оме})t}{2} \leq 5$ способом прямого выдавливания из

полуфабриката в форме стержня с цилиндрическим фланцем, имеющим внутреннее отверстие глубиной больше высоты фланца.

Выдержанный интервал температур нагрева зоны фланца, значение отношения диаметра внутреннего отверстия к высоте фланца, наличие выступа требуемых размеров на торцевой поверхности фланца, подогрев матрицы до заданных температур и удаление поковки из матрицы жидкофазной средой обеспечивают получение качественной стержневой поковки из малопластичного алюминиевого сплава АК7.

Полученная поковка при изготовлении детали типа стабилизатора, в дальнейшем подвергается механической доработке (рис. 4.7), заключающейся в удалении пресс-остатка с помощью операции точения и технологического напуска в нижней части ребер, в обработке растачиванием внутренней поверхности полости.

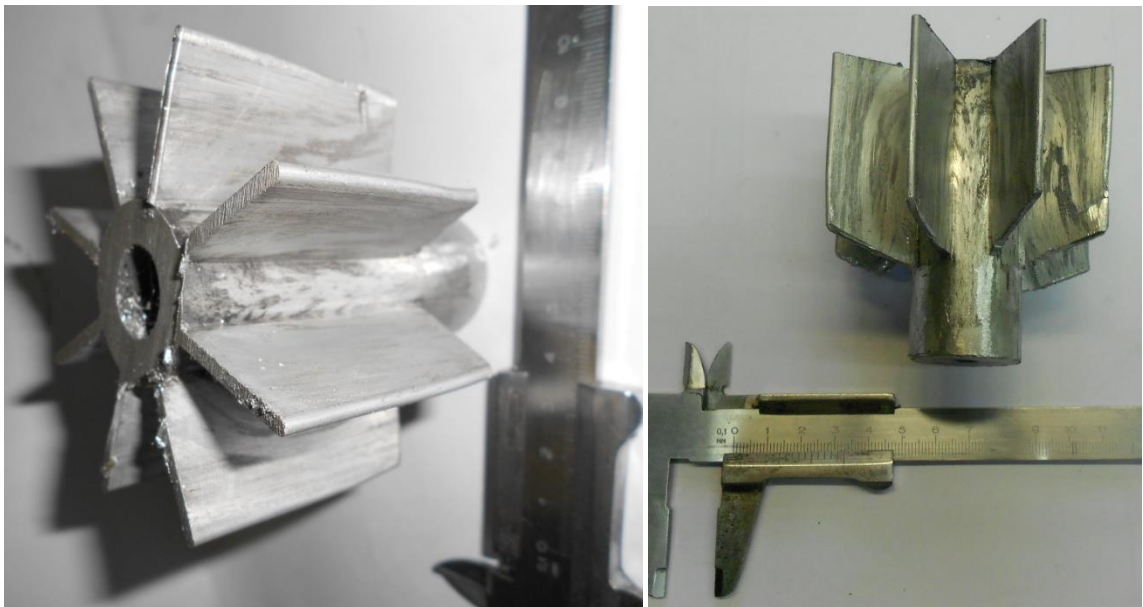


Рис. 4.7. Участок поковки с 8-ю продольными ребрами после проведенной механической обработки

Хотя в экспериментальных исследованиях участвовала поковка конкретной формы и размеров, однако в штампе при использовании рабочих деталей другой конфигурации (матриц, пуансонов и оправок) могут быть изготовлены поковки с другими формой и расположением

ребер, например, со спиральным оребрением путем винтового истечения металла.

Геометрические соотношения и технологические режимы, использованные при физическом моделировании, приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Геометрические соотношения и технологические режимы,
использованные в эксперименте

Температура нагрева области фланца заготовки, °C	Температура матрицы, °C	Отношение H ₂ /H ₁	Отношение S ₁ /S ₂	Отношение H ₃ /S ₁	Отсутствие нарушения сплошности материала	Соответствие размеров и формы требуемым
410	150;200; 250;300	0,75; 1,00; 1,50	0,8; 1,0; 1,2	0,3; 0,4; 0,6; 0,7	нет	нет
430	150;200; 250;300	0,75; 1,00; 1,50	0,8; 1,0; 1,2	0,3; 0,4; 0,6; 0,7	нет	нет
450; 470	150;200	0,75; 1,00; 1,50	0,8; 1,0; 1,2	0,3; 0,4; 0,6; 0,7	нет	нет
	250; 300	0,75; 1,00	0,8; 1,0; 1,2	0,3; 0,4; 0,6; 0,7	да	нет
		1,5	0,8; 1,0; 1,2	0,3	да	нет
			0,8	0,4; 0,6	да	нет
			1,0	0,4; 0,6	да	да
			1,2	0,4; 0,6	да	*
			0,8; 1,0; 1,2	0,7	да	*
Примечание: * - нецелесообразно по причине увеличенного расхода металла						

Из данных табл. 4.1 видно, что не все технологические режимы и сочетания геометрических размеров поковки (см. рис. 3.2) приводили к удовлетворительным результатам. При пониженных температурах фланцевой части полуфабриката (410, 430°C) и матрицы (150, 200°C) выдавливание приводило к тому или иному виду брака. Также оказывают влияние и относительные геометрические параметры (первые 3 строки таблицы 4.1).

4.3. Исследование распределения толщины полученных выдавливанием рёбер

Для оценки качества полученных поковок были произведены измерения толщин ребер. Измерения проводились микрометром с точностью измерения до 0,001 мм. Определение толщины каждого ребра осуществлялось в трех точках на расстоянии 5 мм от наружного края в вертикальной плоскости и интервалом 15 мм между точками и верхним краем согласно схеме на рис. 4.8.

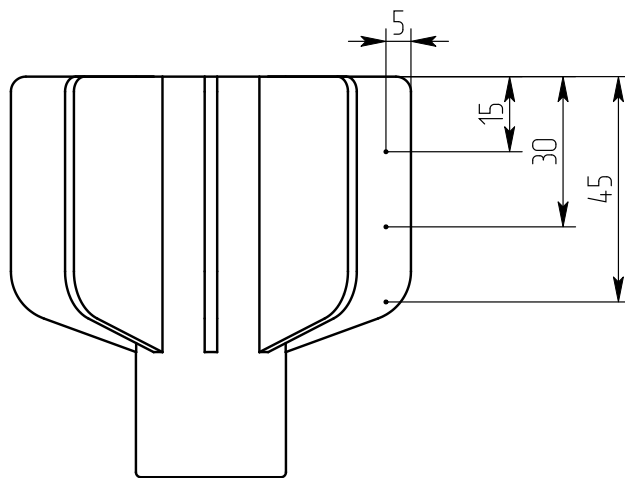


Рис.4.8. Схема расположения точек, в которых проводили измерения толщины ребра

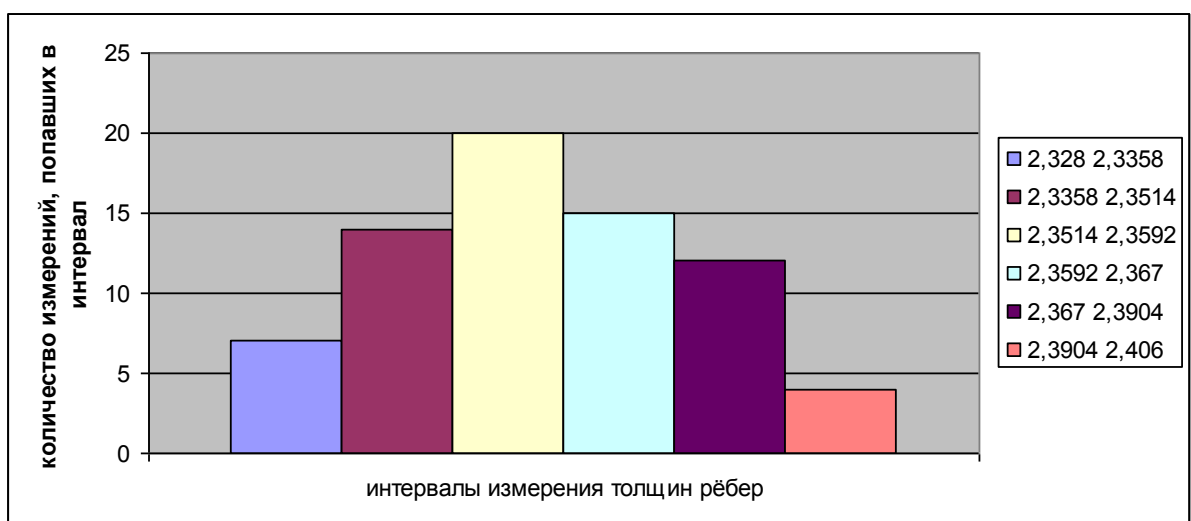


Рис. 4.9. Гистограмма распределения толщины ребра

Для получения достоверных значений толщины измерения в каждой точке повторялись три раза. В результате измерений было получено 72 значения толщины ребра поковки. Для наглядности результаты измерений представлены в виде гистограммы на рис. 4.9. Номинальная толщина ребра составляет $s_{\text{ном}}=2,5_{-0,4}$ мм. Минимальное значение $s_{\text{min}}=2,328$ мм, а максимальное $s_{\text{max}}=2,406$ мм. Несмотря на отклонения от номинального размера, которые связаны с погрешностями изготовления матрицы и ее упругими деформациями, а также погрешностями самих измерений поковки, полученные результаты находятся в поле допуска размера. Тренд гистограммы свидетельствует о качестве получаемого изделия, а закон распределения толщин близок к нормальному.

4.4. Выводы по главе 4

1. При выдавливании поковок с продольными рёбрами может возникнуть ряд специфических дефектов, связанных с искажением геометрии рёбер, иногда приводящих к разрушению поковки. Во избежание дефектообразования необходимо применение специальных штампов, функционирующих по гидромеханическому принципу, конструкции которых разработаны при участии автора, а также назначение обоснованных термомеханических режимов выдавливания.

2. Проведенные экспериментальные исследования показали эффективность использования разработанных конструкций штамповой оснастки для выдавливания алюминиевых поковок из сплавов АК6 с 6-ю продольными рёбрами толщиной 3,0 в холодном состоянии и АК7 с 8-ю продольными рёбрами толщиной 2,5 мм с предварительным нагревом полуфабрикатов и штамповой оснастки. Опытные образцы поковок переданы в АО «НПО «Базальт». Поскольку в условиях предприятия стабилизаторы данного типа и размеров из алюминиевых сплавов пластическим деформированием не изготавливались, переданные

результаты и рекомендации будут использованы при освоении разработанных технологий в ближайшей перспективе.

3. При исследовании распределения толщин рёбер поковки получены следующие отклонения от номинального размера (номинальная толщина ребра детали составляет $s_{\text{ном}}=2,5_{-0,4}$ мм): минимальное значение толщины ребра поковки $s_{\text{min}}=2,328$ мм, а максимальное – $s_{\text{max}}=2,406$ мм. Отклонения связаны с погрешностями изготовления матрицы и ее упругими деформациями, а также погрешностями измерения поковок, полученные результаты находятся в поле допуска на номинальные размеры по толщине и диаметрам, что позволит обойтись без дальнейшей механической обработки функциональных поверхностей.

4. Отдельные результаты работы, обладающие новизной, использованы в учебном процессе при чтении лекций по дисциплинам «Теория обработки металлов давлением», «Проблемы прочности и пластичности в технологических процессах» и «Технология холодной объемной штамповки» в ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные теоретические, технические и технологические решения и разработки, направленные на обеспечение возможности получения цельноштампованных поковок с продольными рёбрами при замене сварных конструкций и изготовленных фрезерованием с повышением производительности за счет уменьшения припусков и снижением металлоёмкости, что имеет существенное значение для развития машиностроения.

1. Разработанная математическая модель позволяет установить характер изменения и оценить величины давления на контакте деформируемого металла с инструментом, а также значения и интенсивность изменения силовых и деформационных параметров технологического процесса прямого выдавливания поковок, имеющих продольные рёбра.

2. Оценка влияния геометрии поковки на технологические параметры показывает, что сила прямого выдавливания убывает при росте двух геометрических параметров: толщины фланцевой части и диаметра стержневой части поковки. При варьировании толщиной фланца поковки в диапазоне $2,5 \leq h_0 \leq 62$ мм, например, с увеличением толщины фланца в 10 раз (с 5 мм до 50 мм) сила деформирования снижается в 1,92 раза со значения 2300 кН до 1210 кН. При увеличении диаметра стержневой части поковки в 4 раза в диапазоне $20 \leq D_0 \leq 80$ мм, сила прямого выдавливания продольных рёбер также убывает в 3,8 раза со значения 2407 кН до значения 630 кН, т.к. изменение D_0 в сторону увеличения влияет на уменьшение площади контакта ребра с матрицей и, следовательно, на уменьшение силы трения.

На рост силы деформирования оказывает влияние диаметр фланцевой части поковки, при увеличении которого в 2 раза с 50 мм до 100 мм прослеживается интенсивный рост силы деформирования в 7 раз

со значения 500 кН до значения 3500 кН, что не противоречит механике процесса выдавливания цилиндрических поковок с продольным оребрением, т.к. площадь контакта является квадратичной функцией от D_3 . В этом случае также установлен рост тангенциальной составляющей деформации со значения -0,7 до значения 3,9 с одновременным увеличением радиальной составляющей деформации по абсолютной величине со значения 1,4 до значения 5,7.

Увеличение количества выдавливаемых рёбер вызывает рост силы прямого выдавливания. Так, например, для выдавливания 4-х рёбер требуется сила 1250 кН, а при увеличении числа рёбер поковки до 12, т.е. в 3 раза, сила, необходимая для прямого выдавливания, возрастает до значения 3500 кН, т.е. увеличивается в 2,8 раза. С добавлением рёбер неизменно увеличивается площадь контакта металла с матрицей, что ведёт к росту сил трения, на преодоление которых требуется увеличение суммарной силы прямого выдавливания.

Установлены характер изменения и величина силы на преодоление трения по плоскостям рёбер, действующая в плоскости rz . При увеличении количества рёбер с 4-х до 12-ти сила трения увеличивается по абсолютной величине от значения 322,44 кН до 378,47 кН. Увеличение радиуса заготовки в интервале $22,5 \leq R_3 \leq 52,5$ мм ведет к увеличению силы трения по абсолютной величине от значения 64,23 кН до 617,92 кН.

Если увеличивать толщину фланцевой части поковки в диапазоне $2,5 \leq h_0 \leq 62,0$, сила на преодоление трения возрастает по абсолютной величине с 327,71 кН до значения 357,44 кН, а при увеличении радиуса стержневой части поковки в диапазоне $10 \leq R_0 \leq 35$ мм сила убывает по абсолютной величине от 568,37 кН до значения 5,90 кН.

Для конкретной поковки с 8-ю рёбрами и известными геометрическими размерами сила прямого выдавливания 2140 кН с учетом сил трения 349,44 кН составила 2489,44 кН.

Установлен характер влияния диаметра стержневой части на

компоненты деформации. Тангенциальная деформация по абсолютной величине убывает со значения 6,7 до 0,8, а абсолютная величина радиальной составляющей деформации увеличивается со значения 0,96 до значения 8,5. Осевая деформация остается постоянной, т.к. не зависит от диаметра стержневой части. Деформация сдвига $\epsilon_{r\phi}$ по абсолютной величине увеличивается от значения 0,24 до значения 0,72.

Изменение толщины фланцевой части поковки приводит к изменению значений деформаций. Тангенциальная составляющая деформации увеличивается с 0,97 до значения 8,0; радиальная деформация по абсолютной величине уменьшается от 5,8 до 0,7; осевая компонента деформации также уменьшается по абсолютной величине от значения 3,7 до значения 0,5. Деформация сдвига по абсолютной величине уменьшается от 0,46 до значения 0,14.

3. Разработанная методика технологического проектирования, отличающаяся наличием математического аппарата для расчета сил деформирования по операциям, входящим в технологический процесс штамповки, позволяет генерировать процессы выдавливания поволоков с продольными рёбрами, а созданный алгоритм на основе формализованного описания этапов расчетов по существующим и разработанным моделям позволяет принять рациональное решение по выбору варианта из множества альтернатив.

4. Для уменьшения возможности получения бракованных поволоков, имеющих продольные рёбра, разработаны новые конструкции штамповой оснастки (патент РФ № 78450 на полезную модель, патент РФ на изобретение №2484913), работающие по гидромеханическому принципу, что позволяет создать подпор на протяжении всего рабочего хода пуансона, а на обратном ходе облегчить извлечение поковки из матрицы.

Разработана и опробована в промышленном производстве технология холодного выдавливания поволоков со сквозным отверстием на

плавающих оправках (патент РФ № 2356682 на изобретение). Это дает возможность получать поковки с соотношением высоты к внутреннему диаметру более трех, оправка при этом не связана жестко с пуансоном. Такой прием использован в конструкции штампа для выдавливания оребренных поволоков с отверстием. В частности, для получения в поволоках глубоких глухих отверстий разработана конструкция пуансона для горячего деформирования с наконечником одноразового использования (патент РФ №86510 на полезную модель);

5. Проведенные экспериментальные исследования показали работоспособность изготовленных штампов, при использовании которых в условиях холодной и горячей деформации, получена партия стержневых поволоков из алюминиевых сплавов АК6 с 6-ю рёбрами и АК7 с 8-ю продольными рёбрами толщиной, соответственно 3 и 2,5 мм, отвечающих требованиям заказчика по точности и качеству поверхностей, которая принята к дальнейшему использованию на АО «НПО «Базальт» г. Москва. Освоение предприятием ранее не используемой технологии выдавливания ребер стабилизаторов из алюминиевых сплавов позволит повысить КИМ с значения 14,5% до 85%, а отклонения размеров штампованных ребер по толщине и ширине, зависящие от точности изготовления матрицы и не превышающие заданных чертежом детали, позволят обойтись без дальнейшей механической обработки функциональных поверхностей, что повысит производительность.

Сравнительный анализ в пересекающихся диапазонах значений относительных удельных сил процессов выдавливания с затеканием металла в рёбра позволил определить погрешности с относительными ошибками расчётных данных и данных эксперимента независимых исследователей. Максимальное расхождение теоретических и экспериментальных данных составило 23,07%, минимальная относительная погрешность составила 7,59%, что не выходит за рамки допустимых погрешностей в инженерных расчетах.

6. Отдельные результаты работы использованы в учебном процессе при чтении лекций в ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» по дисциплинам «Теория обработки металлов давлением», «Проблемы прочности и пластичности в технологических процессах» и «Технология холодной объемной штамповки».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 14.205-83 Технологичность конструкций изделий. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2009. – 4 с.
2. Электронный ресурс: <https://www.drive2.ru/l/463315784198783657/>
3. Электронный ресурс: <http://camtechnology.ru/simultaneous-5-axis-milling/>
4. Электронный ресурс: <http://integral-russia.ru/2018/12/28/21617/>
5. Михельсон–Ткач В.Л. Повышение технологичности конструкций. – М.: Машиностроение, 1988. – 104 с.
6. Технологичность конструкции изделия: Справочник/ Ю.Д. Амиров, Т.К. Алферова, П.Н. Волков и др.; Под общ. Ред. Ю.Д. Амирова. – М.: Машиностроение, 1990. – 768 с.
7. Евстратов В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов. – Харьков: Выща школа, 1987. – 384 с.
8. Ковка и штамповка: справочник в 4 т./ Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1987. Т.3. Холодная объемная штамповка/ Под ред. Г.А. Навроцкого. 1987. – 384 с.
9. ГОСТ 22 782-88 Материалоемкость изделий машиностроения. Термины и определения. – М.: Изд. Стандартов, 1988. – 6 с.
10. Групповые технологические процессы изготовления точных заготовок и деталей гидроаппаратуры методами холодной и полугорячей объемной штамповки: МУ 2-041-1-85. – М.: ВНИИТЭМР, 1986. – 74 с.
11. Сосенушкин Е.Н. Прогрессивные процессы объемной штамповки. – М.: Машиностроение, 2011. – 480 с.
12. Холодная объемная штамповка: Справочник./ Под ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
13. ГОСТ 21488-97 Прутки прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. – Минск: Международный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 22 с.

14. Алгоритм оптимизации проектных решений/ Под ред. А.И. Половинкина. – М.: Мир, 1976. – 264 с.
15. Джонс Дж. К. Инженерное и художественное конструирование. – М.: Мир, 1976. – 374 с.
16. Владимиров Ю.В., Герасимов В.Я. Технологические основы холодной высадки стержневых крепежных изделий. – М.: Машиностроение, 1984. – 120 с.
17. Ланской Е.Н., Сосенушкин Е.Н. Автоматизация проектирования групповых процессов холодной и полугорячей объемной штамповки при многономенклатурном производстве деталей./ Машиностроительное производство. Сер. Технология и оборудование кузнечно–штамповочного производства: Обзорная информация./ ВНИИТЭМР. Вып.6. – М.,1989. – 84 с.
18. Грайфер А.Х. Об устойчивости заготовок при осадке и высадке// Кузнечно–штамповочное производство. – 1970. – №11. – С. 11-13.
19. Биллигман И. Высадка и другие методы объемной штамповки: Справочное руководство по штамповке сталей и цветных металлов в холодном и горячем состоянии при серийном и массовом производствах. – М.: Машгиз, 1960. – 467 с.
20. Патент РФ на полезную модель №86510 Пуансон для горячего деформирования с наконечником одноразового использования/ Артес А.Э., Сосенушкин Е.Н., Гуреева Т.В., Третьюхин В.В., Мячин К.М., Тимофеев В.В./ ГОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2009. Бюл. №25 10.09.2009. 3 с.
21. Герасимов В.Я. Определение оптимальной степени деформации при холодном редуцировании// Автомобильная промышленность. – 1983. – №1. – С.26–27.
22. Васильев К.И., Сосенушкин Е.Н. Рациональное распределение деформации при проектировании многопереходного выдавливания стержневых деталей/ В кн. Перспективы производства точных заготовок и деталей методами объемного деформирования. – М.: МДНТП, 1990. – С.45–48.

23. Афанасьев А.Е., Каргин В.Р., Каргин Б.В. Силовые условия прессования легкосплавных бурильных труб со спиральным оребрением// Известия вузов. Цветная металлургия. – 2016. – №2. – С.58-63.
24. Савченко О.К., Жукова О.А. Боковое выдавливание корпусных деталей с отрезками// Обработка металлов давлением. Краматорск, 2013. – №1 (34). – С. 96-99.
25. Воробьев В.М. Основы теории и реализация технологических решений процессов выдавливания металлов в многоканальных штампах: Учебное пособие. – М.: «ИП Скороходов В.А.», 2012. – 290 с.
26. Хаймович А.И. Экспериментальное определение оптимальной схемы формообразования дисков с лопатками цельной конструкции// Вестник СГАУ им. акад. С.П. Королева. – 2010. – №4. – С.114–119.
27. Яковлев С.С., Пасынков А.А., Ларина М.В. Оценка влияния технологических параметров процесса бокового выдавливания по плоской схеме деформаций на силовые режимы и качество получаемых изделий// Известия ТулГУ. Технические науки. – 2015. – №11. Ч.1. – С.3–9.
28. Шитарев И.Л., Хаймович А.И. Исследование параметров высокоскоростной штамповки для дисков с лопатками цельной конструкции// Кузнечно–штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2010. – №5. – С.37–44.
29. Xia Qiu-xiang, Hu Xuan-tong, Chen Deng, Qu Hong-bo. Investigation into combined process of extrusion and upsetting extrusion for thick sheet with rectangular edge convexity// Huanan ligong daxuexuebao. Ziranhexue ban = J.S. China Univ. Technol. Natur. Sci. Ed. 2015 43.– №10.– P. 89–94.
30. Рытиков А.М. Расчет температуры пластической зоны при прессовании// Цветные металлы. – 1970. – №1. – С.64-68.
31. Ковка и штамповка цветных металлов: Справочник/ Корнеев Н.И., Аржаков В.М., Бармашенко Б.Г. и др./ – М.: Машиностроение, 1972. – 232 с.
32. Арышенский Ю.М., Гречников Ф.В. Теория и расчеты

пластического формоизменения анизотропных материалов. – М.: Металлургия, 1990. – 304 с.

33. Ковка и штамповка: справочник в 4 т./ Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1985. - Т.1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка/ Под ред. Е.И. Семенова. – 1985. – 568 с.

34. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 744 с.

35. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. Учебник. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 287 с.

36. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1968. – 400 с.

37. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.

38. Бойцов В.В., Джуромский Ю.В., Фиглин С.З. Изотермическое деформирование металлов// Кузнечно–штамповочное производство. – 1979. – №9. – С. 32-37.

39. Аюпов Т.Х., Крук А.Т. Закрытая изотермическая штамповка высоконагретым инструментом с использованием установки «УИГ-700»// Кузнечно–штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2013. – №7. – С. 25-29.

40. Малинин Н.Н. Технологические задачи пластичности и ползучести. – М.: Высшая школа, 1979. – 119 с.

41. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ганаго О.А. и др. Теория обработки металлов давлением. (Вариационные методы расчета усилий и деформации). /Под ред. И.Я. Тарновского. – М.: Металлургиздат, 1963. – 672 с.

42. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.

43. Дель Г.Д. Технологическая механика. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.

44. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
45. Семёнов Е.И. Технология и оборудованиековки и горячей штамповки: Учебник для средних профессиональных учебных заведений по спец. 1105 «Обработка металлов давлением». – М.: Машиностроение, 1999. – 384 с.
46. Работнов Ю.Н., Милейко С.Т. Кратковременная ползучесть. – М. Наука, 1970. – 224 с.
47. Утяшев Ф.З. Современные методы интенсивной пластической деформации: учебное пособие. – Уфа: УГАТУ, 2008. – 313 с.
48. Алиева Л.И., Жбанков Я.Г., Грудкина Н.С., Формоизменение детали в процессах комбинированного радиально–обратного выдавливания// Обработка металлов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2010. № 2 (23). С.16–19.
49. Басюк С.Т. Изготовление поковок сложных форм в штампах с разъемными матрицами// Кузнечно–штамповочное производство. – 1973. – №7. – С. 8–11.
50. Бокман М.А., Рабинович Я.Н. Механизм образования «прострела» при штамповке ребристых деталей и методы его предупреждения// Кузнечно–штамповочное производство. – 1972. №7. – С. 17–19.
51. Басюк С.Т., Шадский А.А., Пилипенко А.Л. О штамповке оребренных деталей с тонким полотном// Кузнечно–штамповочное производство. – 1971. – №6. – С.11–14.
52. Харламов Г.А., Тарапанов А.С. Припуски на механическую обработку: Справочник. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
53. Атрошенко А.П., Федоров В.И. Горячая штамповка труднодеформируемых материалов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1979. – 287 с.
54. Эдуардов М.С. Штамповка в закрытых штампах. – Л.:

Машиностроение, 1971. – 240 с.

55. Гусев И.А. Штамп для получения поковок оребренных деталей методом радиального истечения// Заготовительные производства в машиностроении. – 2006. – №4. – С.36.

56. Гречищев В.Н. Особенности конструкций штампов для точной объемной штамповки методом осадки с затеканием в полости// Кузнечно–штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2001. – №9. – С.23–29.

57. Логинов Ю.Н., Фомин А.А. Кинематические условия выдавливания пластического слоя в многорядном щелевом штампе// Кузнечно–штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2013. – №4. – С.14–17.

58. Воробьев В.М. Построение теоретических решеток каналов многоразъемных штампов и расчет действующих в них сил// Кузнечно–штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2011. – №1. – С.25–28.

59. Каргин В.Р. Проектирование инструмента для прессования труб со спиральным оребрением// Кузнечно–штамповочное производство. – 1991. – №2. – С. 26–28.

60. Мамаев В.Б., Первов М.Л. Учет сил контактного трения при объемной штамповке// Вестник машиностроения. – 2016. – №3. – С.74–78.

61. Леванов А.Н. Особенности контактного трения в процессах обработки металлов давлением// Кузнечно–штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2014. – №10. – С.13–17.

62. Леванов А.Н., Катая В.К., Володин И.М., Волков В.А. Контактное трение и эффективность применения защитно–смазочных покрытий и технологических смазочных материалов при горячей объемной штамповке// Кузнечно–штамповочное производство.– 1984. – №8. – С.25–27.

63. Володин И.М. Моделирование процессов горячей объемной штамповки. – М.: Машиностроение–1, 2006. – 253 с.

64. Володин И.М. Сравнительный анализ методов определения показателей сил контактного трения// Известия ТулГУ. Сер. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Вып.1. – 2005. – С.108–117.

65. Петров П.А., Перфилов В.И., Чеховская А.С. Определение фактора трения на основе феноменологической модели сопротивления горячей деформации металла// Известия ТулГУ. Сер. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Вып.1. – 2005. – С.127–135.

66. Лаптев А.М., Ткаченко Я.Ю., Жабин В.И. Построение диаграммы для определения коэффициента трения по формуле Леванова по методу осадки кольца// Обработка металлов давлением. – Краматорск: 2011. – №3 (28).– С. 129–132.

67. Панфилов Г.В., Парамонов Р.А., Хвостов Е.Ю. Условие полной пластичности в осесимметричных задачах теории пластичности// Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. С. 119-127.

68. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Перминов Д.А. Аналитическое решение методом линий скольжения задачи о вдавливании цилиндрического штампа в условиях осевой симметрии// Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 10. Часть 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. С. 150-163.

69. Ильюшин А.А. Труды 1946–1966. Т.2 Пластичность. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 480 с.

70. Кийко И.А. Теория пластического течения.– М.: Изд-во МГУ, 1978. – 75 с.

71. Унков Е.П. Инженерная теория пластичности. Методы расчета усилий деформирования. – М.: Машгиз, 1959. – 328с.

72. Колотов Ю.В., Смирнов А.М., Сосенушкин Е.Н. Новая конструктивная схема шаботного штамповочного молота с гидравлическим приводом// Вестник машиностроения. 2015. №9. – С. 49-51.

73. Колотов Ю.В. Повышение работоспособности бесшаботных

молотов с гидравлической связью масс. Дисс. на соиск. уч. степ. д.т.н. по спец. 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением. М.: МГТУ «СТАНКИН», 2011. – 345 с.

74. Сосенушкин Е.Н., Хроменков А.В., Мельник Ю.А. Математическая модель адгезионного износа штампов объемной штамповки// Трение и износ. 2014. Т.35. №6. С. 752-758.

75. Кийко И.А. Вариационный принцип в задачах течения тонкого слоя пластического вещества // Докл. АН СССР. – 1964. – Т. 157. – № 3. – С. 551–553.

76. Хван А.Д. Инновационные технологии пластического формоизменения при немонотонном и монотонном нагружении. Дисс. на соиск. уч. степ. д.т.н. по спец. 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением. Воронеж: Воронежский ГТУ, 2013. – 373 с.

77. Kadymov V. Mathematical modeling of contact problems of plastic flow // Nonlinear Anal. Theory & Appl. Gr.Br.,v.S0. – №8. – 1997. – Pp.5259–5265

78. Кийко И.А. Анизотропия в процессах течения тонкого пластического слоя // Прикладная математика и механика.– 2006. – Т.70. – Вып.2. – С.344–351.

79. Кийко И.А., Кадымов В.А. Обобщения задачи Л.Прандтля о сжатии полосы // Вестник Моск. ун-та. – Сер.1. – 2003. – №4. – С.50–56.

80. Кийко И.А. Обобщение задачи Л.Прандтля о сжатии полосы на случай сжимаемого материала // Вестник Моск. ун-та. – 2002.– №4. – С.47–52.

81. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

82. Гуреева Т.В. Развитие теории течения пластически деформируемого слоя/ Сосенушкин Е.Н., Кадымов В.А., Яновская, Е.А., Архипов А.А., Гуреева Т.В., Гусев Д.С., Прокин М.В.// Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. – 2019. – Вып.5. – С.131-138.

83. Ильюшин А.А. Некоторые вопросы пластического течения// Известия АН СССР. –1958. –№2. –С.62–75.
84. Кадымов В.А., Милов В.А. Некоторые прямые и обратные задачи течения тонких пластических слоев // Вестник ТулГУ.–2010. –Т.16. –Вып.1. – С.54–58.
85. Кадымов В.А., Быстриков С.К. Некоторые новые решения нестационарных задач растекания пластического слоя по упруго-деформируемым поверхностям// Изв. ТулГУ. Сер. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. – 2006. – Т.12. – Вып.2. – С.54–60.
86. Кадымов В.А., Сосенушкин Е.Н., Яновская Е.А. Некоторые точные решения эволюционного уравнения растекания пластического слоя на плоскости// Вестник Московского ун-та. Сер.1. Математика, механика. – 2016. – №3. – С.61–65.
87. Кадымов В.А., Сосенушкин Е.Н., Белов Н.А. Контактная задача о несвободном растекании пластического слоя на плоскости: эксперимент и теория// Сб. науч. трудов Упругость и неупругость. – М.: МГУ, 2016. – С.180–185.
88. Сосенушкин Е.Н., Кадымов В.А., Яновская, Е.А., Гуреева Т.В. Механика выдавливания алюминиевого сплава при штамповке поковки с продольными рёбрами// Цветные металлы. – 2019. – №3. – С.58–64.
89. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. – 336 с.
90. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1970. – 720 с.
91. Кононенко В.Г., Кушнаренок С.Г., Прялин М.А. Оценка технологичности и унификации машин. – М.: Машиностроение, 1986.– 160 с.
92. Лавриненко Ю.А., Евсюков С.А., Лавриненко В.Ю. Объемная штамповка на автоматах. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 259 с.
93. Живов Л.И., Овчинников А.Г., Складчиков Е.Н. Кузнечно-

штамповочное оборудование: Учебник для вузов./ Под ред. Л.И. Живова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 560 с.

94. Патент РФ № 78450 на полезную модель. МПК: B21D 22/00 (2006.01). Инструмент для прессования трубчатого изделия с меридиональными ребрами/ Артес А.Э., Серов Е.С., Гуреева Т.В., Третьюхин В.В. Заявитель и патентообл. ГОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН». Оpubл. 27.11.2008. Бюл. №33. – 3 с.

95. Артес А.Э., Серов Е.С., Третьюхин В.В., Гуреева Т.В. Разработка технологических процессов холодного выдавливания трубчатых изделий// Кузнечно–штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2009. – №6. – С.27–30.

96. Патент РФ № 2356682 на изобретение. МПК: B21K 21/00 (2006.01), B21J 5/00 (2006.01)/ Способ холодного выдавливания цилиндрических деталей со сквозным отверстием./ Артес А.Э., Серов Е.С., Бутвинова А.С., Гуреева Т.В., Третьюхин В.В. Заявитель и патентообл. ГОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН». Оpubл. 27.05.2009. Бюл. №15. – 10 с.

97. Патент на изобретение №2484913 Способ изготовления стержневых изделий с продольными ребрами из алюминиевых сплавов/ Артес А.Э., Володин А.М., Сосенушкин Е.Н., Смеликов В.Г., Рыжков И.В., Рогозников П.А., Третьюхин В.В., Гуреева Т.В./ ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2013. Бюл. №17. 20.06.2013.

98. Артес А.Э., Сосенушкин Е.Н., Третьюхин В.В., Окунькова А.А., Гуреева Т.В. Новые ресурс- и энергосберегающие технологические процессы изготовления деталей методами обработки давлением // Вестник машиностроения. – 2013. – №5. – С.72–74.

99. Artes A.E., Sosenushkin E.N., Tret'yukhin V.V., Okun'kova A.A., Gureeva T.V. Resource- and Energy-Saving Manufacturing Technologies Based on Pressure Treatment// Russian Engineering Research. – 2013. – Vol.33. – №8. – Pp. 460-462.

100. ГОСТ 7505-89 Поковки стальные штампованные. Допуски,

припуски и кузнечные напуски. М.: Госком. СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990. – 52 с.

101. Окунькова А.А. Проектирование и изготовление формообразующих деталей пресс-форм при помощи интегрированных CAD/CAM–систем // Вестник МГТУ Станкин. – 2010. – №3 (11). – С.56–61.

ПРИЛОЖЕНИЕ

УТВЕРЖДАЮ

И.о. управляющего директора

АО «НПО «Базальт»



А.В. Каширских

«__» _____ 2019 г.

АКТ

о предполагаемом использовании результатов научно-исследовательской работы

Процессы объемной штамповки выдавливанием эффективны при изготовлении деталей как простой, так и сложной формы: с развитой поверхностью, имеющих в конструкции тонкие полотна, ребра с различным расположением, лопасти и турбинные лопатки сложного аэродинамического профиля, изготовленные вместе с диском. Во многих случаях объемная штамповка является едва ли не единственным способом изготовления поковок сложной конфигурации.

Автором диссертации «Прямое выдавливание поковок с продольными ребрами» соискателем Гуреевой Т.В. (научный руководитель, д.т.н., профессор Е.Н. Сосенушкин) научно обоснованы режимы деформирования алюминиевых сплавов для изготовления поковки стабилизатора, установлена взаимосвязь силовых параметров и деформированного состояния металла заготовки с особенностями кинематики течения металла при заполнении ребер, разработаны методика проектирования технологических процессов прямого выдавливания поковок с продольными ребрами и рекомендации по конструированию штампового инструмента, работающего по гидромеханическому принципу и обеспечивающего противодействие во время всего цикла штамповки, что минимизирует вероятность появления бракованных поковок.

Полученные соискателем Т.В. Гуреевой научные и практические результаты работы особенно актуальны при изготовлении деталей и сборочных единиц минометно-артиллерийских выстрелов (в частности-сборочной единицы «Стабилизатор») и будут приняты к использованию при разработке перспективных изделий.

Начальник НТО – главный технолог

С.Б. Власов

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

«УТВЕРЖДАЮ»

проректор по образовательной
деятельности

д.э.н., профессор
Ю.Я. Еленева

2019 г



АКТ

внедрения в учебный процесс результатов
диссертационной работы соискателя
Т.В. Гуреевой

Полученные результаты теоретического анализа силовых, кинематических и деформационных параметров процесса прямого выдавливания поковок, имеющих продольные рёбра; результаты экспериментальных исследований по реализации новых процессов прямого выдавливания продольных рёбер; результаты анализа точностных параметров по толщине выдавленных рёбер, которые подтверждают адекватность выдвинутых гипотез и разработанных математических моделей, внедрены в учебный процесс в курсах «Теория обработки металлов давлением», «Проблемы прочности и пластичности в технологических процессах», «Технология холодной объёмной штамповки», согласно учебным планам ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».

Представитель подразделения, в котором внедрена разработка: Представители подразделения разработчика:

Начальник
учебно-методического управления
к.т.н.

 М.В. Бильчук

Научный руководитель
д.т.н.

 Е.Н. Сосенушкин

Соискатель  Т.В. Гуреева