

На правах рукописи



УХЛОВ Игорь Владиславович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ
ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ И РАСЧЕТ
ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ**

05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Российский государственный профессионально-педагогический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Каржавин Владимир Васильевич

Официальные оппоненты:

Готлиб Борис Михайлович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Уральский государственный университет путей сообщения», профессор кафедры «Мехатроника»;

Губашов Борис Николаевич, кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доцент кафедры «Металлургические и роторные машины»

Ведущая организация:

Защита состоится **09 апреля 2015** года в 00:00 на заседании диссертационного совета Д212.285.10 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, в аудитории М – 323.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан **06 марта 2015 г.**

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент

Раскатов Е.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Изделия коническо-цилиндрической формы из конструкционных алюминиевых сплавов широко применяются в различных отраслях промышленности, особенно в оборонном комплексе и авиастроении. Для производства сложных осесимметричных деталей сочетающих в себе конические и цилиндрические участки переменной толщины как правило используется многопереходная штамповка на прессах. В зависимости от сложности формы коническо-цилиндрической детали число операций штамповки может достигать 10 и более, а если учесть что каждая операция обработки давлением требует вспомогательных операций: смазка, отжиг, травление, то производственный цикл таких изделий весьма продолжителен и энергозатратен.

Ротационная вытяжка (РВ) является процессом обработки металлов давлением с локальным приложением деформирующего усилия, при которой доля сжимающих напряжений значительно выше, чем при обычной вытяжке в жестких штампах т.е. дает возможность получить большие конечные деформации а соответственно сократить количество основных и вспомогательных операций. РВ зависит от правильного выбора режима обработки, параметров инструмента, механических свойств обрабатываемого материала и условий обработки, что определяет необходимость экспериментальной отработки технологического процесса для каждой детали определенной формы и размеров. В тоже время в процессе РВ возможно образование «напыва» металла, потеря устойчивости фланца, «шелушения» или разрыва заготовки т.е. дефектов препятствующих получению качественных деталей, в связи с чем особое значение приобретает установление причин этих дефектов и выяснения возможности их устранения или снижения уровня воздействия.

Поэтому изучение и накопление экспериментальных данных о влиянии технологических факторов на энергосиловые параметры, анализ точности и качества обрабатываемых деталей для разработки рациональных техпроцессов на основе операций ротационной вытяжки при производстве сложных коническо-цилиндрических деталей из конструкционных алюминиевых сплавов является актуальным.

Целью работы является: разработка и исследование технологии производства осесимметричных конических изделий из конструкционных алюминиевых сплавов типа АМгБМ, на основе ротационной вытяжки, взамен многопереходного процесса штамповки изделий на прессах.

Исходя из поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- определение способности листовых конструкционных алюминиевых сплавов к ротационной вытяжке проецированием;
- анализ условий разрушения изделий при РВ и обоснование необходимого числа переходов;
- исследование качества получаемых изделий и влияние на него различных факторов процесса;
- определение рациональных размеров и формы заготовки;
- теоретическое и экспериментальное определение энергосиловых параметров РВ с учетом особенностей процесса;
- обоснование характерных особенностей процесса ротационного формоизменения детали «воронка» и на их основе подбор специализированного оборудования для РВ;
- разработка новой технологии получения изделий на основе РВ.

Научная новизна работы заключается в следующих результатах:

- 1) Разработана методика определения типа и количества операций вытяжки детали «воронка» на основе оценки степени использования ресурса пластичности для различных вариантов технологии ротационной вытяжки изделия;

2) Выявлены закономерности возникновения дефектов, установлено, что дефекты возникают не в очаге деформации под инструментом, а на коническом уже продеформированном участке, возникающие под действием осевых растягивающих напряжений;

3) Предложена заготовка под ротационную вытяжку новой - конусообразной формы. При вырубке заготовки она одновременно формируется с углом конусности $\beta=[80^\circ+85^\circ]$, что снижает осевую составляющую усилия деформации.

4) Разработан алгоритм расчета составляющих усилия деформирования с учетом особенностей протекания процесса: режим переутонения и конусности заготовки, на модели представляющую РВ, как простой сдвиг концентрического цилиндра бесконечно малой толщины, роликом с радиусом скругления условно равного нулю, когда выполняется равенство работы внутренних сил и работы внешних сил;

5) Разработана технология ускоренного отжига заготовок из труднодеформируемых алюминиевых сплавов с одновременным нанесением подсмазочного покрытия на заготовку в специальной среде, представляющую расплавы солей хлоридов металлов.

Практическая значимость. С учетом выполненных исследований получены следующие рекомендации по использованию технологических процессов ротационной вытяжки при производстве сложных осесимметричных изделий из конструкционных алюминиевых сплавов:

1) Проведены экспериментальные исследования получения сложных осесимметричных деталей типа «воронка» из алюминиевых сплавов АД1М и АМг6М в двух режимах: ротационной вытяжки проецированием (по закону синуса) и ротационной вытяжки с утонением. Определены предельные деформации для каждого режима.

2) Получены аналитические и графические зависимости для определения составляющих усилия ротационной вытяжки проецированием, а также величины мощности и крутящего момента на валу шпинделя. Данные зависимости могут быть использованы при проведении расчетов, связанных с проектированием и выбором соответствующего технологического оборудования;

3) Проведены опытно-промышленные двух вариантов технологии производства детали «воронка» с использованием операций ротационного формоизменения: первый вариант включает - три операции ротационной вытяжки на токарно-гидрокопировальном полуавтомате и одну операцию глубокой вытяжки на прессе; второй вариант – состоит из двух операций ротационной вытяжки и одной операции глубокой вытяжки, которые выполняется на том же оборудовании. Для каждого варианта определены размерные характеристики и калибровка инструмента по переходам. Выявлено, что выход годного в первом варианте составляет 95%, во втором варианте 72%. Появление дефектов в 95 % случаев происходит на первой операции ротационной вытяжки;

4) Использование предварительно отформованной конусообразной заготовки с углом конусности $\beta=[80^\circ+85^\circ]$ заметно (14%) снижает осевую составляющую усилия, что приводит к снижению брака;

5) На основе операций ротационной вытяжки и межоперационной и ускоренной термообработки заготовки в солевом расплаве хлоридов $ZnCl_2$, KCl , $NaCl$ разработана технология производства деталей типа «воронка» из конструкционного алюминиевого сплава АМг6М.

Апробация работы. Основные положения работы и отдельные разделы обсуждались на VII и VIII Международной научно-практической конференции

«ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ: роль в развитии современного общества» Краснодар, 2013 – 2014; Седьмой международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении», посвященная памяти чл.-корр. РАН, почетного доктора УрФУ В.Л. Колмогорова. Екатеринбург, 2013; Международном научно-техническом конгрессе ОМД «Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии» Москва, 2014; VIII Международной научно-практической конференции «Современная наука: тенденции развития» Краснодар, 2014.

Публикации. Результаты работы представлены в 12 публикациях, в числе которых 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, получен патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 191 странице, содержит 19 таблиц, 46 рисунков, список литературы из 118 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследования, кратко описаны проведенные исследования, продемонстрирована теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены применяемые технологии изготовления осесимметричных деталей, среди процессов обработки металлов давлением наиболее распространенными способами изготовления полых деталей конической и коническо-цилиндрической формы следует считать многооперационную штамповку, выдавливание и ротационную вытяжку.

Выполненный обзор показал, что одним из перспективных направлений совершенствования технологии получения полых деталей осесимметричной формы является автоматизированная ротационная вытяжка. Данный процесс имеет преимущества перед другими операциями обработки давлением, как в технологическом, так и в экономическом отношении.

Совершенствованию процессов получения полых изделий на основе ротационной вытяжки посвящено достаточно много работ среди которых выделяются: Баркая В.Ф., Гредитор М.А., Могильный Н.И., Корольков В.И., Романовский В.П., Чумадин А.С., Юдин Л.Г., Белов Е.А., Трегубов В.И., Яковлев С.П., Яковлев С.С. и др. Среди зарубежных исследователей выделяются: Кегг Р., Кобаяши Ш., Колпакчиоглу С. и др.

Однако, трудности в правильной оценке силовых параметров сказываются на масштабах использования процесса ротационной вытяжки для производства высокоточных изделий. Разработка и внедрение технологических процессов ротационной вытяжки сложных осесимметричных деталей встречает практические затруднения и часто сдерживается, уступая место менее рациональным процессам механической обработки.

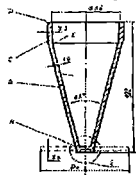
Далее с опорой на литературные и справочные данные дана характеристика технологических и механических свойств конструкционных алюминиевых сплавов, продемонстрировано, что сплав АМгб благодаря технологическим свойствам широко применяется, как конструкционный деформируемый материал в различных отраслях промышленности, обладает достаточной прочностью для алюминиевых сплавов, однако, сплав АМгб обладает низкой пластичностью, повышенной склонностью к налипанию (схватыванию) на инструмент; при этом обработка давлением сплава требует

применения специальных смазок и подсмазочных покрытий. Поэтому сплав АМгб как и ряд других в полной мере можно отнести к разряду труднодеформируемых материалов.

Определено что, основной целью настоящего исследования должна стать разработка технологии изготовления деталей сложной формы с применением оборудования для ротационной вытяжки с соответствующими исследованиями всех стадий производственного процесса, учитывая особенности технологических и механических свойств алюминиевого сплава АМгб.

Вторая глава посвящена разработке вариантам технологии производства осесимметричной детали типа «воронка» из конструкционного алюминиевого сплава АМгб на основе процессов ротационной вытяжки взамен многооперационной штамповки на прессах.

На рисунке 1 показаны размеры и конструктивные особенности детали «воронка», отмечены поверхности изделия, которые должны быть образованы в результате осуществления операций пластического деформирования. Особо отметим, что изделие «воронка» в полной мере относится к изделиям сложной формы, которое состоит из трех основных участков:



- малого цилиндрического участка: с наружной боковой поверхностью (А); с внутренней боковой поверхностью (К); также, торцевой поверхности (L); внешней (G) и внутренней (H) поверхностями радиальной перемычки;

- конического участка с наружной поверхностью (В) и внутренней (F);

- большого цилиндрического участка с наружной поверхностью (С), внутренней (Е) и торцевой (D).

Первоначально деталь «воронка» изготовлялась многопереходной штамповкой с общей продолжительностью 4,41 минуты 0,074 н-часа.

Производство малого цилиндрического участка ротационной вытяжкой нецелесообразно, поэтому процесс его штамповки оставляем без изменений.

Ключевым вопросом любой технологии обработки металлов давлением является определение необходимого числа операций деформирования, которые определяют производительность, качество изделий (в частности, процент брака по трещинам, разрывам и т.п. дефектам), а также тип количество и энергосиловые параметры необходимого технологического оборудования, особенно штамповой оснастки. Процесс ротационной вытяжки проецированием дает возможность реализовать схему напряженного состояния, при которой доля сжимающих напряжений значительно выше, чем при обычной вытяжке в жестких штампах и, соответственно, дает возможность получить большие конечные деформации.

В основе экспериментального исследования используется способ испытания предельных деформаций при ротационной вытяжке изделий конической формы по методике Кегга. Согласно данному способу испытания проводятся на полуэллипсоидном патроне – оправке, который фактически представляет собой конический патрон с непрерывно меняющимся от 180° до 0° углом 2α при вершине. В соответствии с законом

синуса, деталь, выдавливаемая на этой оправке, должна постепенно изменяться по толщине от начального ее значения до нуля.

В работах Кегга также отмечалось, что режим перераскатки дает возможность увеличить сжимающие напряжения. Согласно современной теории разрушения Колмогорова-Богатова увеличение доли сжимающих напряжений ведет к увеличению пластичности металла. Однако режим перераскатки ограничивается возможной потерей устойчивости фланца, а также появлением дополнительных растягивающих напряжений за роликом.

С этой целью были спроектированы и изготовлены специальные оправки с соответствующим профилем (рисунок 2), позволяющие осуществлять ротационную вытяжку изделий конической и цилиндрической форм, при получении изделий предусмотрен, как режим проецирования (по закону синуса), так и режим переутонения.

Получение конических изделий ротационной вытяжкой проецированием основано на законе синуса, согласно которому толщина стенки изделия в любом сечении $t = t_0 \sin \alpha$, можно сказать при $t < t_0 \sin \alpha$ имеет место перераскатка, а при $t > t_0 \sin \alpha$ – недораскатка, где t_0 и t – толщина стенки изделия начальная и после обработки.

Если утонение (обжатие по стенке) выразить как: $l = \frac{t_0 - t}{t_0} * 100\%$, то утонение образца, полученного ротационной вытяжкой на оправке, должно постепенно поменяться от $0=100\%$, причем в момент разрушения, выполняется условие $l = t_{раз}$, оно будет предельным: $l_{пр} = \frac{t_0 - t_{раз}}{t_0} * 100\%$.

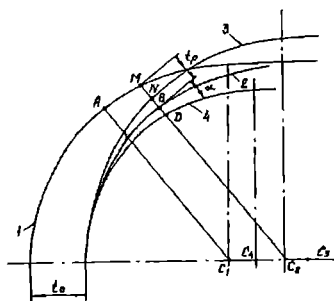


Рисунок 2 - Опытные оправки с необходимым профилем

- 1 – траектория движения вершины ролика, т.е. профиль изделия который задается копиром, где точка C_1 – центр кривизны;
- 2 – профиль оправки, соответствующий ротационной вытяжке в нормальном режиме (по закону синуса), где точка C_2 – центр сферической поверхности;
- 3 – профиль оправки, соответствующий ротационной вытяжке в режиме недоутонения, где точка C_4 – центр сферы, при этом $C_1 C_4 < C_1 C_2$;
- 4 – профиль оправки, соответствующий ротационной вытяжке в режиме переутонения, где точка C_3 – центр сферы, при этом $C_1 C_3 > C_1 C_2$.

Для исследования на способность к ротационной вытяжке были взяты конструкционные алюминиевые сплавы следующих марок: АД1М, А1, А2, АМг6, Д16М, В95М. Сплавы АД1М, А1, А2 легко подвергаются холодной пластической деформации, сплавы АМг6М, Д16М относятся к категории труднодеформируемых и их штамповка ведется как правило с нагревом наконец, высокопрочный сплав В95М деформируют только с нагревом.

Для реализации экспериментальных исследований, оправки, разработанных форм с диаметром 105мм (по закону синуса) и 125мм для режима переутонения, были установлены на гидрокопировальном полуавтомате модели 1722, на который также

устанавливалась раскатная головка с одним формоизменяющим роликом. В качестве образцов для испытаний служили плоские круговые заготовки толщиной t_0 четыре и шесть миллиметров и диаметром $D_0 = 107$ мм. Заготовки вырубались из листового металла в штампе на кривошипном прессе. Способность алюминиевых сплавов к ротационной вытяжке в режиме переутонения испытывали на двух сплавах: АД1М и АМг6М, но при этом варьировали толщиной заготовки. В частности, образцы – заготовки вырубались из листовых материалов толщиной 2; 4; 6; 8 миллиметров.

Сопоставляя процесс ротационной вытяжки с хорошо изученным процессом глубокой вытяжки с утонением стенки, необходимо определить коэффициент вытяжки: $m = d/D = t/t_0$, который в момент разрушения будет предельным: $m_{пр} = t_p/t_0$. Следовательно, предельное утонение выразим как:

$$l_{пр} = (1 - m_{пр}) \times 100\% = (1 - \sin \alpha_{пр}) \times 100\% \quad (1)$$

На основе испытаний для конструкционных алюминиевых сплавов определены предельные характеристики деформирования: степень обжатия $l_{пр}$, коэффициент вытяжки $m_{пр}$, угол конусности оправки $\alpha_{пр}$, которые должны стать основой для выбора режимов деформирования в реальных технологических процессах (таблица 1).

Таблица – 1 Показатели определяющие способность алюминиевых сплавов к ротационной вытяжке

Марка сплава	Конические детали			Цилиндрические детали	
	Степень обжатия $l_{пр}, \%$	Коэффициент вытяжки $m_{пр}$	Угол конуса $\alpha_{пр}$	Степень обжатия $l_{пр}, \%$	Коэффициент вытяжки $m_{пр}$
АД1М	73,8	0,262	15°10'	75,2	0,248
A1	75,4	0,246	14°15'	76,8	0,232
A2	76,1	0,239	13°50'	77,9	0,221
B95M	44,8	0,552	33°30'	56,6	0,434
Д16М	50,9	0,491	29°20'	62,0	0,380
АМг6М	64,7	0,363	20°40'	70,7	0,293

Установлено, что предельные деформации при ротационной вытяжке цилиндрических изделий выше, чем при ротационной вытяжке конических изделий, но эти изменения неодинаковы и зависят от состава и марки алюминиевого сплава. Так для пластичных сплавов А1, А2 и АД1М увеличение составляет не более 2,5%; для хрупких сплавов типа Д16М и В95М такое увеличение достигает 20÷21%; для сплава АМг6М увеличение предельных деформаций составляет 9,3%, т.е. сплав занимает среднее положение из рассматриваемых. Увеличение предельных деформаций при вытяжке цилиндрических изделий объясняется отсутствием дополнительных напряжений от изгиба, который характерен при вытяжке конических деталей.

Для оценки механических свойств материалов проводились стандартные испытания образцов на растяжение при помощи универсальной разрывной машины, для каждого образца записывались все параметры деформации, замерялось относительное сужение шейки $\Psi_{ш}$ и относительное удлинение δ , образца при разрыве и сравнивались с показателями при ротационной вытяжке.

В силу того, что относительное сужение шейки $\Psi_{ш}$ лучше характеризует пластические свойства сплава и легко определяется в производственных условиях,

построены графические зависимости $l_{np} = f(\Psi_{ш})$ и $\alpha_{np} = f(\Psi_{ш})$ представленные на (рисунок 3). Существующая степень обжатия в реальном процессе ротационной вытяжки проецированием не должна равняться предельной, для процессов листовой штамповки деформация на первой операции должна быть на 15÷20% меньше предельно допустимой, примем запас пластичности в 20%, т.е. можно выделить область допустимых деформаций (заштрихованная часть).

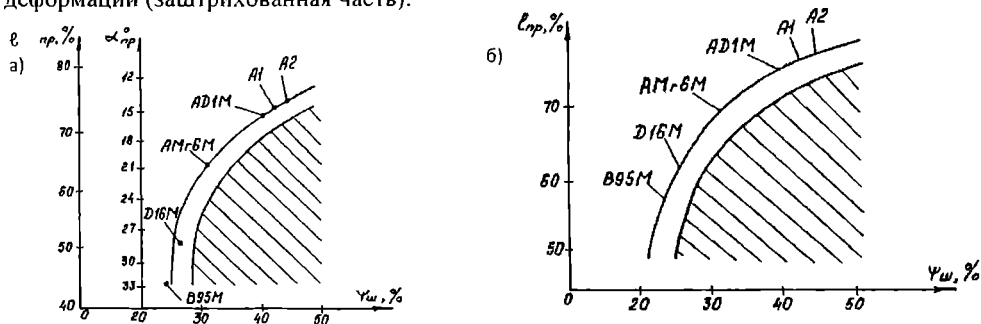


Рисунок 3 - Предельное обжатие и предельный угол конуса
а) конический участок; б) цилиндрический участок

Способность алюминиевых сплавов к ротационной вытяжке в режиме переутонения определяли при помощи тех же показателей, что и в режиме проецирования. Для сопоставления двух этих режимов был введен новый показатель – коэффициент переутонения $f = t_p/t'_p$, где t'_p - толщина заготовки в момент разрушения при вытяжке с переутонением; t_p – толщина заготовки в момент разрушения при вытяжке в режиме проецирования.

На основании испытаний определения предельных деформаций при ротационной вытяжке с переутонением можно сделать следующие выводы:

- тонколистовые ($t_0 = 2\text{ мм}$) алюминиевые сплавы, при ротационной вытяжке с переутонением, теряют устойчивость с появлением дефектов, что объясняется возникновением дополнительных сжимающих напряжений, действующих на фланце в тангенциальном направлении, в результате чего на поверхности фланца образуются складки;

- толстолистовые ($t_0 \geq 4\text{ мм}$) алюминиевые сплавы возможно деформировать с некоторым переутонением, причем малопластичный сплав АМг6М допускает большее переутонение ($f = 1,18 \div 1,25$), чем пластичный сплав АД1М у которого значение ($f = 1,12 \div 1,18$).

Деталь «воронка» у которой исходной заготовкой служили круги из сплава АМг6М диаметром 107 мм и толщиной 6 мм со следующими принятыми характеристиками: предельная степень обжатия $l_{np} = 64,7\%$. Коэффициент переутонения лежит в диапазоне $f = 1,1 \div 1,2$, принимаем $f = 1,15$, с учетом его $l_{np} = 74,2\%$. Однако, в практике расчета процессов листовой штамповки удобнее пользоваться таким показателем, как коэффициент вытяжки, который связан с предельной степенью обжатия зависимостью (1), т.е. $m_{np} = 0,258$. Данный предельно допустимый коэффициент вытяжки (до первой термообработки) будет являться основным исходным параметром для расчета числа операций ротационной вытяжки.

Другим условием, влияющим на величину деформации на каждой операции и само число операций, является то, что требуемый коэффициент вытяжки $m_{тр} = t_{тр}/t_0 = 1,0/6,0 = 0.167$, который меньше предельного, соответственно, требуемая степень обжатия больше предельно допустимой. Следовательно, для получения изделия «воронка» необходимо осуществлять минимум две операции ротационной вытяжки, между которыми должна быть предусмотрена термическая обработка полуфабрикатов с целью восстановления пластических свойств металла.

Технология изготовления детали «воронка» представляется следующим образом: 1) вырубка круговой заготовки на прессе; 2) ротационная вытяжка на станках (не менее двух операций); 3) вытяжка краевой части на прессе (1÷2 операции); 4) выдавливание на прессе внутренней поверхности малого цилиндрического участка (одна операция); 5) калибровка на прессе, для получения окончательных размеров; б) подрезка торцов.

На основе теории разрушения, возможность деформирования того или иного сплава без разрушения может быть оценена ψ - степенью использования ресурса пластичности. Определяемая отношением $\psi = \lambda_{\Sigma}/\lambda_p$, где λ_{Σ} - суммарная степень деформации сдвига до отжига; λ_p - пластичность, т.е. предельная степень деформации сдвига, зависящая от напряженного состояния (σ).

Принимая, что технология включает не более двух - трех операций ротационной вытяжки и одной операции глубокой вытяжки, определение суммарного значения степени использования ресурса пластичности следует вести по следующим зависимостям:

- конический участок с поверхностью (В) получаемый за три операции:

$$\psi_{\Sigma В3} = \psi_{В1} - \Delta\psi_{В1} + \psi_{В2} - \Delta\psi_{В2} + \psi_{В3} < 1 \quad (2)$$

- конический участок с поверхностью (В) получаемый за две операции:

$$\psi_{\Sigma В2} = \psi_{В1} - \Delta\psi_{В1} + \psi_{В2} < 1 \quad (3)$$

- для цилиндрического участка с поверхностью (С):

$$\psi_{\Sigma С} = \psi_{С1} - \Delta\psi_{С1} + \psi_{г.л.в.} < 1 \quad (4)$$

где В – конический участок, С – цилиндрический участок (рис. 1); ψ_1, ψ_2, ψ_3 – степень использования ресурса пластичности на участке В, после операций ротационной вытяжки; $\Delta\psi_1, \Delta\psi_2$ - уменьшение поврежденности металла после отжига; $\psi_{г.л.в.}$ - степень использования ресурса пластичности при глубокой вытяжке цилиндра.

В работе Богатова А.А. приведены формулы для определения степени деформации сдвига при поперечной прокатке труб в различных участках очага деформации. Так, на участке обжатия, совпадающим на схеме деформированного состояния с участком обжатия при ротационной вытяжке с утонением стенки, степень деформации сдвига может быть вычислена по следующей зависимости: $\lambda = 2K_n \ln \frac{t_0}{t_1}$, где $K_n = 1,25 \div 1,30$ – коэффициент неравномерности деформации по толщине стенки трубы; учитывая, что $t_1/t_0 = m$, и приняв $K_n = 1,28$, получаем: $\lambda = 2,56 \ln \frac{1}{m}$.

Соответственно предельная степень деформации, т.е. пластичность $\lambda_p = 2,56 \ln \frac{1}{m_{пр}}$, где $m_{пр}$ – предельный коэффициент вытяжки, найдены по результатам экспериментальных исследований.

В итоге степень использования пластичности представим в виде:

$$\psi = \frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_p} = \frac{2,56 \ln \frac{1}{m_{\Sigma}}}{2,56 \ln \frac{1}{m_{\text{пр}}}} = \frac{\ln m_{\text{пр}}}{\ln m_{\Sigma}} \quad (5)$$

Для случая ротационной вытяжки сплава АМг6М с $m_{\text{пр}} = 0,258$ имеем: $\psi_i = 0,75 \ln \frac{1}{m_i}$, где m_i – коэффициент вытяжки на данной операции.

Примем следующие допущения: 1) ротационная вытяжка осуществляется одним роликом; 2) восстановительный ресурс пластичности после отжига равен приблизительно половине суммарного значения ψ на предыдущих операциях; 3) расчетный ресурс пластичности увеличим на 10 %.

Учитывая принятые допущения и связь ψ_i и m_i , выраженную зависимостью (5), формулы (2)–(4) запишем в виде:

$$\psi_{\Sigma R3} = \ln \left[\left(\frac{1}{m_1} \right)^{0,2} \times \left(\frac{1}{m_2} \right)^{0,41} \times \left(\frac{1}{m_3} \right)^{0,82} \right] < 1 \quad (6)$$

$$\psi_{\Sigma R2} = \ln \left[\left(\frac{1}{m_1} \right)^{0,41} \times \left(\frac{1}{m_2} \right)^{0,82} \right] < 1 \quad (7)$$

$$\psi_{\Sigma C} = \ln \left(\frac{1}{m_1} \right)^{0,82} + \psi_{\text{восстанов}} < 1$$

Далее определим углы конусности оправок (калибровку инструмента) и связанные с ними коэффициенты ротационной вытяжки для каждого из двух вариантов разрабатываемой технологии.

Первый вариант – получение конического участка B за три ротационные вытяжки.

Так как $m_1 < m_2 < m_3$, соответственно $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3$, принимаем: $2\alpha_1 = 50^\circ$; $2\alpha_2 = 35^\circ$; $2\alpha_3 = 25^\circ$.

Тогда с учетом ранее принятого коэффициента переутонения $f = 1,15$ и соотношений $m_i = \frac{\sin \alpha_i}{f}$; $m_i = \frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha_{i-1}}$ получим следующие коэффициенты вытяжки по операциям: $m_1 = 0,384$; $m_2 = 0,565$; $m_3 = 0,77$. Итого, толщина металла на участке B после каждой ротационной вытяжки составит: $t_1 = 2,3 \text{ мм}$; $t_2 = 1,3 \text{ мм}$; $t_3 = 1,0 \text{ мм}$.

Расчет суммарного ресурса пластичности по формуле (6) составил $\psi_{R3} = 0,64$ в том числе после первой ротационной вытяжки расчетом по формуле (5) получили $\psi_{R3} = 0,7$. Таким образом, формирование конического участка B по первому варианту технологии дает ощутимый запас пластичности.

Второй вариант – получение конического участка B за две ротационные вытяжки.

Принимаем: угол наклона – $2\alpha_1 = 45^\circ$; $2\alpha_2 = 25^\circ$ коэффициент вытяжки – $m_1 = 0,325$; $m_2 = 0,513$ толщина металла после каждой вытяжки – $t_1 = 1,95 \text{ мм}$; $t_2 = 1,0 \text{ мм}$.

В этом случае ресурс пластичности $\psi_{b2} = 0,98$, рассчитанный по формуле (7), близок к предельному, т. е. запаса пластичности практически нет. После первой ротационной вытяжки ресурс пластичности, рассчитанный по формуле (5) составил $\psi_{b1} = 0,83$.

Ресурс пластичности на операции глубокой вытяжки определим по формуле $\psi_{глубокая} = 1,2 \frac{\lambda_{суживант}}{\lambda_p \left(\frac{\sigma}{T}\right)} < 1$, где λ_p – степень деформации, которая для сплава АМгБМ определяется по диаграмме пластичности с учетом показателя σ/T , при коэффициенте запаса равном 1,2.

Г. А. Смирновым-Аляевым была предложена формула для определения степени деформации сдвига материальной частицы, находящейся в краевой части полого изделия:

$$\lambda_{суживант} = \frac{\sqrt{3}-1}{\sqrt{3}} \times \ln \frac{D}{d} + \frac{2}{\sqrt{3}} \times \ln \frac{F}{F_1} \quad (8)$$

где D и d – диаметры заготовки и изделия; F и F_1 – площади торцевой части заготовки и изделия.

Показатель напряженного состояния при волочении на длинномерной оправке близок показателю напряженного состояния краевой части деформируемой заготовки при глубокой вытяжке:

$$\left(\frac{\sigma}{T}\right) = 2 \ln \frac{t_c}{t_{c'}} + 5 - 6 \times \sqrt{\frac{d_c}{D_{c'}}} \quad (9)$$

Учитывая, что конечная толщина металла $t_c = 3,3$ мм на участке C известна, из совместного решения уравнений (8) и (9) определим толщину металла на участке C' , которую необходимо получить после первой операции ротационной вытяжки.

Для обоих вариантов технологии получили толщину $t_{c'} = 3,8$ мм.

Основываясь на выполненных исследованиях: определения предельных деформаций при ротационной вытяжке с утонением, расчета необходимого числа операций ротационной вытяжки и глубокой вытяжки с учетом степени использования ресурса пластичности, предлагается, изготовление детали «воронка» вести по двум вариантам технологии (рисунки 4 и 5), отличающихся друг от друга количеством операций ротационной вытяжки, определенной величиной деформации на каждой из них и калибровкой инструмента.

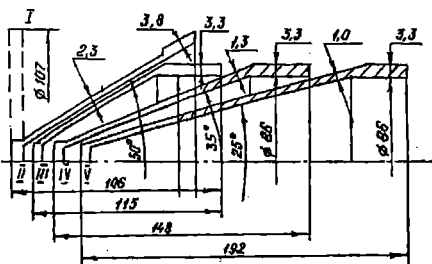


Рисунок 4 - Технология производства детали «воронка» за три операции РВ

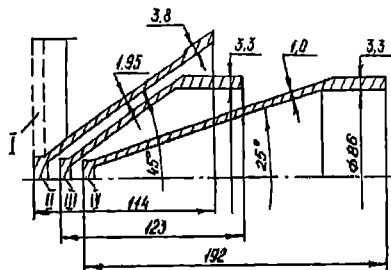


Рисунок 5 - Технология производства детали «воронка» за две операции РВ

Опытно-промышленные испытания (100 шт.) по каждому варианту технологии выявили, что наиболее приемлем первый вариант технологии, так как имел малый процент брака и, соответственно, выход годного составил 95%. Второй же вариант хоть и является более производительным, однако выход годного составляет лишь 72%, причем из отбракованных изделий 90% (25 изделий) были получены после первой операции ротационной вытяжки.

Третья глава посвящена формированию рациональной формы заготовки с целью дальнейшего совершенствования технологии по снижению уровня брака.

Анализ брака полученного в результате ротационной вытяжки при первом и втором вариантах технологии (рисунок 6) выявил, что трещины и разрывы возникают не в очаге деформации, а на коническом уже продеформированном участке за счет действия растягивающих напряжений. Выявлено также, что разрушение наблюдается в первоначальный момент ротационной вытяжки, когда только начинается формирование конической поверхности, т.е. когда коническая поверхность сформировалась на первой четверти от высоты полуфабриката.



Рисунок 6 – Дефекты на поверхности изделия, возникающие после первой операции РВ

При ротационной вытяжке проецированием из-за различного течения металла в зоне деформации, имеющей криволинейную форму, целесообразно исследовать процесс по участкам. Предлагается выделять следующие участки (рисунок 7):

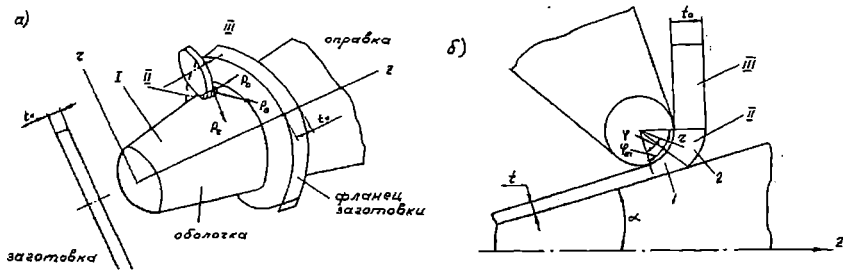


Рисунок 7 – Участки (а) и зоны (б) протекания процесса РВ

- участок I материал пластически деформирован и испытывает упругие деформации, возникающие от реакции оправки;
- участок II представляет собой очаг деформации. Для удобства исследований предлагается очаг деформации делить на зоны. Так в зоне 1, которая называется зоной обжатия, основное влияние оказывают нормальные напряжения, а касательными напряжениями можно пренебречь. В зоне 2 происходят деформации сдвига, т.е. кроме нормальных напряжений, в этой зоне необходимо учитывать касательные напряжения;
- участок III представляет собой недеформированный фланец, для которого главным условием успешного протекания процесса деформирования является его устойчивость.

В качестве основной зависимости для построения эпюр контактных давлений было принято выражение в котором контактные давления в зоне сдвига определяются с учетом начальной толщины заготовки t_0 , толщины стенки изделия - t , угла конусности оправки - α и упрочнения металла, определяемого степенью обжатия - ζ и коэффициентами упрочнения A и n , при этом вместо отношения t/t_0 можно применять значение $-\ln$. Рассматривается полярная система координат (r, φ) с полюсом в центре скругления ролика.

Таким образом:

$$q(\varphi) = A \left(1 - \frac{t}{t_0}\right)^n \left(\frac{1}{2\varphi_m} + 1.15\right) \ln\left(\frac{r_0 + t_0 \sin \alpha}{r_0}\right) + 0.5A \left(1 - \frac{t}{t_0}\right)^n \times \\ \times \frac{\omega}{\varphi_m(1+\omega^2) \sin\left[\omega \ln\left(\frac{r_0}{r_0+t_0 \sin \alpha}\right)\right]} \times \left(A \sin \pi \frac{\varphi}{\varphi_m} + B(\varphi) \cos \pi \frac{\varphi}{\varphi_m}\right) \quad (10)$$

Задаваясь значением текущего угла φ в выражении (10) и реализуя расчеты значений, были построены эпюры контактных давлений для различных вариантов заготовки на первой операции ротационной вытяжки изделия «воронка» из алюминиевого сплава АМгбМ (рисунок 8).

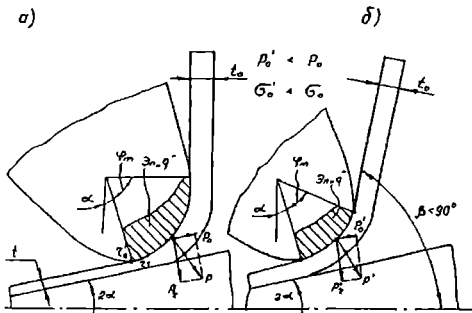


Рисунок 8 - Характер эпюры контактного давления и зависимость осевой составляющей

При построении были использованы следующие данные: $t_0 = 6\text{мм}$; $t = 1.95\text{мм}$; $\alpha = 22.5^\circ$; ($2\alpha = 45^\circ$); $\varphi_{ш} = 90^\circ - \alpha = 67.5^\circ$ - если раскатывается плоская заготовка (а) и $\varphi_{ш} = \beta - \alpha$ - если ротационная вытяжка ведется из конусообразной заготовки (б), где β угол конусности, причем $\beta < 90^\circ$; коэффициенты упрочнения $A = 574$ и $n = 0.23$ для алюминиевого сплава АМгбМ принятые из справочника.

Анализ эпюр дает основание заключить, что неглубокая, порядка ($\beta = 85^\circ$) предварительная формовка заготовки на конус уменьшает участок контакта обжимаемой части заготовки роликом, определяемый углом $\varphi_{ш}$. Это, в свою очередь, уменьшает горизонтальную проекцию эпюры контактных давлений, а соответственно, снижает усилие P_0 и осевое растягивающее напряжение σ_0 , приводящее к появлению разрывов металла. Снижение растягивающего напряжения σ_0 будет определять повышенный запас прочности при деформировании.

Далее определен диапазон конусности заготовки, т.е. размер угла β . Поскольку листовой металл имеет размеры значительно большие, чем диаметр формируемой круговой заготовки, процесс формовки можно отождествить с процессом глубокой вытяжки с прижимом в начальной стадии, когда периферийная часть заготовки неподвижна.

Известно, что начальная стадия процесса вытяжки заключается в местной пластической деформации кольцевой незажатой части заготовки, такая деформация осуществляется за счет растяжения металла и его утонения, без перемещения фланца заготовки, находящегося под давлением прижима. Критерием прочности в этом случае

будет выполнение условия $\sigma_{\rho \max} < \sigma_{\beta}$, где σ_{β} - предел прочности металла; $\sigma_{\rho \max}$ - максимальное растягивающее напряжение.

Представим перемещение точки в системе координат (рисунок 9), пусть ρ_0 - первоначальная координата т. A_0 , находящейся в очаге деформации. В процессе вытяжки-формовки точка A_0 переместится и займет положение A' , имея текущее значение радиус-вектора ρ . Деформацию в радиальном направлении можно представить следующим выражением: $\varepsilon_{\rho} = \ln \frac{\rho}{\rho_0}$.

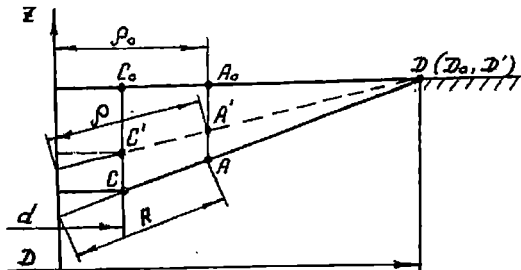


Рисунок 9 – Схема перемещения точки при вытяжке из листа

Деформация в тангенциальном направлении близка к нулю, т.е. можно сказать, что $\varepsilon_{\tau} \approx 0$. Тогда из условия постоянства объема: $\varepsilon_{\rho} + \varepsilon_{\tau} + \varepsilon_z = 0$ получим интенсивность деформации оцениваемую выражением:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} |\varepsilon_{\rho}| = 1,15 \ln \frac{\rho}{\rho_0} \quad \text{Для точки C}$$

отношение $\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{R}{\rho_0} = \frac{1}{\sin \beta}$

$$\text{Тогда } \varepsilon_i = 1,15 \ln \frac{1}{\sin \beta} \quad (11).$$

Установим угол формовки β , при котором будет начало пластической деформации. Известно, что пластической считается такая деформация, при которой остаточное удлинение составляет 0,2% и более. Тогда, приняв $\varepsilon_{\beta} = \ln \frac{1}{\sin \beta} = 0,002$, получим $\beta \approx 86^\circ$.

Максимальное растягивающее напряжение, найдено из выражения:

$$\sigma_{\rho \max} = c \sqrt{1,15 \ln \left(\frac{1}{\sin \beta} \right)} \times \left(1,15 \ln \frac{D}{d} + \frac{t}{2(2r_n+t)} + \frac{t}{2(2r_M+t)} \right) \quad (12)$$

где: $t = 6$ мм толщина заготовки; диаметр заготовки $D = 107$ мм; внутренний диаметр конуса $d = 12$ мм (определяется внутренней конфигурацией будущей детали); радиус скругления кромки пуансона $r_n = 1,5$ мм; радиус скругления кромки матрицы $r_M = 0,3$ мм; коэффициент упрочнения $c = 60 \div 66$; предел прочности $\sigma_{\beta} \approx 350$ МПа (согласно нормативным лабораторным данным).

Для определения нижнего допустимого предела угла конусности заготовки – β при формовке необходимо приравнять $\sigma_{\rho \max} = \sigma_{\beta}$.

Анализ зависимости $\sigma_{\rho \max} = f(\beta)$, которая близка к линейной, позволяет сделать вывод, что для того, чтобы иметь запас прочности не менее 20÷30%, необходимо задавать угол конусности заготовки с нижним пределом $\beta \geq 80^\circ$.

Предлагается для ротационной вытяжки детали «воронка» использовать не плоскую заготовку (а), а заготовку конусной формы (б) (рисунок 10), что приведет к существенному снижению брака. Оптимальные пределы угла конусности при формовке заготовки, лежит в диапазоне $\beta = [80^\circ \div 86^\circ]$.

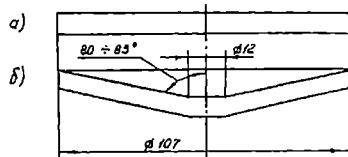


Рисунок 10 - Плоская (а) и конусообразная (б) заготовки для РВ

В четвертой главе осуществлен теоретический расчет составляющих усилия деформации действующих при ротационной вытяжке проецированием, а также крутящего момента и мощности необходимого оборудования, для чего была использована идеализированная модель протекания процесса РВ и деформация отдельного элемента, где пунктир означает режим переутонения (рисунок 11, 12) с учетом особенностей процесса, а именно: неплоская форма заготовки и возможность проведения ротационной вытяжки в режиме переутонения.

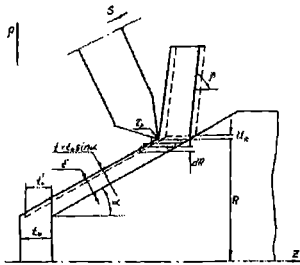


Рисунок 11 - Модель процесса РВ, где сплошной контур в режиме проецирования, а пунктир в режиме переутонения

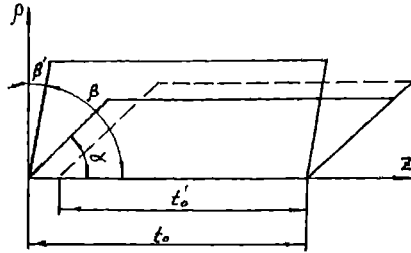


Рисунок 12 - деформация отдельного простого элемента в процессе РВ, где сплошной контур в режиме проецирования, а пунктир в режиме переутонения

Расчет окружного усилия, крутящего момента на валу и мощности привода шпинделя раскатной машины, будем основывать на энергетическом принципе, согласно которому работа внутренних сил (работа деформирования) за бесконечно малый промежуток времени равна работе внешних сил за тот же промежуток времени:

$$dA_{\text{внутр}} = dA_{\text{внеш}}$$

В свою очередь элементарная работа деформации: $dA_{\text{внутр}} = a * dV$, где a – удельная работа, т.е. работа пластической деформации на единицу объема; dV – элементарный объем продеформированного металла, который для идеализированной модели определяется выражением: $dV = 2\pi R t_0 dR$.

Величину удельной работы деформирования можно определить по следующей зависимости: $a = \int_0^{\Delta \epsilon_i} \sigma_i d\epsilon_i$, здесь $d\epsilon_i$ – бесконечно малое приращение интенсивности деформаций.

Известно, что интенсивность деформаций, необходимая для последующего расчета усилий и мощности, может быть определена для принятой цилиндрической системы координат по следующей зависимости:

$$\epsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_\rho - \epsilon_\theta)^2 + (\epsilon_\theta - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_\rho)^2 + \frac{3}{2}(j_{\rho\theta}^2 + j_{\theta z}^2 + j_{\rho z}^2)}$$

Эта зависимость соответствует случаю, когда деформируется элементарный объем (сегмент со сторонами $d\rho$, $d\theta$, dZ).

В принятой нами идеализированной модели исходный элемент имеет конечные размеры в осевом и тангенциальном направлениях. Поэтому в формуле вместо интенсивности деформаций и ее компонентов будем записывать соответствующие приращения, тогда приращение интенсивности деформаций будет $\Delta \varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{ctg}(\alpha + \beta')$.

Работа внешних сил определяется выражением: $dA_{\text{внеш}} = P_t dl$, где dl – участок контакта между заготовкой и роликом в течение бесконечно малого промежутка времени.

Приравняв работу внутренних сил работе сил внешних, получим:

$$2\pi R t_0 dR \int_0^{\Delta \varepsilon_i} \sigma_i d\varepsilon_i = P_t dl, \text{ откуда окружное усилие } P_t = 2\pi R t_0 \sigma_i \frac{dR}{dl}.$$

Учитывая, что подача S и элементарный объем dV связаны простой зависимостью:

$$S = \frac{dV}{t_0 \sin \alpha dl} \text{ получаем выражение: } P_t = S t_0 \sin \alpha \int_0^{\Delta \varepsilon_i} \sigma_i d\varepsilon_i.$$

Наиболее точной зависимостью, связывающей интенсивность деформаций ε_i и интенсивность напряжений σ_i (истинное сопротивление металла деформированию), является степенная зависимость: $\sigma_i = \sigma_0 + B\varepsilon_i^c$, где σ_0 – начальный предел текучести (предел текучести неупрочненного металла); B и c – некоторые константы, присущие конкретному металлу или сплаву.

Подставив данную зависимость, проведя интегрирование и подставив принятое значение $\Delta \varepsilon_i$, получаем окончательно следующее выражение:

$$P_t = S t_0 \sin \alpha \left\{ \sigma_0 \sqrt{\left(1 - \frac{1}{r}\right)^2 + \frac{1}{3} \operatorname{ctg}^2(\alpha + \beta')} + \frac{B}{c+1} \left[\left(1 - \frac{1}{r}\right)^2 + \frac{1}{3} \operatorname{ctg}^2(\alpha + \beta') \right]^{\frac{c+1}{2}} \right\} \quad (13).$$

Расчет осевой P_0 и радиальной P_r составляющих усилия велось с учетом следующих допущений:

1. Давление на поверхности контакта заготовки с инструментом (раскатным роликом) распределено равномерно;
2. Влиянием трения на поверхности контакта пренебрегаем;
3. Не учитываем действия упругой деформации инструмента;
4. Не учитываем изменения конусности заготовки, которая происходит вследствие некоторой потери устойчивости фланца от переутонения стенки изделия.

Перечисленные допущения вполне приемлемы, так как для расчета усилий и мощности, чтобы выбрать и даже проектировать оборудование, большая точность не требуется.

Принятое постоянство контактных давлений между роликом и заготовкой позволяет выразить осевую и радиальную составляющие через определенную окружную составляющую, используя простые зависимости следующего вида: $P_0 = P_t \frac{F_0}{F_t}$ и $P_r = P_t \frac{F_r}{F_t}$, где F_t, F_r, F_0 – площади проекций поверхности контакта соответственно в окружном, радиальном и осевом направлениях.

Проекции условно можно считать по форме, близкими к форме треугольника, в свою очередь, площадь треугольника вычисляется по известной зависимости.

Используя эти соотношения запишем значение осевой и радиальной составляющих усилия в следующем виде:

$$P_0 = \frac{D_p}{2S \cos \alpha} \arccos\left(1 - \frac{2S}{D_p \operatorname{tg} \alpha}\right) P_t \quad (14)$$

$$P_r = \frac{D_p}{2S \cos \alpha} \arccos \left(1 - \frac{t_0}{D_p \operatorname{tg} \alpha} \right) \times \left(\frac{1}{\cos \alpha} - \operatorname{tg} \alpha + \frac{S}{2r_p} \right) P_t \quad (15)$$

Радиальная и осевая составляющая усилия при ротационной вытяжке проецированием различаются на постоянный коэффициент (линейная зависимость) который зависит от угла конусности оправки, скорости подачи и радиуса скругления ролика, т.е.

$$P_r = P_o \left(\frac{1}{\cos \alpha} - \operatorname{tg} \alpha + \frac{S}{2r_p} \right) \quad (16)$$

Эти составляющие усилия определены для установившейся стадии деформирования, для начальной стадии деформирования, для расчета усилия предлагается использовать формулу Е.П. Унксова для технологии раздачи кольца коническими раздвижными бойками: $P = 2.2 \sigma_s \varphi_p \pi r H \ln \frac{R}{r}$, где $\varphi_p = \frac{\operatorname{tg} \alpha + \mu_1}{1 + (\mu_1 + \mu_2) \operatorname{tg} \alpha - \mu_1 \mu_2}$, здесь μ_1 и μ_2 - соответственно коэффициенты трения металла по оправке и металла по ролику (скольжение с проскальзыванием); H – высота кольца.

Выражения (13)+(16) могут быть использованы при проведении расчетов, связанных с проектированием и выбором соответствующего технологического оборудования. С учетом особенностей процесса были построены графические зависимости составляющих усилия деформации от угла конусности заготовки и коэффициента переутонения рисунок 13, а также скорости подачи рисунок 14.

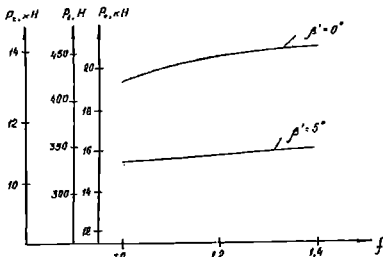


Рисунок 13- Составляющие усилия деформации в зависимости от угла конусности заготовки и коэффициента переутонения

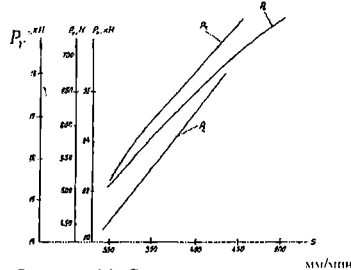


Рисунок 14- Составляющие усилия деформации в зависимости от скорости

Зная составляющие усилия ротационной вытяжки можно определить соответствующие мощности, с целью выбора или проектирования необходимого станочного оборудования, можно также определить крутящий момент на валу шпинделя, используя следующие выражения:

$$1) \text{ для крутящего момента } M_{кр} = P_t R \quad (17)$$

где: P_t - окружное усилие, R - текущий радиус, являющийся переменной величиной, зависящий от перемещения Z , который определяется из выражения: $R = r + Z \operatorname{tg} \alpha$;

$$2) \text{ для мощности на валу шпинделя } N_{ш} = M_{кр} \omega = P_t (t + r + Z \operatorname{tg} \alpha) \frac{\pi n}{30} \quad (18)$$

где t – толщина изделия.

Далее были проведены экспериментальные исследования с целью проверки расчетных энергосиловых параметров. Экспериментальная проверка энергосиловых параметров, осуществлена методом тензометрии при использовании специально созданного устройства, которая показала достаточно хорошую сходимость с результатами теоретических расчетов, так в девяти проведенных опытах,

соответствующих различным режимам деформирования, погрешность не превышает 17%, а при определении окружной составляющей усилия погрешность не выходит за пределы 10%.

При определении радиальной составляющей усилия необходимо учитывать две стадии процесса: начальную стадию деформирования и стадию установившегося деформирования. Максимальное значение радиального усилия в начальной стадии в 1,2-1,8 раз превышает значение усилия при установившемся процессе, что необходимо учитывать при конструировании роликовой обоймы, в частности при выборе подшипников роликов.

Использование предварительно отформованной конусообразной заготовки с углом конусности $\beta = [80^\circ \div 85^\circ]$ заметно снижает (14% при теоретических расчетах и 7% при экспериментальном подтверждении) составляющие усилия ротационной вытяжки проектированием, что приводит к снижению осевой составляющей усилия, а соответственно уменьшает опасность получения дефектов изделия по сравнению с плоской заготовкой.

Пятая глава посвящена подбору оборудования и совершенствованию вспомогательных операций процесса ротационной вытяжки.

Практика изготовления деталей типа «воронка» на обычных гидрокопировальных станках горизонтального исполнения показала, что в условиях массового производства невозможно получать детали с разностенностью выше 0,05 мм, даже на деталях с углом между образующим конуса не менее 60° . Следует отметить, что на таком оборудовании нет возможности обеспечить строго линейный характер изменения толщины стенки, вследствие упругих деформаций суппортов, шпинделя, оправки и раскатного ролика, возникающего от односторонней нагрузки.

Также известно связанные с недостаточной жесткостью упругие перемещения и обжатие сказываются на точности изделий. На поверхности изделия повторяются дефекты формы исходной заготовки, так как изменяются радиальные и осевые усилия, жесткость, теряется точность воспроизведения профиля копира, снижается точность установки на заданный размер, что особенно проявляется на горизонтальных роликовых станках для обработки конусных деталей с малыми углами конусности образующей.

В этом случае наиболее целесообразны специальные станки автоматы с двухроликовой компоновкой суппортов. Во избежание возникновения опрокидывающих моментов на суппортах, вызывающих при этом повышенный износ направляющих, вибраций, а также снижение точности установки на заданный размер между роликом и оправкой, при проектировании раскатного оборудования, следует стремиться к минимизации упругих перемещений. Такой эффект достигается при вертикальной компоновке станка, когда опорная плоскость направляющих поперечного перемещения суппортов строго перпендикулярна к оси обрабатываемого изделия.

Следует отметить, что при выборе или при проектировании оборудования для ротационной вытяжки большое значение имеет оптимизация раскатного инструмента, а именно оправки и роликов, по критерию уменьшения влияния упругих деформаций.

Если на оправке мы снижаем упругие деформации за счет вертикального расположения оси, то для снижения упругих деформаций от роликов можно предложить увеличить их количество до трех. Однако в случае массового производства изделий типа «воронка», которые имеют диаметр в вершине конуса 10 мм, а в основании 100 мм, то при обработке заготовок тремя роликами диаметр этих роликов не может превышать 60

мм. Такое уменьшение диаметра ограничивается условиями прочности и жесткости крепления ролика на суппорте.

Ротационная вытяжка конических деталей, должна осуществляться роликами диаметром, лежащим в диапазоне 100÷200 мм, чтобы избежать вибраций не рекомендуется диаметр ролика выбирать кратным диаметру оправки. Соответственно конструкция роликовой обоймы станка должна иметь двухроликую схему обработки, что позволяет использовать раскатные ролики различного диаметра и допускается различное их взаиморасположение с различными вариантами их подшипниковых опор.

Подводя итог представленных требований к оборудованию для осуществления ротационной вытяжки коническо-цилиндрического изделия типа «воронка», станки-автоматы должны отвечать следующим характеристикам: 1) расположение шпинделя – вертикальное; 2) привод вращения шпинделя - электрический; 3) количество раскатных роликов – два; 4) максимальные составляющие усилия на ролике (не менее), принято исходя из экспериментальных данных с запасом в 30-50%: (P_t - окружное 1кН; P_o - осевое 30 кН; P_r - радиальное 35 кН); 5) привод перемещения ползуна и суппортов – гидравлический; 6) мощность привода вращения шпинделя не менее – 2,5 кВт.

Такие характеристики, как скорость подачи $s=200\div400$ мм/мин, скорость вращения шпинделя $n=600\div1200$ об/мин, усилие прижима $360\div520$ МПа, должны соответствовать аналогичным характеристикам, принятым на гидрокопировальных полуавтоматах.

Исходя из того что АМг6М принадлежит к металлам повышенной степени упрочняемости, при изготовлении детали типа «воронка», после каждой операции обработки давлением, в том числе ротационной вытяжки, проводится межоперационный отжиг. Отжиг является термообработкой заготовки с целью вернуть прежние механические свойства и возможности проведения дальнейшей деформации без появления дефектов.

Для интенсификации процесса ротационного формоизменения листовых заготовок из труднодеформируемых сплавов алюминия, предлагается применение технологии ротационной вытяжки детали «воронка» из алюминиевого сплава АМг6М проводить с подготовкой, путем термообработки заготовок в расплавах солей хлоридов $ZnCl_2$, KCl , $NaCl$, в результате такой обработки происходит сокращение времени промежуточного и окончательного отжига при сохранении пластических свойств изделий, а также повышается сопротивление образованию и развитию микротрещин, за счёт нанесения на поверхность изделий из алюминиевых сплавов цинкового покрытия, что повышает коэффициент выхода годного получаемых изделий.

Термическая и химико-термическая обработка алюминиевых заготовок в солевых расплавах обуславливается такими преимуществами, которые обладают расплавленные соли по сравнению с другими нагревающими средами. К числу таких преимуществ относятся: высокая скорость нагрева в расплавленных солях, за счет высокого коэффициента теплоотдачи ($3000-5000$ Вт/($m^2 \times K$), а для воздушной среды $5,6$ Вт/($m^2 \times K$)); высокая равномерность нагрева, ввиду значительно большей теплопроводности жидкости по сравнению с газовой средой. Высокая скорость нагрева в солевом расплаве позволяет достичь более высокой производительности, а вследствие высокой подвижности солевого расплава создается четкий градиент температуры, что дает возможность, осуществлять более равномерный нагрев, чем в других печах.

Заявляемый эффект достигается обработкой алюминиевых заготовок в солевом расплаве хлоридов металлов определенного состава (таблица 2), что, позволяет провести

эффективную термическую обработку изделий из алюминиевых сплавов в течение 5-10 минут, благодаря высокой скорости нагрева заготовок за счёт высокого коэффициента теплоотдачи солевого расплава, и равномерному распределению температуры по их объему. Такая химико-термическая обработка также позволяет одновременно нанести цинковое покрытие, которое, используется как технологическое для снижения уровня брака.

Таблица 2 – Состав и массовая доля компонентов солевого расплава

Компоненты расплава	Расплавы хлоридов металлов		
	Промежуточный и окончательный отжиг		
	I состав расплава (масс.%)	II состав расплава (масс.%)	III состав расплава (масс.%)
Хлорид цинка ZnCl ₂	50	60	70
Хлорид калия KCl	25	20	15
Хлорид натрия NaCl	25	20	15

Благодаря проходящей химической реакции $Al + Zn^{2+} \rightarrow Al^{3+} + Zn/Al$, на поверхности деформируемых изделий из алюминиевых сплавов получается не только ровный слой цинка, но и переходный слой, представляющий собой химическое соединение, что и определяет прочное сцепление цинкового покрытия с алюминиевыми сплавами на уровне металлической связи, которое «залечивает» микротрещины и лучше удерживает применяемую смазку.

Выполненный комплекс теоретических и экспериментальных исследований позволил разработать принципиально новую технологию производства деталей типа «воронка» из алюминиевого сплава АМг6М, основу которой составили операции ротационной вытяжки, позволив в 2,2 раза сократить машинное время обработки, снизить энергопотребление процесса и повысить коэффициент выхода годного. Снижена продолжительность производственного цикла детали «воронка» в 1,6 раза. В настоящий момент окончательный вариант технологического процесса изготовления детали «воронка» выглядит следующим образом (таблица 3).

Таблица 3 – Технологический процесс изготовления детали «воронка»

№	Наименование операции	Тип оборудования	Время, мин
1.	Заготовительная Резать лист на полосы	Ножницы кривошипные Н3121	0,08
2.	Штамповочная Вырубить заготовку	Пресс кривошипный КА2534	0,062
3.	Ротационное формоизменение 1-я ротационная вытяжка	Станок автомат РВ Загрузка Б195	0,7
4.	Штамповочная Глубокая вытяжка	Пресс гидравлический П6328	0,17
5.	Промывка, сушка	Моечная машина Н252	0,04
6.	Термообработка. Отжиг одновременно с покрытием Zn	Печь ванна СВГ-3,5.4/8, 5М1	0,06
7.	Сушка и омыливание	Автоматическая линия И256	0,11

8.	Ротационное формоизменение 2-я ротационная вытяжка	Станок автомат РВ	0,7
9.	Калибровка с выдавливанием вершины	Пресс гидравлический П3232	0,4
10.	Подготовительная. Осветление	Автоматическая линия И234	0,2
Итого: получаем цикл изготовления детали «воронка» 2,5 мин = 0,042 н-часа			

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе теоретического и экспериментального исследований процесса РВ получены следующие результаты и выводы:

Взамен многопереходного процесса штамповки изделий на прессах разработана и исследована технология производства осесимметричных конических изделий типа «воронка» из конструкционного упрочняемого алюминиевого сплава АМг6М, в основе которой, протекает процесс ротационной вытяжки (рисунок 15).

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ «ВОРОНКА»

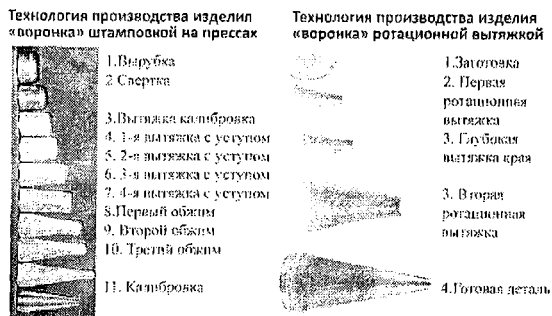


Рисунок 15 - Технологии изготовления детали «воронка»

Разработана методика определения типа и количества операций вытяжки, проведены комплексные экспериментальные исследования способности листовых алюминиевых сплавов к ротационной вытяжке в режиме проецирования и с принудительным утонением стенки.

Выявлено, что способность алюминиевых сплавов к ротационной вытяжке проецированием определяется зависимостью: от степени использования ресурса пластичности, от степени деформации и механических свойств материала.

Были построены зависимости предельного обжатия и предельного угла конуса от относительного сужения шейки образца при стандартных испытаниях металла на разрыв $l_{пр} = f(\Psi_{ш})$ и $\alpha_{пр} = f(\Psi_{ш})$, которые дают возможность, не проводя трудоемких испытаний на ротационную вытяжку, определять предельные деформации только по результатам определения механических свойств металла.

Доказано, что формообразование конических полых изделий, возможно, осуществлять в режиме переутонения, что позволяет на 12÷25% увеличивать предельные деформации по сравнению с режимом проецированием (по закону синуса).

Для детали сложной формы типа «воронка» определены виды и необходимое количество операций обработки металлов давлением. Было предложено два варианта технологии: первый вариант включает - три операции ротационной вытяжки на токарно-гидрокопировальном полуавтомате и одну операцию глубокой вытяжки на прессе; второй вариант – состоит из двух операций ротационной вытяжки и одной операции глубокой вытяжки, которые выполнялись на том же оборудовании. Для каждого варианта определены размерные характеристики и калибровка инструмента по переходам.

Рекомендуется для ротационной вытяжки детали «воронка» использовать не плоскую заготовку, а конусообразную заготовку, что приводит к существенному снижению брака. Найдены оптимальные пределы угла конусности при формовке заготовки, который находится в диапазоне $\beta = [80^\circ \div 86^\circ]$.

Разработана технология ускоренного отжига с одновременным нанесением цинкового покрытия позволяющую в три раза сократить продолжительность вспомогательных операций и существенно повысить выход годных изделий.

Получены теоретические и графические зависимости для определения составляющих усилия ротационной вытяжки проецированием, а также величины мощности и крутящего момента на валу шпинделя, проведена их экспериментальная проверка.

В качестве промышленного оборудования для производства деталей «воронка» необходимо использовать специальные высокоточные, жесткие и автоматические высокопроизводительные станки со следующими характеристиками: 1) расположение шпинделя – вертикальное; 2) привод вращения шпинделя - электрический; 3) количество раскатных роликов – два; 4) максимальные составляющие усилия на ролике (не менее): - окружное 1кН; - осевое 30 кН; - радиальное 35 кН; 5) привод перемещения ползуна и суппортов – гидравлический; 6) мощность привода вращения шпинделя не менее – 2,5 кВт.

Расчет экономического эффекта в действующих ценах приведен в приложении.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Статьи, в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Ухлов И.В., Каржавин В.В. Ротационная вытяжка деталей из алюминиевого сплава с магнием взамен штамповки на прессе // Вестник машиностроения. 2015. № 1 – С.78 – 83.

2. Ухлов И.В., Каржавин В.В. Определение рациональной формы заготовки для ротационной вытяжки // Кузнечно–штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. №9 – С.18 – 22.

3. Ухлов И.В., Каржавин В.В. Совершенствование технологий листовой штамповки туднодеформируемых материалов путем обработки в расплавах солей // АПК: Регионы России, 2012, №12., С.11 – 14.

4. Ухлов И.В., Каржавин В.В., Шибeko С.Г. Интенсификация глубокой вытяжки изделий из титановых сплавов // Кузнечно–штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. №5. С.22 – 26.

5. Ухлов И.В., Каржавин В.В., Шибeko С.Г. Получение паяных соединений из коррозионно-стойких сталей с использованием специальных покрытий // Вестник машиностроения. – 2013. №8 – С.44 – 46.

6. Ухлов И.В., Лехов О.С., Турляев В.В., Туев М.Ю. Новый подход к проектированию установок совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листа // Производство проката. 2014. №3 – 45 – 47.

Патент:

7. Пат. №2468113 Российская Федерация, МПК С22F 1/04, С23С 10/24 Способ обработки изделий из алюминиевых сплавов (варианты) / Каржавин В.В., Ухлов И.В.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет» (РГППУ) 2011145552/02; заявл. 09.11.11; опубл. 27.11.2012, Бюл. № 33. 13с.

Другие публикации:

8. Ухлов И.В., Каржавин В.В. Ротационная вытяжка полых осесимметричных деталей из конструкционных алюминиевых сплавов // Техника и технологии: роль в развитии современного общества: Материалы III Международной научно-практической конференции. Сборник научных трудов. Краснодар, 2014. – С.124 – 127.

9. Ухлов И.В. Теоретический расчет энергосиловых параметров ротационной вытяжки конических изделий из конструкционных алюминиевых сплавов // Современная наука: тенденции развития. Материалы VIII международной научно-практической конференции. Сборник научных трудов. Том I. Краснодар, 2014. - С.111 – 117.

10. Ухлов И.В., Лехов О.С., Турляев В.В., Туев М.Ю. Оценка качества листа из алюминиевых сплавов и энергоемкости совмещенного процесса непрерывного литья и деформации // Сборник докладов международного научно-технического конгресса ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии. Ч.1 – М.: ООО «Белый ветер». 2014. - С.250 – 254.

11. Ухлов И.В. Подготовка алюминиевых сплавов к пластическим деформациям химико-термической обработкой в соляных ваннах // Седьмая международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении» Екатеринбург. УрФУ, 2013.

12. Ухлов И.В., Каржавин В.В. Отжиг алюминиевых заготовок в расплавах солей // Техника и технологии: роль в развитии современного общества. Сборник научных трудов. Краснодар, 2013г. Т38. - С.90 – 92.