

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

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор,
«Заслуженный работник высшей школы РФ»
Сосенушкин Евгений Николаевич

Москва – 2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. 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. Во многих случаях объемная штамповка является едва ли не единственным способом изготовления поковок сложной конфигурации для производства деталей специального назначения в виде стабилизаторов, изготавливаемых либо штамповочными, либо цельной конструкции с помощью механообработки.

Несмотря на большое количество методов теоретического анализа, 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. Поэтому производительность таких способов невелика. Имеются разрозненные сведения о практической реализации штамповки оребренных поковок, отсутствуют конструкции штампов для этих специализированных процессов, реализуемых на прессах.

Стремление к уменьшению массы изделий специального назначения и отказ от низкопроизводительных сварочных работ и механообработки приводит к необходимости использования легких сплавов различных марок на основе алюминия, являющихся к тому же более дешёвыми. Однако попытки штамповки оребренных поковок традиционными способами выдавливания наталкиваются на ряд проблем, связанных с возможным нарушением сплошности металла как во время рабочего хода, так и 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. Критический анализ технической литературы, достигнутых исследователями результатов, патентные исследования и обобщение имеющегося производственного опыта позволили определить пробелы в разработанности темы:

- существующие постановки краевых задач, ориентированных на получение оребренных поковок, 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 оребренных поковок ограниченной длины,

требующих выталкивания из матрицы, неприменимы инструментальные штампы традиционной конструкции, ввиду высокой вероятности разрушения поковок;

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

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 оребренных 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 сложных поковок с оребрением, 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 оребренных 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 оребренных поковок.

Практическая значимость работы:

– создан алгоритм расчетов альтернативных вариантов технологических 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 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 объёмной 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 по дисциплинам «Теория обработки металлов давлением», «Проблемы прочности и пластичности в технологических процессах», «Технология холодной объёмной штамповки» в ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».

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 университет г. Уфа. 26–28 февраля 2019 г.

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

«Международный XIV конгресс «Кузнец-2019» «Совершенствование и перспективы развития технологических процессов обработки металлов давлением и оборудования кузнечно-прессового машиностроения в современных условиях» г. Рязань. 11-13 сентября 2019 г.

III Всероссийская научно-практическая конференция. «Цифровая экономика технологии, управление, человеческий капитал». Российская Федерация, г. Вологда: Научный центр «Диспут». 25 сентября 2020 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.

Автор выражает глубокую благодарность д.т.н., профессору А.Э. Артесу за помощь в проведении экспериментальных исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, перечислены задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, и краткое содержание глав диссертации.

В первой главе рассмотрено современное состояние теории и технологии прямого выдавливания при изготовлении поковок, имеющих продольные рёбра из различных материалов, намечены пути совершенствования имеющихся и разработки новых технологических

процессов и штамповой оснастки. Отмечается, что исследованием технологических процессов ОМД сложных поковок из конструкционных металлов, в том числе и деформируемых 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 и 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.

Аналитический обзор позволил обосновать цель работы и поставить задачи исследования.

Во второй главе проведен теоретический анализ технологического процесса прямого выдавливания поковки с продольными рёбрами (рис. 1), для чего разработан аналитический аппарат, согласно расчетной схеме, представленной на рис. 2а. В качестве допущений приняты кинематические гипотезы А.А. Ильюшина, выдвинутые им на основе анализа известного решения Л. Прандтля. Для решения задачи рассматривалась пластическая область в виде кругового сектора, поделённого дополнительно на зоны $S_{i,j}(r, \varphi)$ с характерным течением металла (рис. 2б).

Постановка описывалась системой дифференциальных уравнений в частных производных (1) в ортогональной системе координат.

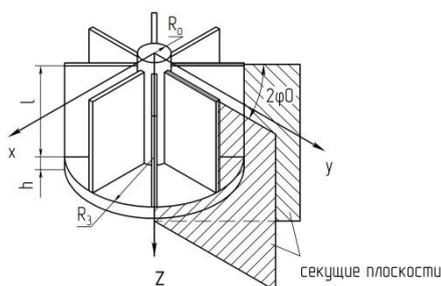


Рис. 1. Цельноштампованная поковка с продольным оребрением: R_0 – радиус стержневой части; R_3 – внешний радиус поковки; h – толщина фланца; l – высота ребра; $2\varphi_0$ – угол между соседними рёбрами

$$\text{grad}p = -\frac{2\tau_s}{h} \frac{\bar{v}}{|\bar{v}|} \quad (1);$$

$$\text{div}\bar{v} - \frac{d\lambda}{dt} = 0$$

(2)

Уравнения (1) известны как динамические уравнения Эйлера, а уравнение (2) как условие несжимаемости в эйлеровом пространстве.

Поскольку рассматриваемые пластические области имеют криволинейные границы, для удобства осуществим переход к цилиндрической системе координат. Координаты двух систем связаны функционально $x = r \cos \varphi$; $y = r \sin \varphi$; $z = z$. Для плоского деформированного состояния система уравнений (1), (2) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial p}{r \partial \varphi} = -\frac{2\tau_s}{h} \cdot \frac{v_\varphi}{\sqrt{v_r^2 + v_\varphi^2}}; \quad \frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{2\tau_s}{h} \cdot \frac{v_r}{\sqrt{v_r^2 + v_\varphi^2}}; \quad \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_\varphi}{r \partial \varphi} - \frac{d\lambda}{dt} = 0, \quad (3)$$

где p – давление на контакте; $\lambda = \ln(h_0/h)$ – истинная степень деформации; h_0, h – начальная и конечная толщина деформируемого фланца; v – вектор скорости течения; τ_s – напряжения сдвига.

Уравнение прямой в цилиндрической системе координат, проходящей через точки $A_3(R_0 \cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0), R_0 \sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0))$ и $A_4(R_3 \cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0), R_0 \sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0))$ и являющейся границей ребра:

$$\frac{x - R_0}{R_3 - R_0} = \frac{y - (\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)}{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0}. \quad (4)$$

После подстановки значений координат в уравнение рассматриваемой прямой текущая координата конца вектора примет вид:

$$R_\delta(\varphi) = \frac{R_0(\cos(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0) - \Phi_{OB} \sin(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0))}{\cos \varphi - \Phi_{OB} \sin \varphi} \quad (5)$$

При задании граничных условий в скоростях в каждой выделенной области S_{ij} решалась система уравнений (3) с определением давления на контакте и скорости течения. Так в области $S_{1,1} = \left\{ (r, \varphi) \left| \begin{array}{l} 0 < \varphi < \varphi_0 - \bar{\varphi}_0 \\ R_0 < r < R_3 \end{array} \right. \right\}$ на границе раздела течения, совпадающей с осью координат, $v_\varphi = 0$ из системы (3) имеем:

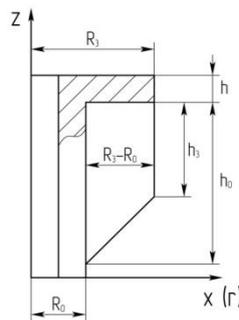
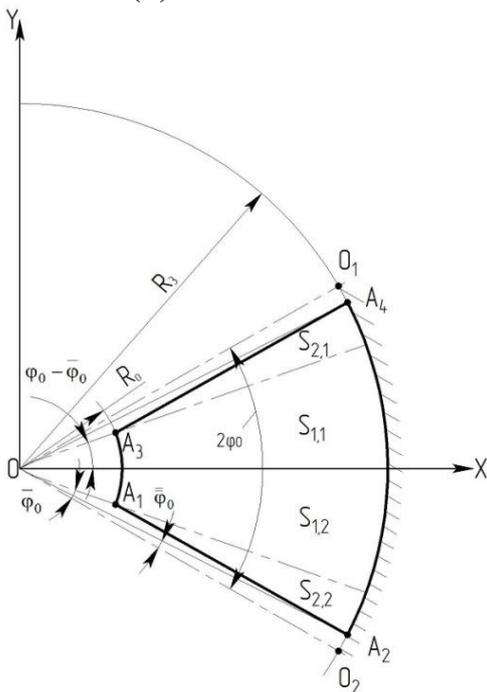
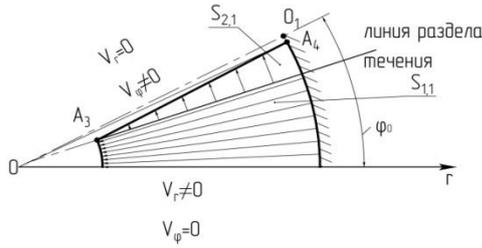
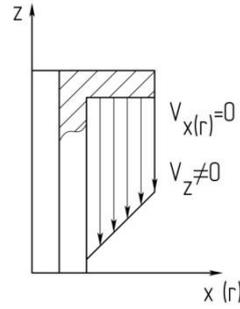


Рис. 2. Схема выделенного элемента фланцевой части поковки в выбранной системе координат: а – геометрические параметры и схема течения металла в пластических областях в плоскости $x\varphi$; б – геометрические параметры и схема течения металла в пластических областях в плоскости rz



а)



б)

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{2\tau_s}{h}; \quad \frac{\partial p}{r\partial\phi} = 0.$$

Интегрируя первое уравнение, получим

$$p_{1,1} = \frac{2\tau_s}{h}r + C_{1,1}.$$

Постоянную интегрирования найдем из граничных условий при $r = R_0$ $p = 2\tau_s$,

поэтому $C_{1,1} = 2\tau_s(1 - \frac{R_0}{h})$,

а контактное давление

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

С учетом компоненты скорости на границе области $v_\phi \approx 0$ условие несжимаемости из системы (3) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} - \frac{d\lambda}{dt} = 0. \quad (6)$$

С учетом $\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{1}{h} \frac{dh}{dt}$ и подстановки в (6): $\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = 0$. После разделения переменных $\frac{\partial(rv_r)}{\partial r} = -r \frac{1}{h} \frac{dh}{dt}$ и интегрирования для нахождения компоненты скорости течения с учетом граничных условий при $r = R_3$ скорость $v_r = 0$, тогда получим:

$$v_r = \frac{R_3^2 - r^2}{r2h} \cdot \frac{dh}{dt}, \quad (7)$$

Дальнейшее интегрирование уравнения (7) с учетом граничных условий $r = R_3$ перемещение $u_r = 0$, тогда $C = 0$ приводит к соотношению для вычисления радиального перемещения

$$u_r = \frac{R_3^2 - r^2}{2r} \ln|h|. \quad (8)$$

Сила штамповки в области $S_{1,1}$:

$$\begin{aligned} P_{S_{1,1}} &= \iint_{S_{1,1}} p_1 r dr d\phi = \int_{R_0}^{R_3} r dr \int_0^{\phi_0 - \bar{\phi}_0} \left(\frac{2\tau_s r}{h} + 2\tau_s \left(1 - \frac{R_0}{h} \right) \right) d\phi = \int_{R_0}^{R_3} \left(\frac{2\tau_s r (\phi_0 - \bar{\phi}_0)}{h} + 2\tau_s \left(1 - \frac{R_0}{h} \right) (\phi_0 - \bar{\phi}_0) \right) r dr = \\ &= \frac{2\tau_s r^3}{3h} (\phi_0 - \bar{\phi}_0) \Big|_{R_0}^{R_3} + 2\tau_s \left(1 - \frac{R_0}{h} \right) (\phi_0 - \bar{\phi}_0) \frac{r^2}{2} \Big|_{R_0}^{R_3} = \frac{2\tau_s}{3h} (R_3^3 - R_0^3) (\phi_0 - \bar{\phi}_0) + \tau_s \left(1 - \frac{R_0}{h} \right) (\phi_0 - \bar{\phi}_0) (R_3^2 - R_0^2) \end{aligned} \quad (9)$$

В пластической области $S_{2,1} = \left\{ (r, \phi) \left| \begin{array}{l} \phi_0 - \bar{\phi}_0 < \phi < \phi_0 - \bar{\phi}_0 \\ R_8(\phi) < r < R_3 \end{array} \right. \right\}$ граничным условием является $v_r = 0$, поэтому первое уравнение системы (3) примет

вид $\frac{\partial p}{\partial r} = 0$, а второе выразится $\frac{\partial p}{r \partial \varphi} = -\frac{2\tau_s}{h}$, которое после разделения переменных и интегрирования даст соотношение для расчета давления на контакте:

$$P_{2,1} = -\frac{2\tau_s}{h} \cdot r \cdot \varphi + 2\tau_s \left(1 + \frac{R_3(\varphi)}{h} \cdot \varphi \right). \quad (10)$$

Из условия несжимаемости системы (3) $\frac{\partial v_\varphi}{r \partial \varphi} + \frac{1}{h} \cdot \frac{dh}{dt} = 0$ после разделения переменных $\partial v_\varphi = -\frac{r}{h} \cdot \frac{dh}{dt} \cdot \partial \varphi$ и интегрирования $v_\varphi = -\frac{r}{h} \cdot \frac{dh}{dt} \cdot \varphi + C_{2,0}$ с учетом граничного условия $v_\varphi \approx 0$ при $\varphi = \varphi_0 - \bar{\varphi}_0$, находим скорость течения v_φ :

$$v_\varphi = -\frac{r}{h} \cdot \frac{dh}{dt} (\varphi - (\varphi_0 - \bar{\varphi}_0)). \quad (11)$$

Для определения перемещения интегрируем уравнение (11):

$$u_\varphi = -r\varphi \ln|h|. \quad (12)$$

Сила штамповки в рассматриваемой пластической области после интегрирования и подстановки пределов определяется выражением:

$$P_{S_{2,1}} = \frac{\tau_s}{h} \left[\frac{1}{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}} - \frac{1}{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}} + \frac{\operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}}{(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}})^2} - \frac{\operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}}{(\varphi_0 - \bar{\varphi}_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}})^2} \right] +$$

$$+ \tau_s \frac{R_0}{1 + \Phi_{OB}^2} \ln \left| \frac{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}}{\varphi_0 - \bar{\varphi}_0 - \operatorname{arctg} \frac{1}{\Phi_{OB}}} \right| + \frac{R_0}{\sqrt{1 + \Phi_{OB}^2}} \frac{R_3^2 \tau_s}{h} (\bar{\varphi}_0 - \bar{\varphi}_0) +$$

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

Для поковки с n продольными рёбрами в силу симметрии пластических областей в форме круговых секторов общая сила деформирования поковки: $P_\Sigma = n(2P_{S_{1,1}} + 2P_{S_{2,1}})$.

В плоскости rz определена сила на преодоление трения:

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

$$- n \sigma_s \bar{\varphi}_0 (R_3 - R_0) \left[\frac{h_3}{h} (R_3 + R_0) + \frac{\beta}{3h} (R_3^2 + R_3 R_0 + R_0^2) \right] \quad (14)$$

Проекция вектора перемещения на ось z :

$$u_z = 2h(\ln|h| - 1) - 2h_0(\ln|h_0| - 1), \quad (15)$$

С учетом известных перемещений (8), (12), (15) по соотношениям Коши определены деформации:

$$\varepsilon_{rr} = -\frac{1}{2} \left(\frac{R_3^2}{r^2} + 1 \right) \ln|h|; \quad \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{1}{2} \left(\frac{R_3^2}{r^2} - 3 \right) \ln|h|; \quad \varepsilon_{zz} = 2\ln|h|; \quad \varepsilon_{r\varphi} = -\varphi \ln|h|. \quad (16)$$

В результате моделирования установлена взаимосвязь силы деформирования с геометрическими параметрами поковки (рис.3), которые

изменялись в некоторых пределах: $2,5 \leq h \leq 62$; $45 \leq D_3 \leq 105$; $20 \leq D_0 \leq 70$; $4 \leq n \leq 12$.

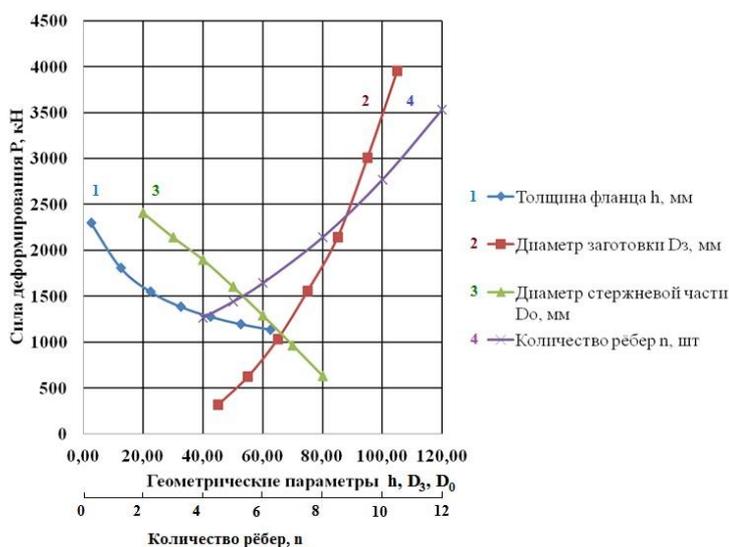
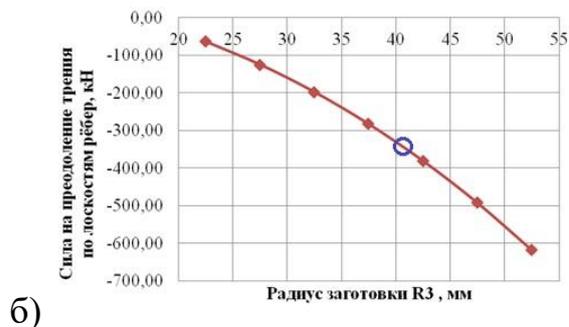


Рис. 3. Зависимость расчетной силы деформирования от геометрических параметров

Влияние геометрических параметров поковки на силу трения отражено на графиках рис. 4.

Знак «минус» показывает, что сила трения направлена противоположно действию внешней силы и для учета сопротивления от трения её нужно добавить к силе прямого выдавливания. Для конкретной поковки с 8-ю рёбрами и известными геометрическими размерами значение силы трения 349,44 кН (выделено на графиках) увеличивает силу прямого выдавливания (2140 кН) до значения 2489,44 кН.

Установлено влияние геометрических параметров на величины компонент деформации при штамповке прямым выдавливанием поковки, имеющей 8 рёбер. На рис. 5а представлены деформации сдвига при изменении угловой координаты пластической области в пределах $28,65^\circ \leq \varphi \leq 97,40^\circ$. Поскольку осевая деформация от диаметра фланцевой части поковки не зависит, то ее значение постоянно (рис. 5б). Рис. 5в показывает характер изменения компонент деформаций в зависимости от диаметра стержневой части поковки. Графиками на рис. 5г определяются оценки компонент деформации от изменения толщины фланцевой части поковки. В этом случае характер изменения деформаций нелинейный.



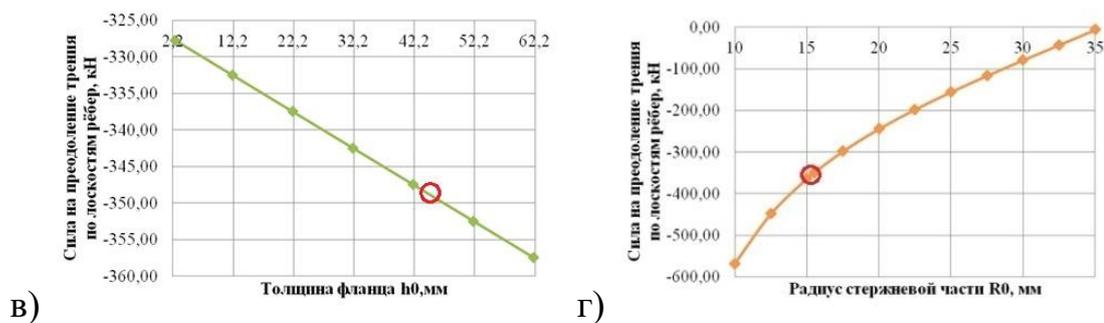


Рис. 4. Связь силы трения с геометрическими параметрами поковки

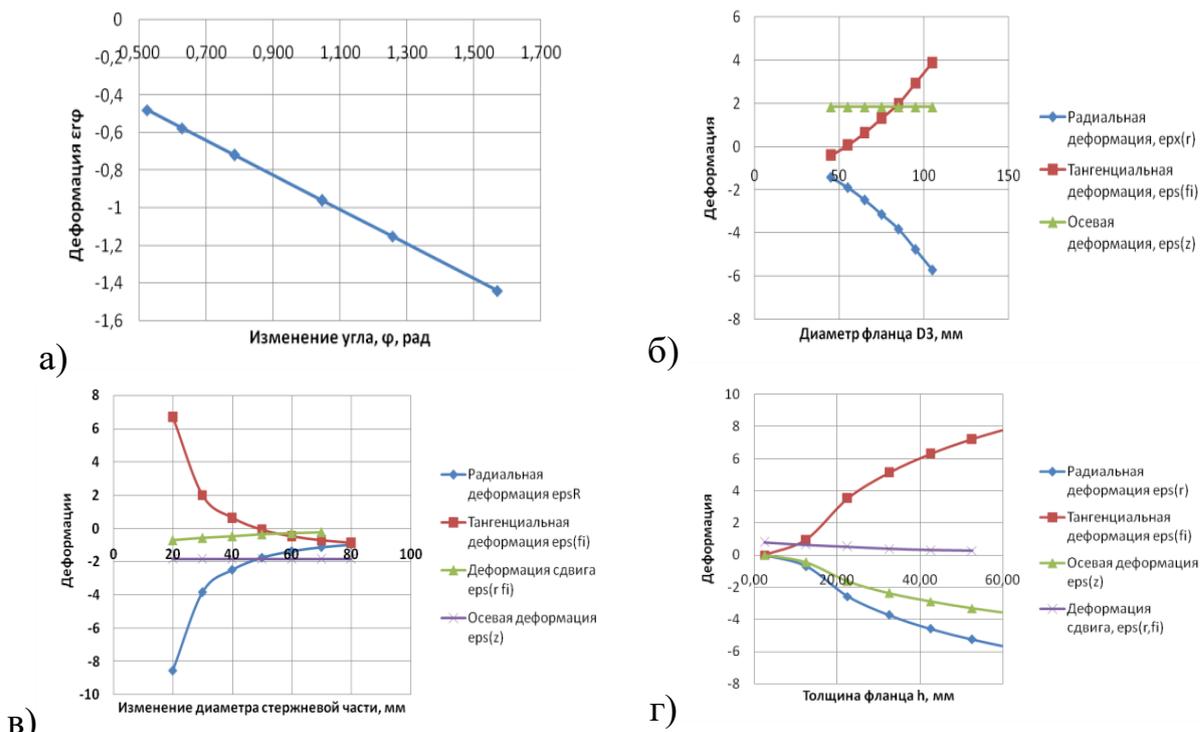


Рис. 5. Влияние геометрии поковки на изменение компонент деформации: а – характер изменения деформаций сдвига $\epsilon_{\tau\phi}$; б – радиальная, тангенциальная и осевая деформации в зависимости от изменения диаметра фланца поковки; в – связь деформаций с изменением диаметра стержневой части поковки; г – влияние толщины фланца на составляющие деформации

Третья глава посвящена разработке новых технологических процессов штамповки оребренных поволоков из алюминиевых сплавов и штампов для их реализации. После оценки технологичности детали, руководствуясь рекомендациями справочной литературы, спроектирован чертеж поковки, подлежащей изготовлению.

Выбор диаметра заготовки под штамповку при условии постоянства объемов может осуществляться в соответствии с диаметрами участков поковки. На рис. 6 рассмотрены схемы трёх возможных вариантов технологических процессов для штамповки стержневой поковки с продольными рёбрами.

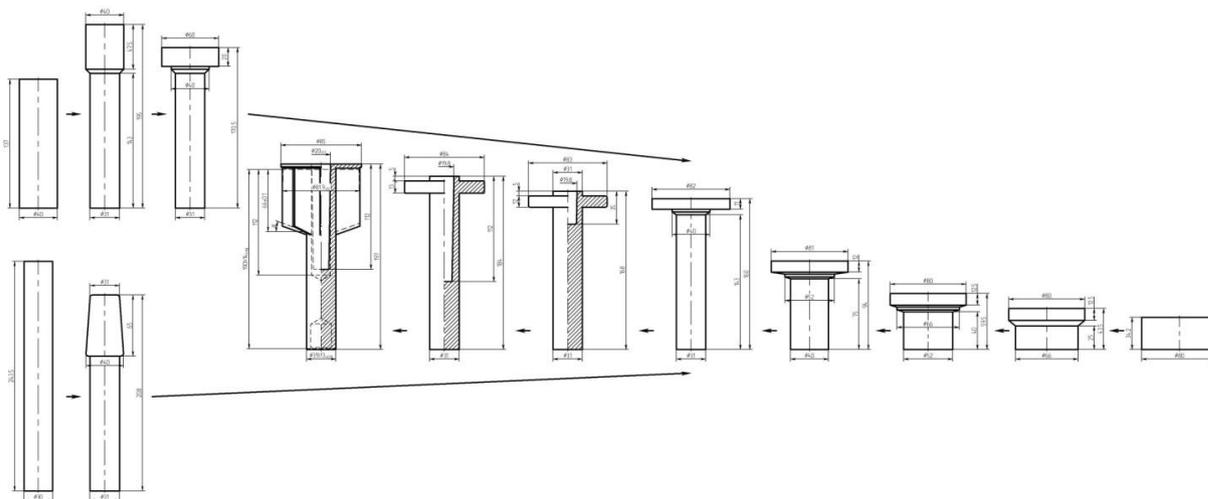


Рис. 6. Схемы возможных вариантов технологии штамповки

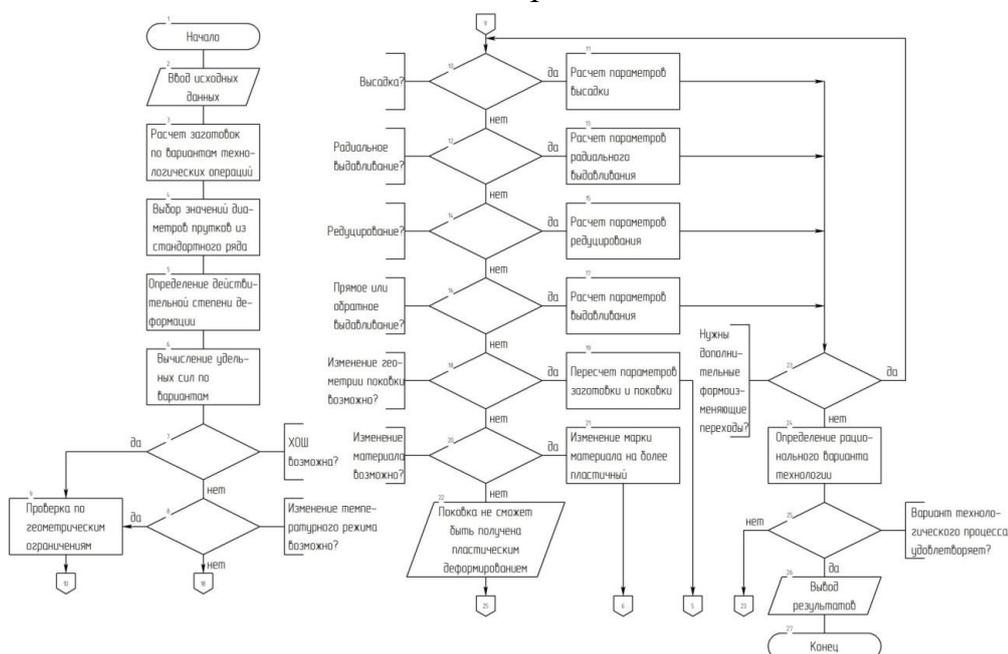


Рис. 7. Алгоритм расчета и выбора рационального варианта технологии

Выбор рационального варианта из ряда нескольких альтернатив относится к классу сложных задач принятия решения, требующих разработки специальных алгоритмов и методик технологического проектирования. Один из таких алгоритмов принятия решения (рис. 7) основывается на проведении технологических расчетов и сравнении параметров альтернативных вариантов. К числу параметров относятся геометрические ограничения, силы штамповки по переходам и количество переходов, входящих в технологию. Анализ возможных технологических процессов штамповки указывает на предпочтительное использование первого варианта, т.к. наборные переходы менее нагружены, а конструкция пуансонов отличается простотой формы, что удешевит их изготовление.

Во избежание брака на заключительном переходе штамповки при оформлении рёбер и удалении поковки из штампа разработан новый

способ осуществления прямого выдавливания и конструкция штампа (рис. 8) для его реализации.

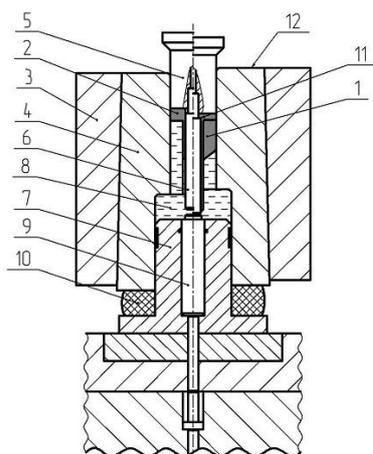


Рис. 8. Специальный штамп для прямого выдавливания в условиях холодной деформации полых поковок из алюминиевых сплавов с оребренной наружной поверхностью: 1 – поковка; 2 – полуфабрикат; 3 – бандаж; 4 – матрица; 5 – пуансон; 6 – оправка; 7 – плунжер; 8 – жидкофазная среда (рабочая жидкость); 9 – выталкиватель; 10 – буфер; 11 – уступ оправки технологический; 12 – верхняя торцевая поверхность матрицы

Для создания высокого давления в контейнере матрицы в качестве жидкостной среды используется масло марки И20, что обеспечивает создание противодействия на протяжении рабочего хода пуансона. При выталкивании поковки из полости матрицы жидкостная среда, находящаяся под высоким давлением способствует качественному удалению из штампа поковки с тонкими ребрами, без нарушений их геометрической формы.

Для расширения сортамента получаемых изделий за счет обеспечения возможности получения поковок 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 поковок с предварительным нагревом заготовок и конструкция штампа (рис. 9). На первом этапе штампуют фланцевую часть полуфабриката 1 высотой H_1 посредством набора металла высадкой заготовки круглого сечения. Кроме того, полуфабрикат содержит отверстие вдоль оси симметрии глубиной: $H_2 \geq 1,5H_1$. Зону фланца полуфабриката нагревают до температуры $450-470^\circ\text{C}$. На торце фланцевой части полуфабриката выполнен выступ для предотвращения образования утяжины на последующем этапе выдавливания ребер. Толщина выступа равна толщине стенки цилиндрической части $S_1 = S_2$, а высота выступа составляет $H_3 = 0,4-0,6S_1$. Перед установкой в рабочую зону штампа фланец полуфабриката 1 подвергают повторному нагреву до температуры $450-470^\circ\text{C}$, а матрицу 5 нагревают до температуры $250-300^\circ\text{C}$ встроенным в штамп тэном 6. При движении пуансона 8 вниз обеспечивается выдавливание металла в пазы матрицы 5 и во втулочную часть стержня через кольцевой зазор 10 до образования ребер требуемой конфигурации. При обратном ходе ползуна прессы в закрытую полость матрицы 5 подается жидкофазная среда 13 от

используемой гидростанции. При этом обеспечивается качественное извлечение выдавленных ребер поковки 12 из пазов матрицы 5.

В четвертой главе описаны экспериментальные исследования.

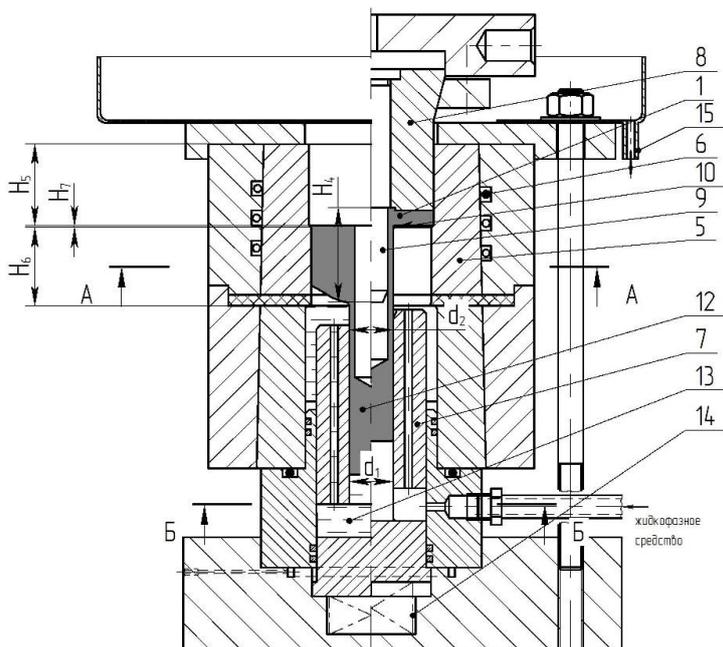


Рис. 9.

Штамп гидромеханический для прямого выдавливания оребренной поковки с зональным нагревом фланцевой части полуфабриката:

1 – полуфабрикат; 5 – матрица; 6 – нагреватель; 7 – поршень; 8 – пуансон; 9 – оправка; 10 – кольцевой зазор; 12 – стержневая часть поковки; 13 – рабочая жидкость; 14 – буферное устройство; 15 – бак-отстойник

Выявлены и устранены причины появления брака в виде локального отрыва рёбер, адгезии штампуемого металла и утяжин. Отштампованы два вида поковок с 6-ю и 8-ю рёбрами, показанными на рис. 10, соответственно из алюминиевых сплавов АК6 и АК7. Режимы выдавливания и геометрические соотношения для поковки на рис. 10,б представлены в табл. 1.

Нагрев полуфабриката до температуры 450-470°C осуществлялся в камерной электропечи сопротивления марки СНОЛ-1.6.2,5.1/9-М2У4.2.



а) n=6



б) n=8

Рис. 10. Штампованные поковки: n – число продольных рёбер

Для оценки качества получаемого изделия были проведены измерения толщин ребер микрометром с точностью до 0,001 мм в трех точках каждого ребра согласно схеме на рис. 11а. Производилось по три измерения в каждой точке. Результатами измерений являются 72 значения толщины рёбер поковки, которые представлены в виде гистограммы на рис.11б. Номинальная толщина ребра составляет $s_{ном}=2,5_{-0,4}$ мм.

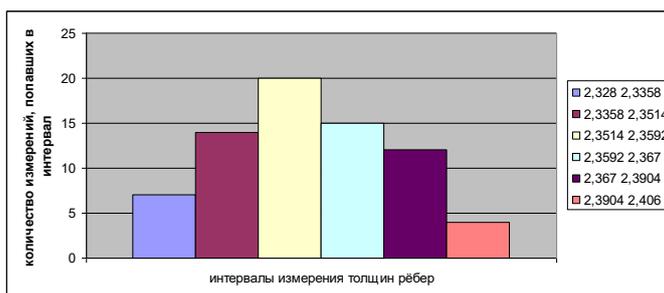
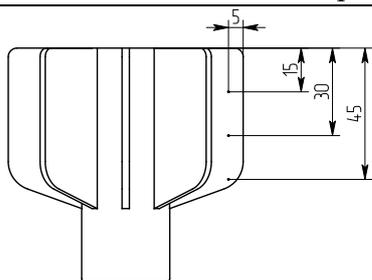
Минимальное полученное значение $s_{min}=2,328$ мм, а максимальное $s_{max}=2,406$ мм. Несмотря на отклонения от номинального размера, которые связаны с упругими деформациями матрицы и погрешностью измерений, толщины находятся в поле допуска размера. Тренд гистограммы свидетельствует о качестве полученной поковки, а закон распределения толщин рёбер соответствует нормальному.

Таблица 1

Геометрические соотношения и технологические режимы, использованные в эксперименте при штамповке сплава АК7

Температура нагрева области фланца заготовки, °С	Температура матрицы, °С	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



а)

б)

Рис. 11. Результаты исследования толщин рёбер поковки: а - схема расположения точек, в которых проводились измерения толщины ребра; б - гистограмма распределения толщины рёбер

Полученные расчётом значения удельной силы для алюминиевого сплава АК7 сравнивались с данными независимых экспериментальных исследований, взятых из технической литературы, которые в зависимости от толщины полотна (фланца) представлены графически на рис. 12.

Условия деформирования изотермические – заготовки в обоих случаях нагревались до температуры 450°C и в процессе деформирования с помощью тэнов в штампах поддерживалась температура 250°C. 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.

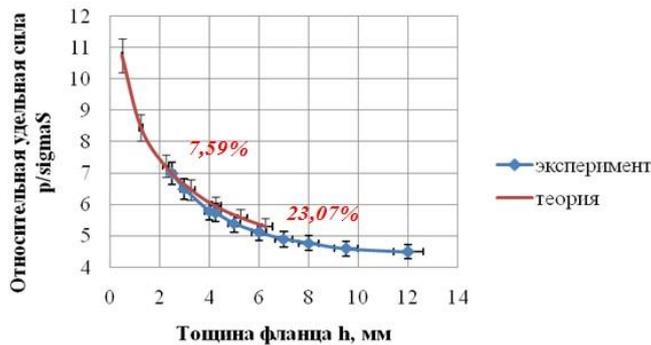


Рис. 12. Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных по удельной силе штамповки

В **заклучении** приведены **основные** результаты и общие выводы по выполненной работе.

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 r_z . При увеличении количества рёбер с 4-х до 12-ти сила трения возрастает 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 по абсолютной величине возрастает 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 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 $\varepsilon_{r\phi}$ 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 уменьшается по абсолютной величине 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 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.

4. Для уменьшения возможности получения бракованных поковок, 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 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 с отверстием. В частности, для получения в поковках 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 поковок 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.

б. 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».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

В ведущих рецензируемых научно-технических журналах, включенных ВАК РФ в Перечень изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертаций:

1. Г.И. Эскин, А.Э. Артеc, Е.И. Панов, Л.Б. Бер, С.Г. Бочвар, В.И. Ялфимов, **Т.В. Гуреева** Исследование технологии изготовления деформированных полуфабрикатов из заэвтектического силумина 01392 с использованием поперечно-винтовой прокатки// Технология легких сплавов. – 2008. – №1. – С.83–89.

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

3. **Т.В. Гуреева** Определение силовых параметров холодного выдавливания изделий типа гильз и втулок// Кузнечно–штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2011. – №3. – С.18–21.

4. А.Э. Артеc, Е.Н. Сосенушкин, В.В. Третьюхин, А.А. Окунькова, **Т.В. Гуреева**. Новые ресурс- и энергосберегающие технологические процессы изготовления деталей методами обработки давлением// Вестник машиностроения. – 2013. – №5. – С.72–74. А.Е. Artes, E.N. Sosenushkin, V.V. Tret'yukhin, A.A. Okun'kova, **T.V. Gureeva**. Resource- and Energy-Saving Manufacturing Technologies Based on Pressure Treatment// Russian Engineering Research. 2013. Vol.33. №8. Pp. 460-462.

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

6. Е.Н. Сосенушкин, В.А. Кадымов, Е.А. Яновская, **Т.В. Гуреева**. Механика выдавливания алюминиевого сплава при штамповке поковки с продольными рёбрами// Цветные металлы. – 2019. – №3. – С.58–64.

в патентах:

7. Инструмент для прессования трубчатого изделия с меридиональными ребрами: пат. 78450 Росс. Федерация: В21D 22/00 (2006.01) / Артеc А.Э., Серов Е.С., **Гуреева Т.В.**, Третьюхин В.В. Заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН»; №

2008130440/22 заявл. 24.07.2008; опубл. 27.11.2008. Бюл. №33. 3 с.

8. Пуансон для горячего деформирования с наконечником одноразового использования: пат. 86510 Росс. Федерация: В21К 1/76 (2006.01)/ Артеc А.Э., Сосенушкин Е.Н., **Гуреева Т.В.**, Третьюхин В.В., Мячин К.М., Тимофеев В.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН»; №2008130441/22 заявл. 24/07/2008; опубл. 10.09.2009. Бюл. №25. 3 с.

9. Способ холодного выдавливания цилиндрических деталей со сквозным отверстием: пат. 2356682 Росс. Федерация: В21К1/76 (2006.01)/ В21К 21/00 (2006.01), В21J 5/00 (2006.01)/ Артеc А.Э., Серов Е.С., Бутвинова А.С., **Гуреева Т.В.**, Третьюхин В.В. Заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН»; №2007118524/02 заявл. 18.05.2007; опубл. 27.05.2009. Бюл. №15. 10 с.

10. Способ изготовления стержневых изделий с продольными ребрами из алюминиевых сплавов: пат. 2484913 Росс. Федерация: В21К 1/12 (2006.01)/Артеc А.Э., Володин А.М., Сосенушкин Е.Н., Смеликов В.Г., Рыжков И.В., Рогозников П.А., Третьюхин В.В., **Гуреева Т.В.** Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН»; №2011153533/02 заявл. 28.12.2011; опубл. 20.06.2013. Бюл. №17. 9 с.