

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Северо-Кавказская государственная гуманитарно-технологическая  
академия»

На правах рукописи

Байрамуков Рашид Альбертович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И УСТРОЙСТВА  
ДЛЯ ГАЗОВОЙ ШТАМПОВКИ С ПОРШНЕВЫМ МУЛЬТИПЛИКАТОРОМ  
ДАВЛЕНИЯ**

05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Боташев Анвар Юсуфович

Черкесск 2018

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1. Обзор и анализ известных методов газовой листовой штамповки.....	11
1.2. Цель и задачи исследования .....	37
2. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ УСТРОЙСТВ ГАЗОВОЙ ШТАМПОВКИ С МУЛЬТИПЛИКАЦИЕЙ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ .....	38
2.1. Схема устройства газовой штамповки с форкамерно-факельным зажиганием .....	38
2.2. Схема устройства газовой штамповки со ступенчатой камерой сгорания...	44
2.3. Схема устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления .....	51
3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА УСТРОЙСТВА ГАЗОВОЙ ШТАМПОВКИ.....	56
С ПОРШНЕВЫМ МУЛЬТИПЛИКАТОРОМ ДАВЛЕНИЯ .....	56
3.1. Этапы процесса штамповки устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления.....	56
3.2. Исследование рабочего процесса устройства газовой штамповки на первом этапе процесса штамповки .....	56
3.3. Исследование рабочего процесса устройства газовой штамповки на втором этапе процесса штамповки .....	77
Заключение по разделу .....	96
4. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ УСТРОЙСТВА ГАЗОВОЙ ШТАМПОВКИ С ПОРШНЕВЫМ МУЛЬТИПЛИКАТОРОМ ДАВЛЕНИЯ.....	98
4.1 Разработка и создание устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления.....	98
4.2 Методика проектирования устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления.....	107

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА УСТРОЙСТВА ГАЗОВОЙ ШТАМПОВКИ С ПОРШНЕВЫМ МУЛЬТИПЛИКАТОРОМ ДАВЛЕНИЯ .....	113
5.1 Цель и задачи экспериментальных исследований.....	113
5.2.Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов.....	113
5.3 Экспериментальные исследования рабочего процесса совершающегося в рабочем цилиндре .....	116
5.4 Разработка технологии штамповки на устройстве газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления. ....	129
Заключение по разделу .....	133
6. ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВА ГАЗОВОЙ ШТАМПОВКИ С ПОРШНЕВЫМ МУЛЬТИПЛИКАТОРОМ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ШТАМПОВКИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ .....	135
6.1 Разработка новых способов получения биметаллических изделий. ....	135
6.2 Экспериментальные исследования процесса штамповки биметаллических изделий. ....	138
Заключение по разделу .....	140
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ .....	142
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	144
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	158

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$t_c$  – температура топливной смеси,  $^{\circ}\text{C}$ .

$t_z$  – температура продуктов сгорания,  $^{\circ}\text{C}$ .

$t_{z_1}$  – температуры поверхности заготовки  $^{\circ}\text{C}$ .

$t_0$  – начальная температура заготовки,  $^{\circ}\text{C}$ .

$t_m, t_{\text{ц}}$  – температуры стенок матрицы и рабочего цилиндра,  $^{\circ}\text{C}$ .

$T_z, T_c$  – абсолютные температуры продуктов сгорания и топливной смеси,  $K$ .

$P_c$  – давление топливной смеси,  $\text{Па}$ .

$P$  – давление,  $\text{Па}$ .

$P_z$  – давление продуктов сгорания при сгорании в постоянном объеме,  $\text{Па}$ .

$\bar{P}_k, \bar{P}_{\text{ц}}$  – безразмерные давления газа в камере сгорания и цилиндре.

$P_{k1}, P_{k2}$  – давления в камере сгорания перед началом и в конце движения поршня соответственно,  $\text{Па}$ .

$P_{\text{ц}1}, P_{\text{ц}2}$  – давление в рабочем цилиндре перед началом и в конце движения поршня,  $\text{Па}$ .

$\Pi$  – отношение давления продуктов сгорания в камере сгорания к давлению продуктов сгорания в рабочем цилиндре перед началом движения поршня.

$\Pi_{\text{ц}}$  – степень мультипликации давления в рабочем цилиндре.

$V_k$  – начальный объем камеры сгорания,  $\text{м}^3$ .

$V_c$  – объем шарового сегмента,  $\text{м}^3$ ;

$V_{\text{ц}}$  – объем рабочего цилиндра,  $\text{м}^3$ .

$\vartheta_k$  – относительный объем камеры сгорания,  $\text{м}^3$ .

$F_z$  – площадь тепловоспринимающей поверхности заготовки,  $\text{м}^2$ .

$\delta$  – толщина заготовки,  $\text{м}$ .

$R_c$  – радиус шарового сегмента,  $\text{м}$ .

$\tau_z$  – время полного сгорания топливной смеси,  $\text{с}$ .

$\bar{\tau}$  – безразмерное время.

$\tau$  – текущее значение времени,  $\text{с}$ .

$k$  – показатель адиабаты.

$\lambda$  – степень повышения давления при сгорании в постоянном объеме.

$c_p$  – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, Дж/(кг·К).

$H'_c$  – низшая теплотворная способность 1  $\text{нм}^3$  топливной смеси, определенной при нормальных условиях, Дж/м<sup>3</sup>.

$\varphi$  – коэффициент потери теплоты.

$Q'_z$  – количество теплоты, воспринятой заготовкой, Дж.

$Q'_c$  – количество теплоты, воспринятой стенками рабочего цилиндра, Дж.

$x$  – относительное перемещение поршня.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** Во многих отраслях промышленности значительна доля мелкосерийных производств. В условиях мелкосерийных производств по сравнению с традиционными методами штамповки более эффективны импульсные методы листовой штамповки. Однако эти методы не обеспечивают нагрев штампуемой заготовки, поэтому не достаточно эффективны для производства деталей из труднодеформируемых сплавов. Нагрев листовой заготовки необходимо осуществлять непосредственно в полости матрицы, так как она быстро остывает из-за большой площади ее поверхности. В настоящее время для интенсивного нагрева металлов в основном используют плазменный, лазерный и электрический методы нагрева. Использование этих методов для нагрева листовой заготовки в полости матрицы существенно усложняет и удорожает штамповую оснастку. Для осуществления в полости матрицы нагрева заготовки и последующего ее деформирования более приемлема газовая штамповка с двухсторонним нагревом заготовки, обеспечивающая нагрев штампуемой заготовки до интервала температур горячей обработки. Однако, в известных конструкциях устройств газовой штамповки давление, действующее на поверхность обрабатываемой заготовки, имеет сравнительно невысокую величину, поэтому энергия газа недостаточна для нагрева толстостенных заготовок. Это ограничивает технологические возможности устройств газовой штамповки. В связи с этим совершенствование метода листовой газовой штамповки и разработка новых конструкций устройств газовой штамповки, обеспечивающих штамповку листовых деталей значительно большей толщины за счет применения мультипликации давления газа, является актуальной задачей.

Работа выполнена в рамках Федеральной программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса «УМНИК» (договор №5799ГУ1/2014 от 05.06.2015, договор №10739ГУ2/2016 от 14.11.2016).

**Целью работы является** расширение технологических возможностей газовой штамповки путем разработки устройства газовой

штамповки, обеспечивающего повышение давления и температуры газа, действующего на поверхность обрабатываемой заготовки.

Для выполнения поставленной цели были сформулированы основные задачи:

- выполнить обзор существующих методов листовой газовой штамповки
- выполнить анализ путей расширения технологических возможностей газовой штамповки и конструктивных решений для их реализации;
- выполнить разработку конструктивной схемы устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления;
- провести теоретическое исследование рабочего процесса газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления и оптимизацию его работы;
- выполнить разработку и создание экспериментального устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления;
- выполнить разработку технологии производства штамповки сферообразных днищ на устройстве газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления;
- провести экспериментальные исследования рабочего процесса устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления;
- выполнить практическую апробацию устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления и оценку его технологических возможностей.

**Достоверность** результатов теоретических исследований подтверждаются полученным экспериментальными результатами на созданном оборудовании.

**Методика исследования.** Теоретические исследования проводились с использованием уравнений пластичности, динамики твердого тела, термодинамики и теплопередачи.

**Научная новизна:**

- установлены закономерности рабочего процесса устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления, нашедшие экспериментальные подтверждения;
- разработана математическая модель рабочего процесса устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления и определены оптимальные соотношения параметров этого процесса;
- разработана методика проектирования устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления;
- разработаны новые способы получения биметаллических изделий методом газовой штамповки.

**Практическая значимость:**

- разработан и создан новый тип кузнечно-штамповочного оборудования – устройство газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления, осуществляющее штамповку листовых деталей из стали и цветных сплавов с нагревом заготовки до интервала температур горячей обработки;
- разработана технология штамповки на устройстве газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления;
- в данном устройстве давление газа, действующее на обрабатываемую заготовку, в 4...5 раз выше, чем в известных устройствах газовой штамповки, что дает возможность штамповать детали значительно большей толщины, а так же изделия из малопластичных и труднодеформируемых материалов.
- данное устройство обеспечивает также получение биметаллических штампованных изделий из листовых разнородных материалов, что позволяет существенно снизить себестоимость производства этих изделий.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на следующих конференциях, конкурсах: Конкурс по отбору проектов по федеральной программе «УМНИК» от «4» декабря 2014 г., «Методика и методология» инновационной активности и инвестиционной привлекательности» (Черкесск

БИЦ СевКавГГТА, 2015 г.), «Рациональные пути решения социально-экономических, научно-технических и кадровых проблем региона» (Черкесск, 2016 г.), Конкурс по отбору проектов по программе «УМНИК» от “12” мая 2016 г., «Интеграция науки, общества, производства и промышленности» (Казань, 13 января 2017 г.), «Инновационные технологии нового тысячелетия» (Пермь, 25 сентября 2016 г.), «Актуальные проблемы современной науки: состояние, тенденции развития: I Всероссийской научно-практической конференции» (Черкесск, 2017 г.).

Разработанное устройство газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления демонстрировалось в 2018 г. на XXI Московском международном Салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед», и удостоено серебряной медали.

**На защиту выносятся:**

- разработанные новые конструктивные схемы устройств газовой штамповки;
- конструкция разработанного и созданного устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления;
- разработанная математическая модель рабочего процесса устройства газовой штамповки с мультипликатором давления;
- результаты экспериментальных исследований рабочего процесса устройства газовой штамповки с мультипликатором давления;
- разработанные новые способы получения биметаллических штампованных изделий.

**Публикации.** По тематике диссертации были опубликованы 13 научных работ, 2 из которых опубликованы в ведущих изданиях рекомендованных ВАК, а также 3 патента на полезные модели и 2 патента на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация включает в себя введение, шесть глав, основные результаты и выводы, список литературы из 125

наименований, основная часть работы изложена на 158 страницах, содержит 71 рисунок и 7 приложений.

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1. Обзор и анализ известных методов газовой листовой штамповки

Газовая штамповка появилась в середине XX века. Ее появление была связана с использованием энергии взрывчатых веществ, в частности порохов для штамповки листовых деталей. Позже стали использовать другие источники энергии [1–12]. Газовая штамповка является одной из разновидностей импульсных методов обработки металлов давлением. Большую роль в становлении и развитии импульсных методов обработки металлов давлением сыграли работы Алексеева Ю.Н., Борисевича В.К., Бочарова Ю.А., Зимина А.И., Кононенко В.Г., Пихтовникова Р.В., Попова Е.А., Попова О.В., Поляка С.М., Третьяка В.В. и др. [13–35]. Одной из разновидностей импульсных методов металлообработки является газовая штамповка. Работы С.П. Яковлева и его последователей внесли значительный вклад в развитие газовой штамповки [36–52].

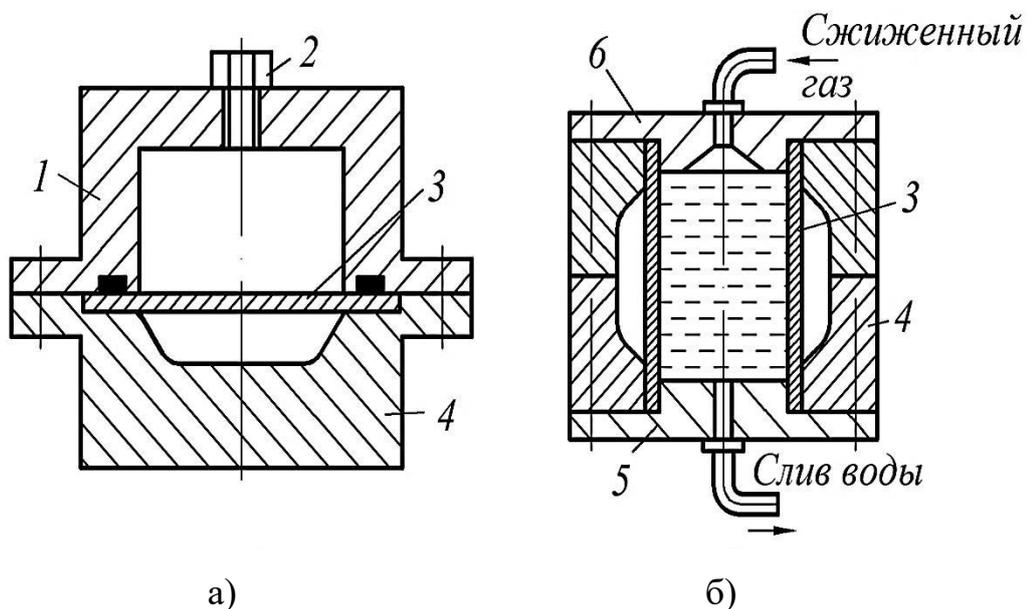
Применительно к обработке листовых металлических заготовок различают в основном следующие методы импульсной обработки давлением: гидровзрывная штамповка, штамповка посредством эластичной среды, электрогидравлическая штамповка, магнитно-импульсная штамповка, газовая штамповка. В зависимости от источника энергии, используемой для осуществления процесса штамповки, различают: штамповка сжиженным газом, пороховыми газами, газодетонационная штамповка, газоимпульсная штамповка, штамповка продуктами сгорания газовых смесей. К газовой штамповке можно отнести и пневмоформовку, осуществляемую посредством нагретого газа. Рассмотрим вкратце перечисленные методы газовой штамповки.

***Штамповка с помощью сжиженных газов.*** Она основана на быстром испарении сжиженного газа помещенного в закрытую емкость, вследствие этого быстро увеличивается давление, оказываемое на поверхность штампуемой заготовки. Энергетические возможности данного способа относительно невелики. Благодаря простоте метода данным способом изготавливаются тонкостенные

детали из плоских и цилиндрических заготовок. В качестве сжиженного газа в основном используется жидкий азот.

Схемы установок для штамповки сжиженным газом показаны на рисунке 1.1. Сжиженный газ заливают в закрытую камеру 1 через заливное отверстие. Герметизация камеры осуществляется при помощи пробки 2. За счет теплообмена между сжиженным газом и стенками камеры происходит его быстрое испарение, вследствие этого внутри камеры резко повышается давление и происходит деформация заготовки 3 в матрицу 4.

Для экономии сжиженного газа обычно используется вода, которая позволяет уменьшить первоначальный объем камеры. Такую схему штамповки применяют часто при штамповке полых заготовок (рисунок 1.1, б). Основным недостатком данного метода является сложность транспортировки и хранения сжиженного газа. В основном по этим причинам данный метод не нашел широкого применения.

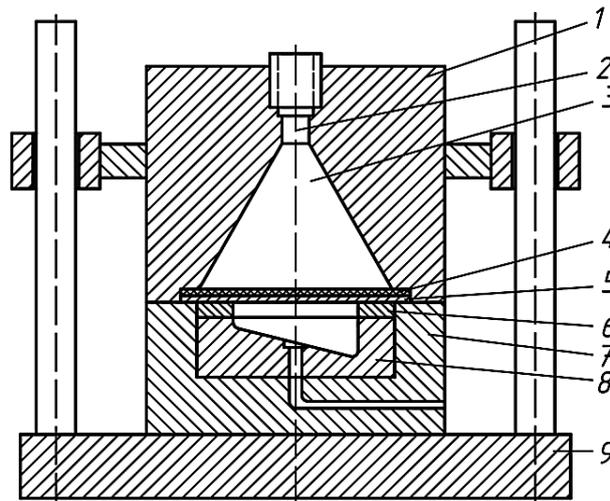


а) – из плоской заготовки; б) – трубчатой заготовки.

1 – камера сгорания; 2 – пробка; 3 – заготовка; 4 – матрица; 5, 6 – крышки.

Рисунок 1.1 – Штамповка испарением сжиженного газа

**Штамповка пороховыми газами.** При этом методе в качестве энергоносителя используют метательные взрывчатые вещества, именуемые порохами. При сгорании пороха образуется газ с высоким давлением. Воздействием этого газа на поверхность обрабатываемой заготовки осуществляется процесс штамповки. Этот метод в основном используется для операций раздачи и калибровки полых деталей из тонколистовых заготовок [53]. Для повышения эффективности этого процесса используют промежуточную передающую среду (воду, резину, полиуретан), посредством которой обеспечивается равномерная деформация заготовки в процессе штамповки. Принципиальная схема установки закрытого типа представлена на рисунке 1.2. Установка состоит из двух корпусных частей 1 и 9. В верхней части корпуса устанавливается рабочая камера 3, которая заполнена водой или эластичной средой. Патрон, заполненный порохом, размещается на верхней части корпуса. Матрица 8 с прижимным кольцом 6 устанавливается в матрицедержателе 7. Для герметизации рабочей камеры используется уплотнительная прокладка 4.



- 1, 9 - подвижная и неподвижная части корпуса; 2 - патрон с пороховым зарядом;  
 3 - рабочая камера; 4 - уплотнительная прокладка; 5 - заготовка;  
 6 - прижимное кольцо; 7 – матрицедержатель; 8 – матрица

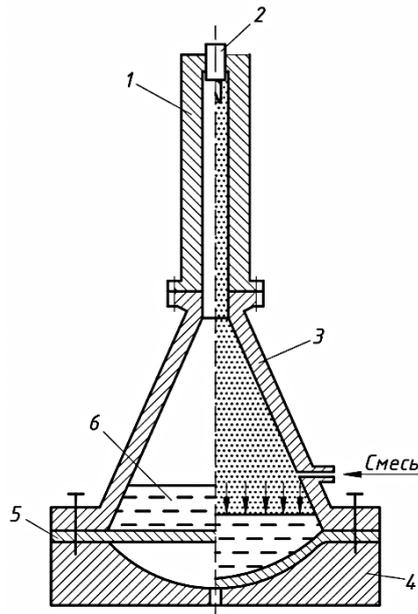
Рисунок 1.2 – Установка для штамповки энергией порохов

Образующиеся при сгорании пороха газы воздействуют через передающую среду на поверхность штампуемой заготовки 5. Установки данного типа позволяют штамповать лишь тонколистовые детали, так как они позволяют использовать взрывчатые вещества массой до 0,01 кг и заготовки с габаритными размерами до 200 мм. Такие установки отличаются малыми габаритными размерами и простотой конструкции. Однако применение их весьма ограничено. Основными недостатками данного метода штамповки являются большие организационно – технические сложности, связанные с обеспечением требуемой техники безопасности по хранению и использованию взрывчатых веществ.

**Газодетонационная штамповка.** Газодетонационная штамповка осуществляется использованием горючих газовых смесей стехиометрического и нестехиометрического состава.

При этом методе процесс штамповки осуществляется использованием детонационного горения газовой смеси (ДГС). Основные преимущества использования газовых смесей: невысокая стоимость газовых смесей. Кроме того, по сравнению с порохом газовые смеси более безопасны, так как они образуются внутри штамповочного оборудования из отдельных компонент. Газодетонационную штамповку проводят по двум схемам: закрытая и открытая. По этим схемам разработаны несколько типов оборудования [4,53].

Схема закрытого устройства с использованием энергии ДГС представлена на рисунке 1.3. Взрывная камера 3 наполняется газовой смесью. В качестве газовой смеси обычно используется пропан - воздух, ацетилен – кислород. Зажигание газовой смеси производится при помощи электрической искры от свечи 2. При этом в ударной трубе процесс горения переходит в детонационное горение и формируется ударная волна, которая вызывает детонацию газовой смеси во взрывной камере 3. Возникающая при этом детонационная волна осуществляет деформацию заготовки 5.



- 1- ударная трубка; 2 - свеча; 3- взрывная коническая камера;  
4- матрица; 5 – заготовка; 6 - гидросреда

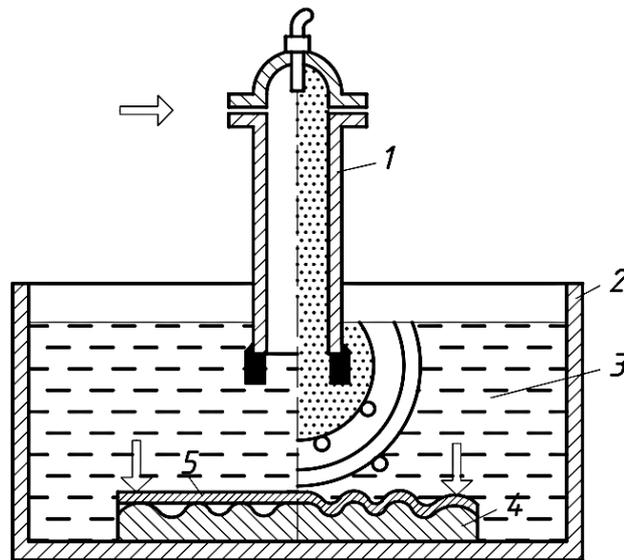
Рисунок 1.3 – Закрытая схема штамповки с использованием детонационного горения газовой смеси

К преимуществам штамповки энергией ДГС относятся: возможность изготовления деталей в обычных цеховых условиях; точность и плавность регулирования в широких пределах давления газовой смеси; равномерность поля давления, действующего на заготовку; возможность механизации и автоматизации процесса штамповки. Этот метод выгодно применять при штамповке тонколистовых деталей из легкодеформируемых листовых материалов, в частности алюминиевых сплавов.

Основной недостаток данного метода штамповки заключается в том, что после действия ударной волны давление на штампуемую заготовку существенно падает. Время действия ударной волны чрезвычайно мало, и за это время ударная волна не успевает произвести значительную деформацию заготовки. Поэтому этот метод неэффективен для штамповки деталей сложной формы, имеющих значительную глубину. Ввиду кратковременности процесса температура заготовки существенно не повышается, и штамповка осуществляется в холодном состоянии заготовки. Поэтому этот метод используют преимущественно для

штамповки деталей из пластичных материалов, в частности из алюминиевых сплавов.

При открытой схеме штамповки энергией ДГС процесс протекает в гидросреде с использованием детонационно-газового трубчатого источника импульсных нагрузок, схема которого представлена на рисунке 1.4.

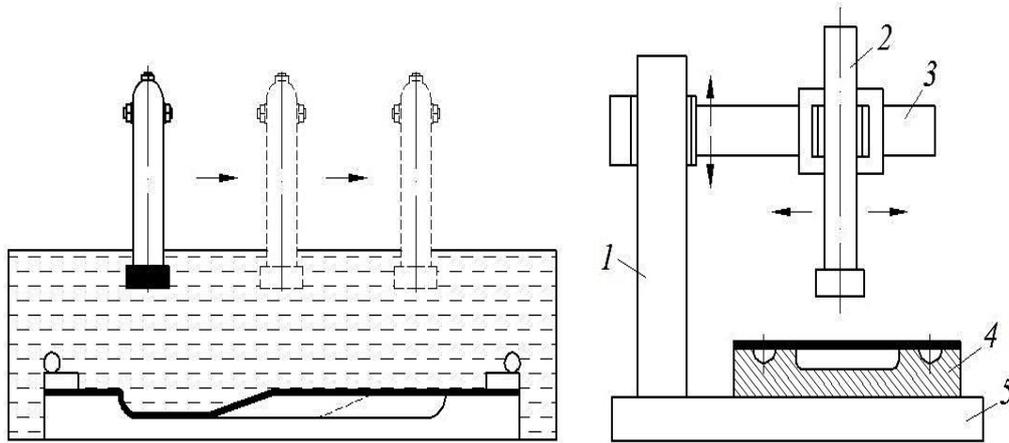


- 1 – детонационно-газовый трубчатый источник импульсных нагрузок;  
2 – бассейн; 3 – гидросреда; 4 – матрица; 5 – заготовка

Рисунок 1.4 – Открытая схема штамповки энергией ДГС

Необходимо отметить, что при открытой схеме штамповки энергией ДГС действующая на поверхность заготовки импульсная нагрузка схожа с импульсной нагрузкой гидровзрывной штамповки, осуществляемой при помощи бризантных взрывчатых веществ (БВВ). Однако в данном случае по сравнению с БВВ обеспечивается более длительное (в 10 – 20 раз) импульсное воздействие давления на поверхность заготовки, но при меньшей амплитуде. Вследствие этого оказывается более мягкая нагрузка на штампуемую заготовку.

Для штамповки толстолистовых деталей в основном применяют закрытую схему штамповки, в которой на заготовку оказывается последовательное воздействие нагрузки, схема которой представлена на рисунке 1.5.

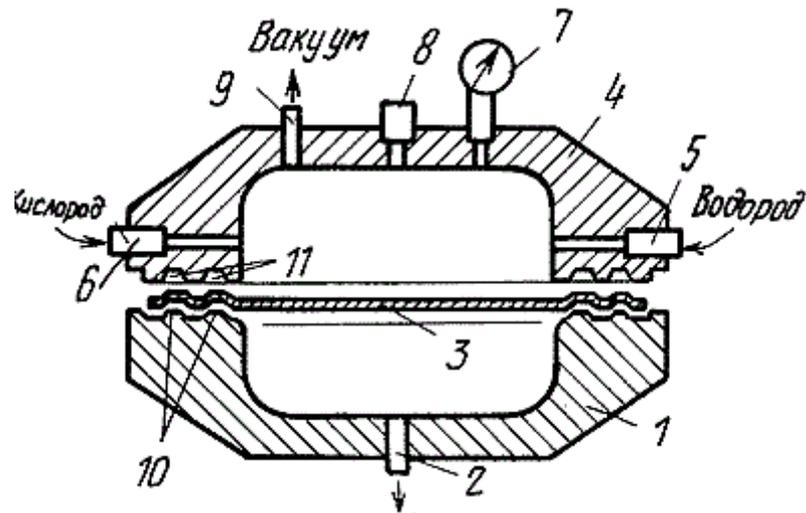


1 – колонна; 2 – подвижный трубчатый источник импульсных нагрузок;  
3 – консоль; 4 – матрица; 5 – станина.

Рисунок 1.5 – Схемы штамповки энергией ДГС методом последовательного приложения нагрузки и установки для реализации этого метода

При детонации горючей газовой смеси стехиометрического состава образуется ударная волна чрезмерно высокой интенсивности. При штамповке деталей из малопластичных сплавов эта ударная волна вызывает разрыв заготовки. Снижение интенсивности ударной волны может быть достигнуто использованием газовых смесей нестехиометрического состава. Это осуществлено в способе газодетонационной штамповки [54], схема которого представлена на рисунке 1.6. Штамповка данным способом осуществляется следующим образом.

Матрицу 1 соединяют с взрывной камерой 4, в которой установлены вентиль подачи кислорода 5, вентиль подачи водорода 6, а так же вакуумный вентиль 9. На прижимных поверхностях матрицы и взрывной камеры выполнены кольцевые проточки 10 и 11 в которых установлены прокладки служащие для обеспечения герметизации устройства во время процесса штамповки. В матрицу 1 устанавливают тонколистовую заготовку. Затем через вакуумный вентиль 2 и 4 откачивается воздух из полости матрицы и взрывной камеры соответственно.

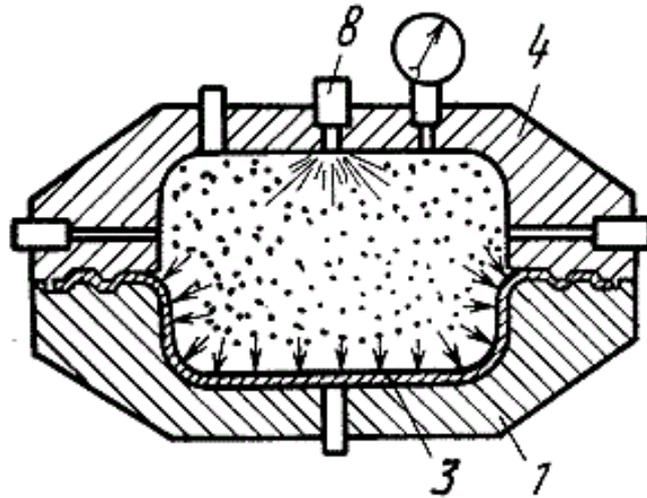


- 1 – матрица; 2, 9 – вакуумный вентиль; 3 – заготовка; 4 – взрывная камера; 5 – вентиль подачи водорода; 6 – вентиль подачи кислорода; 7 – газовый манометр; 8 – элемент инициирования смеси (свеча зажигания); 10 – кольцевой выступ; 11 – кольцевая проточка.

Рисунок 1.6 – Схема устройства для газодетонационной штамповки

Через вентиль 5 подается водород в камеру 4 до определенного парциального давления  $P_{\text{вод}}$ . Давление в камере 4 контролируется по манометру 7. Затем через вентиль 6 происходит подача кислорода до суммарного давления  $P_{\text{см}}$ , который предварительно определен из соотношения  $P_{\text{см}} f(P_{\text{вод}})$ . Детонация горючей смеси происходит при помощи свечи 8, на которую подается электрический импульс высокого напряжения (рисунок 1.7). Под действием ударной волны заготовка 3 деформируется и вдавливается в полость матрицы 1. Затем пресс форма раскрывается и извлекаются отштампованная деталь.

В данной работе автор проводит экспериментальные исследования процесса штамповки и приводит соотношение для определения начального значения давления топливной смеси  $P_{\text{см}}$  по парциальному давлению водорода  $P_{\text{вод}}$ . В процессе исследования использовались листовые заготовки мартенситного и аустенитного типов толщиной 0,5-1,2 мм с размерами 90-700 мм. Состав водород-кислородной смеси находился в пределах 16-90% соответственно.



1 – матрица; 3 – заготовка; 4 – взрывная камера; 8 – элемент инициирования смеси (свеча зажигания).

Рисунок 1.7 – Процесс газодетонационной штамповки:

Общее давление смеси варьировалось от 0,2-25 атм. после проведенных исследований автор указывает на то, что если общее давление смеси  $P_{см.}$  меньше величины  $P_{вод.} + 1,22 (P_{вод.})^{0,65}$ , то произойдет разрыв заготовки. Так как в такой газовой смеси за счет относительно большого содержания водорода ударная волна и давление за фронтом ударной волны имеют недопустимо высокие значения, приводящие к чрезмерно напряженному режиму нагружения заготовки. Следует отметить, что разрыв заготовки происходит без существенной ее вытяжки.

Разрушение заготовки наступает также, если общее давление смеси  $P_{см.}$  больше величины  $P_{вод.} + 53,06 (P_{вод.})^{-1,28}$ , так как смесь оказывается пересыщенной относительно тяжелым кислородом и продукты взрыва, имея сравнительно высокую плотность при большой скорости расширения, оказывают также чрезмерно интенсивное импульсное воздействие. Необходимо отметить, что разрыв заготовки наступает в тот момент, когда она уже имеет существенную вытяжку.

Для сохранения заготовки при требуемой вытяжке необходимо чтобы общее давление смеси  $P_{см.}$  было не менее величины  $P_{вод.} + 1,22 (P_{вод.})^{0,65}$  и не более

величины  $P_{\text{вод.}} + 53,06 (P_{\text{вод.}})^{-1,28}$ . Это условие позволяет использовать предлагаемый способ штамповки без повреждения заготовки.

На рисунке 1.8 представлено найденное соотношение  $P_{\text{вод.}} + 1,22 (P_{\text{вод.}})^{0,65} \cong P_{\text{см.}} \cong P_{\text{вод.}} + 53,06 (P_{\text{вод.}})^{-1,28}$  в графическом виде. Пунктирной прямой на графике показана зависимость  $P_{\text{см.}} f(P_{\text{вод.}})$  для гремучего газа классической стехиометрии  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ . Вся область заявляемых значений для общего давления смеси  $P_{\text{см.}}$  лежит выше этой прямой.

Для осуществления процесса штамповки автором была использована листовая заготовка 08X18H10T толщиной 1 мм и размерами 515x485 мм. Так же была использована матрица с размерами 340 x 370 мм глубиной 130 мм, и взрывная камера с внутренними размерами 340 x 370 x 130 мм и объемом 15 л.

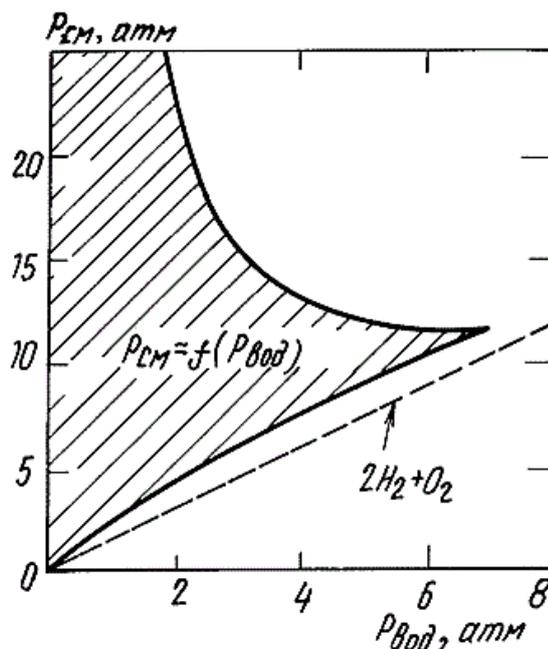


Рисунок 1.8 – График необходимого соотношение водород-кислородной смеси для осуществления газодетонационной штамповки.

Были найдены величины количества энергии, необходимые для осуществления штамповки, 428 КДж. Затем определяли необходимый объем водорода при атмосферном давлении, 60 л. По рассчитанному количеству водорода и объему взрывной камеры определялось давление, которое будет оказывать водород, наполняя весь объем камеры (парциальное давление), 4 атм.

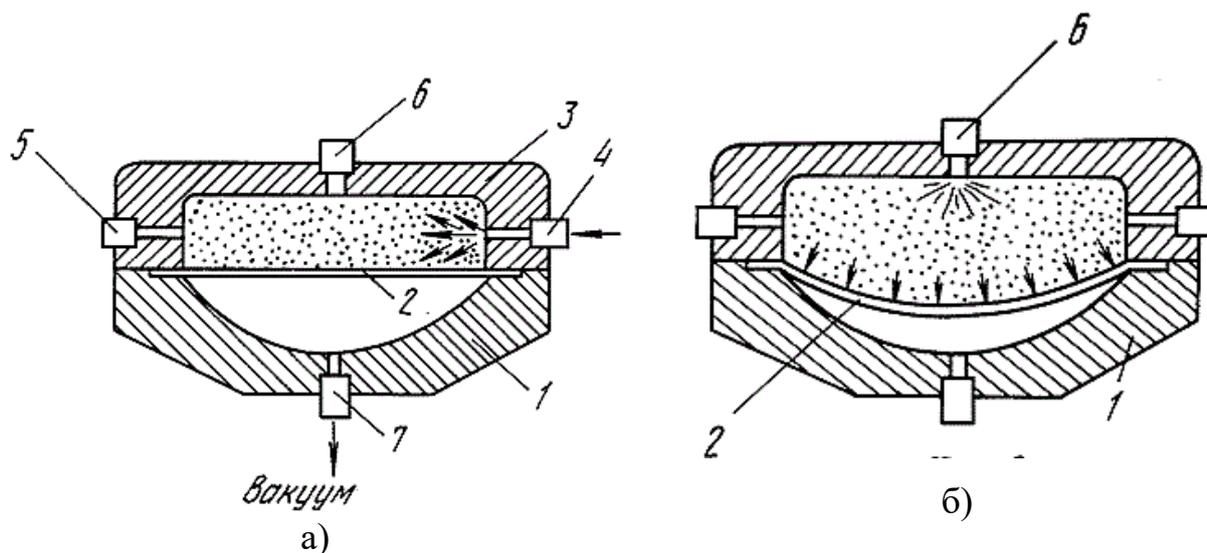
Затем по парциальному давлению водорода определялся диапазон допустимых значений общего давления водород-кислородной смеси:  $p_{\text{атм}} \cong P_{\text{см.}} \cong 13_{\text{ атм.}}$ . Для заготовки толщиной 1 мм выбрали общее давление смеси равным 12 атм.

Заполняли взрывную камеру водородом давлением до 4 атм. Контроль давления осуществляли с помощью манометра, установленного на взрывной камере. Подавали в камеру кислород, создав взрывчатую водород-кислородную смесь. Давление горючей смеси 12 атм., затем на свечу зажигания подавали импульс электрического напряжения. После детонации смеси заготовка, деформируясь, заполняла всю полость матрицы. Отсоединили взрывную камеру от матрицы и извлекли отштампованную заготовку.

Анализ рассмотренного способа показывает, что в данном случае процесс штамповки в значительной мере осуществляется не ударной волной, а давлением продуктов сгорания после воздействия ударной волны на заготовку. При этом под действием продуктов сгорания заготовка существенно нагревается, что повышает ее пластичность. Тем не менее, этот способ не обеспечивает штамповку деталей требующих большие степени вытяжки. Значительное увеличение степени вытяжки заготовки при газодетонационной вытяжке достигается многократным нагружением штампуемой заготовки. Это реализовано в способе газодетонационной штамповки [55], схема которого представлена на рисунке 1.9. По данному способу штамповка детали осуществляется следующим образом.

В матрицу 1 устанавливается листовая заготовка 2, затем взрывная камера 3 прижимается к матрице. Взрывная камера снабжена подводящей арматурой 4, выпускным вентилем 5 и элементом инициирования детонации газовой смеси 6. Затем из полости матрицы при помощи вакуумного вентиля 7 откачивается воздух. Через газовую арматуру 4 подается взрывчатая газовая смесь.

В качестве взрывчатой смеси используют водород-кислородную смесь, пропан-бутановую смесь с воздухом и т.д.



а) – наполнение взрывной камеры детонационной смесью;

б) – инициирование детонационной смеси с последующей вытяжкой заготовки.

1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – взрывная камера; 4 – газовая арматура;

5 – выпускной вентиль; 6 – элемент инициирования смеси (свеча зажигания); 7 – вакуумный вентиль.

Рисунок 1.9 – Этапы процесса газодетонационной штамповки:

Необходимое давление смеси определяют по формуле:

$$\frac{P_0 K \Delta t_3 c_3 m_3}{q_c \rho_c V_k} \quad (1.1)$$

где  $P_0$  – устанавливаемое начальное давление смеси;

$\Delta t_3$  – разница между температурой рекристаллизационного отжига для материала заготовки и температурой заготовки до момента воздействия;

$c_3$  – удельная теплоемкость материала заготовки;

$m_3$  – масса заготовки;

$q_c$  – калорийность взрывчатой газовой смеси;

$\rho_c$  – плотность взрывчатой газовой смеси;

$V_k$  – объем, занимаемый взрывчатой газовой смесью;

$K=3,2\pm 0,2$  – эмпирический коэффициент, отражающий отношение общего количества тепловой энергии, выделяемой при детонации смеси, к количеству тепловой энергии, идущей на нагрев заготовки.

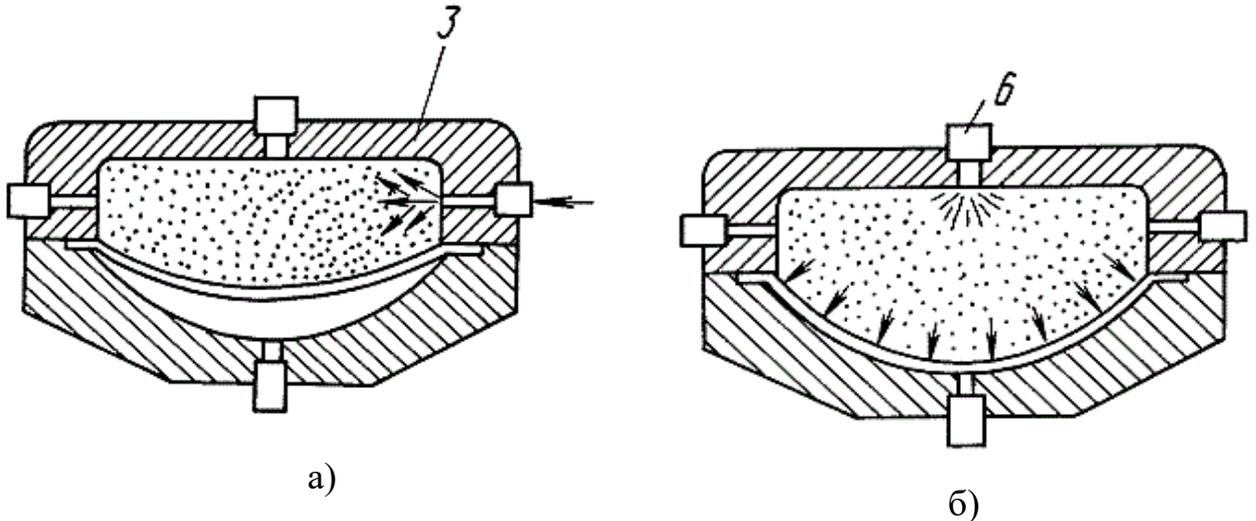
Для инициирования взрывной смеси на элемент 6 подается электрический импульс высокого напряжения. Затем, за счет воздействия ударной волны высокотемпературного газа заготовка частично деформируется в направлении матрицы.

За время деформации заготовка принимает упрочненное состояние, а затем за счет раскаленных продуктов сгорания заготовка нагревается до температуры рекристаллизационного отжига, тем самым происходит восстановление его пластичности. Через минуту, без разборки устройства полость камеры продувается сжатым воздухом при помощи газовой арматуры 4 и выпускного клапана 5.

Затем производится повторное наполнение взрывной камеры 4 смесью и ее инициирование для осуществления более глубокой вытяжки, без разрыва заготовки.

Состав и давление смеси выбирают таким, что бы теплота взрыва обеспечила нагрев заготовки до температуры рекристаллизационного отжига. Количество повторений может быть увеличено в зависимости от толщины заготовки (рисунок 1.10). В своей работе автор приводит пример газозрывной штамповки листа алюминиевого сплава АМГ-3 толщиной 2,6 мм, диаметром 1890 мм и глубиной 300 мм. Используется матрица с рабочей выемкой параболической формы диаметром 1800 мм, снабженной вентилем откачки воздуха и герметизирующей кольцевым уплотнителем на фланце. Так же используется взрывная камера цилиндрической формы диаметром 1800 мм и глубиной 600 мм. Камера снабжена газовыми вентилями и газовым манометром и свечей зажигания. Фланец так же снабжен кольцевым уплотнителем. При помощи болтов матрица закрепляется с камерой сгорания. С помощью вакуумного насоса откачивается воздух из полости матрицы до остаточного давления 1-10 мм рт.ст.

По справочнику определяется температура рекристаллизационного отжига, которая равна  $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t_3=380\text{ }^{\circ}\text{C}$ , удельная теплоемкость материала заготовки  $c_3=0,21\frac{\text{ккал}}{\text{кг}\cdot\text{град}}$ , а так же определяется масса заготовки  $m_3=18\text{ кг}$ .



а) – наполнение взрывной камеры детонационной смесью

б) – инициирование детонационной смеси.

3 – взрывная камера, 6 – элемент инициирования смеси (свеча зажигания)

Рисунок 1.10 – Этапы процесса повторной газодетонационной штамповки

По справочнику выбирают в качестве взрывчатой смеси стехиометрическую смесь водорода с кислородом  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ , а так же определяется калорийность гремучего газа  $q_c=3230\text{ ккал/кг}$ , и плотность смеси  $\rho_c=0,55\text{ кг/м}^3$ , затем вычисляются объем взрывной камеры  $V_k=1,52\text{ м}^3$ .

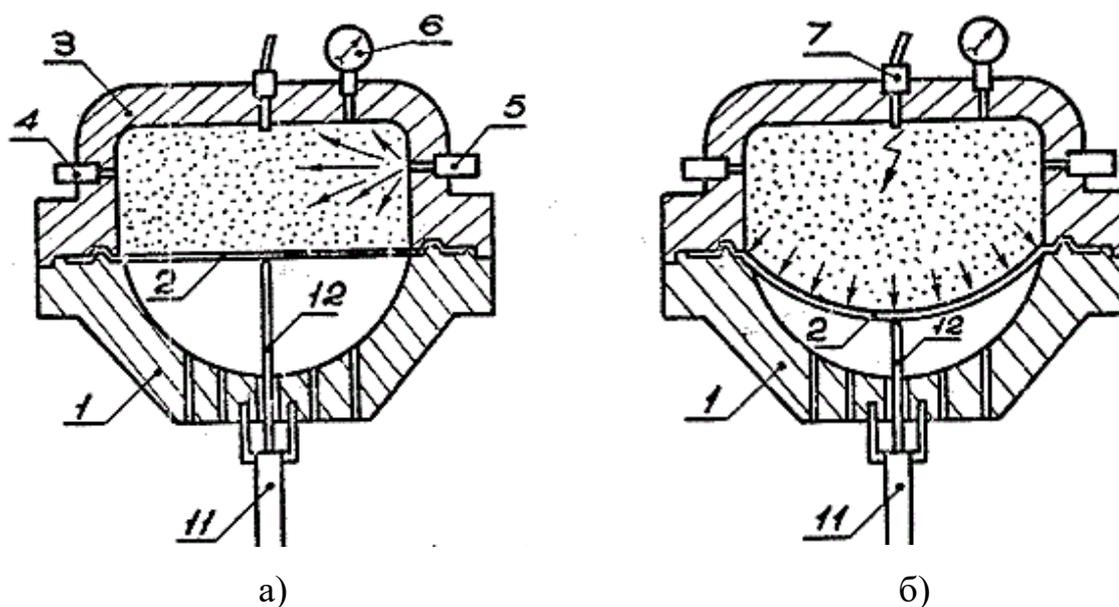
По формуле (1.1) высчитывается требуемое давление гремучего газа, выражая его в атмосферах,  $P_o=(1,7\pm 0,1)\text{ атм}$ .

Заполняется взрывная камера стехиометрической газовой смесью, состоящей из двух частей водорода и одной части кислорода, при избыточном давлении  $1,7\text{ атм}$ . Затем подается на свечу зажигания электрический импульс высокого напряжения. Происходит детонация газовой смеси во взрывной камере. Температура раскаленных газов составляет около  $3200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ударная волна деформирует заготовку на глубину  $220\text{ мм}$ . Происходит нагрев заготовки до  $\approx 360\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Выдерживают паузу в течение  $1\text{ мин}$ . Продувают камеру сжатым

воздухом. Вновь заполняют камеру водород-кислородной смесью и подрывают. Благодаря повторному подрыву смеси заготовка прогибается на глубину 300 мм и заполняет матрицу. Затем отсоединяют взрывную камеру от матрицы и извлекают отштампованную заготовку.

Анализ данного способа газа детонационной штамповки показывает, что он эффективен при штамповке крупногабаритных деталей диаметром более 500...600 мм. При малых размерах заготовки превалирует отвод тепла в стенки матрицы. Поэтому трудно обеспечить значительный нагрев заготовок. Контроль процесса деформирования заготовки при ее многократном нагружении можно осуществлять измерением прогиба в центральной части заготовки. Это реализовано в способе газодетонационной штамповки [56], осуществляемого устройством, схема которого представлена на рисунке 1.11.

В матрицу 1 устанавливают листовую заготовку 2. С помощью болтов матрица соединяется с взрывной камерой 3. С помощью вакуумного вентиля 4 откачивается воздух из полости матрицы. Затем определяют максимально допустимое начальное давление смеси. Взрывная камера 3 заполняется смесью при помощи газового вентиля 5 под этим давлением. Давление контролируется при помощи манометра 6. Шток 12 реостатного датчика 11 приводят в контакт с заготовкой 2. При помощи элемента инициирования заряда 7 горючая смесь взрывается. Затем при помощи вакуумного вентиля 4 продукты детонации из взрывной камеры 3 откачиваются. По заранее построенной зависимости  $P_{\max}(E)$  и величине деформации заготовки, полученной после первого подрыва, определяют величину максимального допустимого начального давления смеси для второго подрыва. Производят повторное наполнение взрывной камеры горючей смесью и топливная смесь взрывается, заготовка, деформируясь, заполняет всю полость матрицы. После этого при помощи вакуумного вентиля 4 продукты детонации из взрывной камеры 3 откачиваются. Отсоединяют камеру от матрицы и извлекают отштампованное изделие.



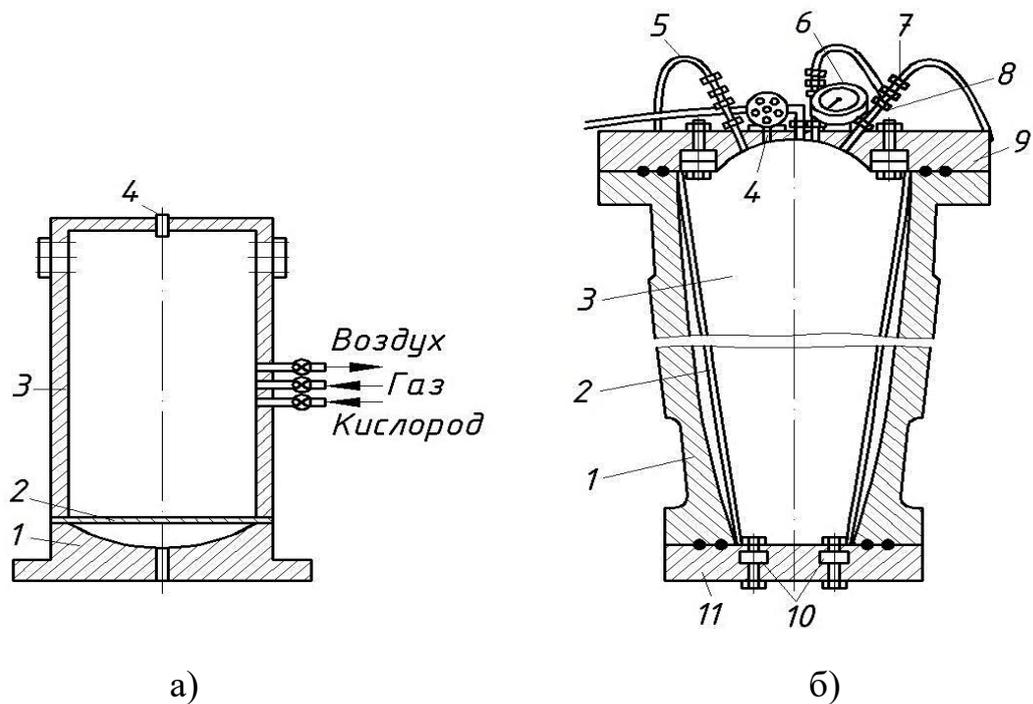
- а) – наполнение взрывной камеры детонационной смесью;  
 б) – момент инициирование детонационной смеси с последующей вытяжкой заготовки.

1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – взрывная камера; 4 – вакуумный вентиль; 5 – впускной вентиль; 6 – манометр; 7 – элемент инициирования смеси (свеча зажигания); 11 – реостатный датчик; 12 – шток

Рисунок 1.11 – Этапы процесса газозрывной штамповки

Анализ данного способа показывает, что он эффективен при штамповке изделий типа днищ. Для штамповки изделий сложной формы он мало приемлем.

**Штамповка продуктами сгорания газовых смесей.** В качестве энергоносителя используются смеси горючих газов пропан-бутана с воздухом или ацетилен-кислородная смесь. На рисунке 1.12 представлены схемы устройств для осуществления данного метода штамповки. В камеру сгорания 3 подаются компоненты энергоносителя.



а) – штамповка плоских деталей; б) – штамповка цилиндрических деталей.

1- матрица; 2 – заготовка; 3 – камера сгорания; 4 – запальное устройство; 5 – трубопровод для подачи инертного газа; 6 – манометр;

7 – трубопровод для подачи водорода; 8 – трубопровод для подачи кислорода; 9 – верхняя крышка; 10 – уплотнения; 11 – нижняя крышка

Рисунок 1.12 – Схемы штамповки продуктами сгорания газовых смесей

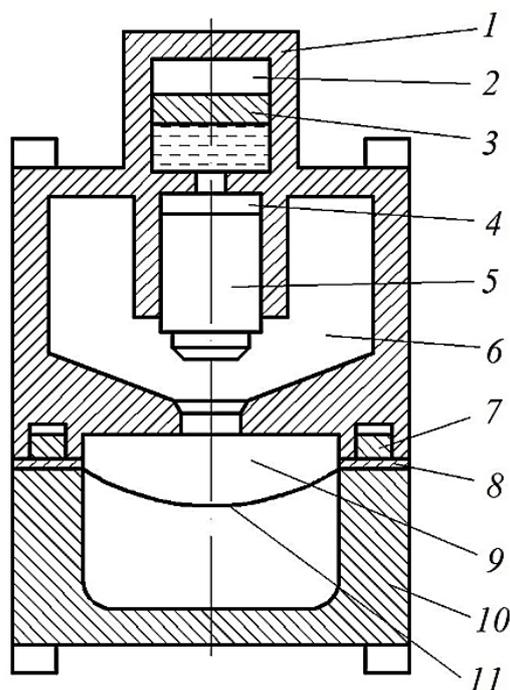
Образуемая при этом топливная смесь поджигается при помощи свечи 4. Процесс штамповки осуществляется под действием давления продуктов сгорания. Для обеспечения необходимого уровня давления продуктов сгорания необходимо подавать в камеру сгорания смесь с достаточно большим начальным давлением (порядка 1...2 МПа и более). При этом на заготовку воздействуют продукты сгорания смеси, имеющие высокую температуру (порядка 2000 °С). Скорость нагружения заготовки газовой средой, в зависимости от условий организации процесса, составляет 5...20 м/с. В виду кратковременности процесса заготовка не успевает нагреться и деформируется практически в холодном состоянии. Максимальное давление, оказываемое на заготовку, не превышает

20...25 МПа, что существенно ограничивает технологические возможности данного метода. В перечисленных способах листовой штамповки заготовка деформируется в холодном состоянии. По этой причине технологические возможности штамповки ограничены, так как заготовка в холодном состоянии малопластична.

Для увеличения пластичности заготовки необходимо повысить ее температуру до интервала температур теплой или горячей обработки. Совмещение нагрева заготовки с давлением позволит увеличить технологические возможности штамповки.

**Газоимпульсная штамповка.** Суть процесса заключается в том, что штамповка проводится под воздействием на поверхность заготовки давления высокотемпературного газа, поступающего из другой полости. На рисунке 1.13 показана принципиальная схема устройства для газоимпульсной штамповки. Устройство состоит из камеры сгорания 6 и рабочей камеры 9, сообщающиеся между собой с помощью запирающего устройства, которое состоит из перепускного клапана 5 и гидроаккумулятора 1. К корпусу камеры сгорания 6 присоединена матрица 10, на которую устанавливается штампуемая заготовка 11, кольцевым поршнем 7 и прижимом 8 осуществляется прижим фланцевой части заготовки. В исходном положении перепускной клапан 5 под действием давления воздуха в полости 2 закрыт, благодаря этому обеспечивается герметичность камеры сгорания 6. Для осуществления штамповки в полость камеры сгорания 6 заполняется горючим газ и сжатым воздухом, затем топливная смесь поджигается. При сгорании топливной смеси давление и температура в камере сгорания многократно и резко повышается.

При этом перепускной клапан 5 открывается, и продукты сгорания перетекают в рабочую камеру 9. Процесс штамповки протекает под действием давления газа на поверхность заготовки 1.



1 – гидроаккумулятор; 2,4 – воздушная и гидравлическая полости;  
3 – поршень; 5 – перепускной клапан; 6 – камера сгорания; 7 – кольцевой поршень; 8 – прижим; 9 – рабочая камера; 10 – матрица; 11 – заготовка

Рисунок 1.13 – Схема устройства для газоимпульсной штамповки

Результаты исследования показали, что заготовки нагреваются до 450...500°C [57]. Исходя из этого, можно заключить, что деформация заготовки большей частью протекает в условиях теплой обработки. Стоит отметить что, при использовании этого метода не обеспечивается нагрев всей поверхности заготовки до необходимого интервала температур.

**Пневмотермическая формовка.** При этом методе формоизменение детали осуществляется в процессе длительного воздействия горячего газа на поверхность листовой заготовки, которая заранее помещена в нагретую матрицу. Медленная деформация заготовки происходит под воздействием горячего газа и давления [36,37,58]. Температура газа при формовке деталей из алюминиевых сплавов достигает порядка 400...500 °С, что соответствует температурному интервалу горячей обработки. Схема технологической оснастки для осуществления данного

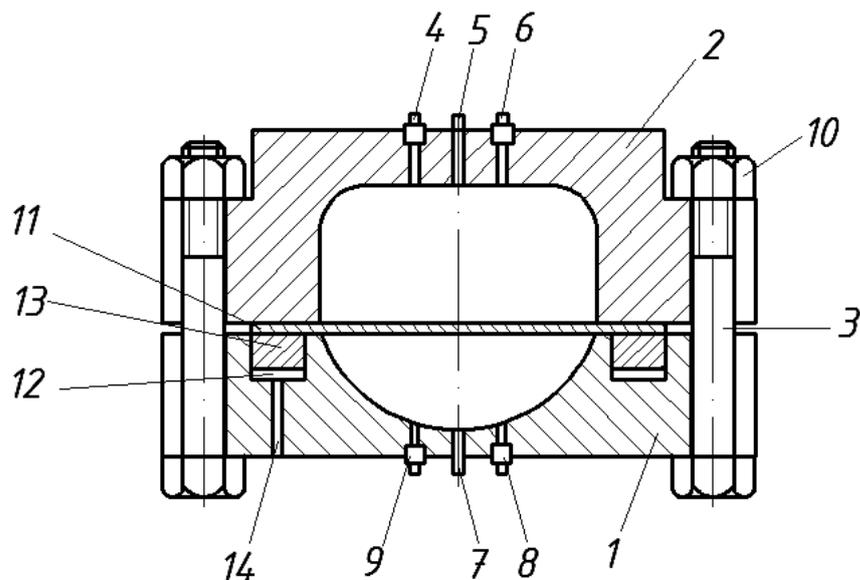


вставкой 15 выполнен зазор. Затем через штуцер 7 горячий газ подается в полость заготовки.

Преимуществом данного метода является то, что заготовка нагревается по всей площади, что позволяет получать детали сложной формы и проводить штамповку из труднодеформируемых сплавов. Недостатком является: высокий расход энергии, что существенно увеличивает себестоимость производимых изделий.

**Газовая штамповка с нагревом заготовки.** Газовая штамповка с нагревом заготовки осуществляется двумя методами: с двухсторонним и односторонним нагревом.

*Газовая штамповка с двухсторонним нагревом заготовки.* Суть данного метода заключается в том, что заготовка вначале нагревается до заданной температуры двухсторонним воздействием горячего газа, а затем подвергается деформированию. Схема устройства для газовой штамповки представлена на рисунке 1.15. Устройство содержит и матрицу 1 и камеру сгорания 2, стянутые между собой при помощи болтов 3. Камера сгорания 2 снабжена впускным клапаном 4, свечей зажигания 5, выпускным клапаном 6, а матрица снабжена свечей зажигания 7, впускным клапаном 8 и выпускным клапаном 9. Штампуемая заготовка 11 зажимается между торцом камеры сгорания 2 и кольцевым поршнем 13. Усилие зажима обеспечивается давлением жидкости, подаваемой в полость 12 через канал 14. Полости матрицы 1 и камера сгорания 2 через впускные клапаны наполняются топливной смесью, например природным горючим газом и сжатым воздухом. Затем топливная смесь при помощи свеч поджигается. В результате сгорания смеси давление и температура в полостях камеры сгорания и матрицы повышается в 7...8 раз. При этом под воздействием продуктов сгорания, температура которых достигает 2000...2300 °С, заготовка интенсивно нагревается. При достижении температуры заготовки определенной величины открывается выпускной клапан 8, и начинается выпуск продуктов сгорания из полости матрицы. Давление в полости матрицы снижается.



- 1 – матрица; 2 – камера сгорания; 3 – болт; 4,8 – впускные клапаны;  
 5,7 – свечи зажигания; 6,9 – выпускные клапаны; 10 – гайка;  
 11 – заготовка; 12 – полость; 13 – кольцевой поршень; 14 – канал

Рисунок 1.15 – Схема устройства для газовой штамповки

Под действием разности давлений между камерой сгорания и матрицей заготовка деформируется в направлении матрицы и заполняет ее полость – осуществляется процесс штамповки.

Данный метод штамповки позволяет осуществлять листовую штамповку в режиме теплой или горячей обработки. Это существенно облегчает штамповку деталей сложной конфигурации. Некоторые типы деталей, получаемые традиционными методами листовой штамповки за несколько технологических переходов, могут быть получены за один технологический переход, что значительно снижает себестоимость их изготовления.

Однако этот метод не приемлем для штамповки невысоких деталей, имеющих полости. Это связано с тем, что для таких деталей полость матрицы имеет небольшую высоту. В такой матрице трудно организовать процесс горения топливной смеси и обеспечить равномерное давление на поверхности заготовки. Кроме того, горение топливной смеси в полости матрицы существенно снижает долговечность матрицы, что обуславливает повышение себестоимости

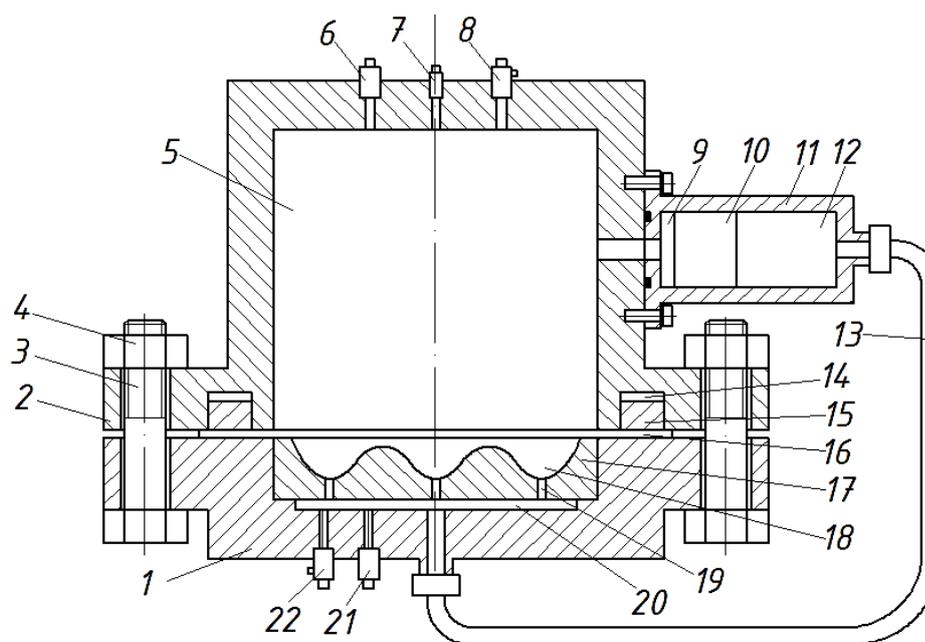
штампующих деталей. Нагрев матрицы также может вызвать искажение размеров матрицы, что ухудшит качество получаемых деталей, особенно при штамповке тонкостенных деталей сложной формы.

*Газовая штамповка с односторонним нагревом заготовки.* В этом методе нагрев заготовки производится воздействием на ее поверхность высокотемпературного газа. При этом для предотвращения деформации заготовки на ее противоположной стороне, т.е. со стороны матрицы, создается противодействие также воздействием газа. Таким образом, с обеих сторон заготовки создается примерно одинаковое давление. Температура газа, находящегося в матрице и создающего противодействие, не лимитируется, т.е. она может быть равна или значительно меньше температуры газа, находящегося в камере сгорания. Данный метод наиболее эффективен для формовки тонкостенных деталей, имеющих неглубокие полости.

Схема устройства для осуществления газовой формовки с противодействием представлена на рисунке 1.16. Устройство содержит матрицедержатель 1 и корпус 2 с камерой сгорания 5, стянутые между собой при помощи болтов 3 и гаек 4. Камера сгорания 5 снабжена впускным клапаном 6, свечей зажигания 7 и выпускным клапаном 8. К корпусу 2 при помощи винтов закреплен цилиндр 11 с поршнем 10. Полость 9 цилиндра 11 сообщена с камерой сгорания 5, а полость 12 трубопроводом 13 соединена с полостью 18 матрицы 17.

Работа устройства осуществляется следующим образом. В полость 18 матрицы 17 через клапан 21 подается сжатый воздух, который через трубопровод 13 поступает и в полость 12 цилиндра 11. Одновременно через клапан 6 в камеру сгорания 5 подаются компоненты топливной смеси: горючий газ и сжатый воздух. Давление топливной смеси в камере сгорания 5 устанавливается равным давлению воздуха в полости 18. Топливная смесь при помощи свечи 7 поджигается. В процессе горения топливной смеси давление в камере сгорания 5 повышается. Это давление передается и в полость 9 цилиндра 11. При этом под действием давления газа поршень 10 перемещается, вытесняя воздух из полости

12 в полость 18 матрицы 17. Благодаря этому давление в полости 18 увеличивается. При определенном сочетании конструктивных параметров устройства обеспечивается равенство давлений в камере сгорания и полости 18 к концу процесса сгорания топливной смеси. Это ограничивает деформацию заготовки 16 и предотвращает контакт её с поверхностью матрицы 17. После окончания процесса сгорания топливной смеси заготовка 16 еще некоторое время остается под воздействием продуктов сгорания и интенсивно нагревается. При достижении ее температуры заданного интервала температур открывается клапан 22, и воздух из полостей 18 и 20 выпускается. Давление в полости 18 падает. При этом под действием давления продуктов сгорания заготовка 16 деформируется и принимает форму матрицы 17 – осуществляется процесс формовки [59].



- 1 – матрицедержатель; 2 – корпус; 3 – болт; 4 – гайка; 5 – камера сгорания;  
 6,21 – впускные клапаны; 7 – свеча зажигания; 8,22 – выпускные клапаны;  
 9,12,20 – полости; 10 – поршень; 11 – цилиндр; 13 – трубопровод;  
 14 – кольцевая полость; 15 – кольцевой поршень; 16 – заготовка;  
 17 – матрица; 18 – полость матрицы; 19 – канал

Рисунок – 1.16 Схема устройства для газовой формовки с  
 противодавлением

Методы газовой штамповки с двухсторонним и односторонним нагревом заготовки обеспечивают управляемый нагрев заготовки до интервала температур теплой и горячей обработки. Это дает возможность штамповать детали сложной формы за одну технологическую операцию, что существенно снижает себестоимость их производства. В процессе нагрева заготовки газ остывает, поэтому давление газа, действующее на поверхность заготовки в конечной стадии процесса штамповки, имеет сравнительно небольшую величину. Поэтому эти методы эффективны для штамповки крупногабаритных тонкостенных деталей.

Проведенный выше анализ показывает, что в существующих методах газовой штамповки используется сравнительно простая штамповая оснастка, которая позволяет значительно снизить себестоимость штампованных изделий. Рассмотренные выше устройства для газовой штамповки отличаются компактностью, малой металлоемкостью, что обеспечивает невысокую их стоимость. Они достаточно безопасны в эксплуатации и могут применяться непосредственно в условиях производственных цехов. Несмотря на эти достоинства, газовая штамповка не получила широкого распространение в промышленном производстве. В значительной степени это связано с тем, что давление, развиваемое на поверхности штампуемой заготовки, чаще всего не превышает  $20...25 \text{ МПа}$ , что может обеспечить штамповку лишь тонкостенных деталей. В устройствах газодетонационной штамповки давление ударной волны может быть значительно выше, но время его действия мало, и это ограничивает технологические возможности газодетонационной штамповки. В устройствах газовой штамповки процесс штамповки чаще всего производится практически в холодном состоянии заготовки. Для осуществления процесса штамповки с нагревом заготовки предложены ряд способов газодетонационной штамповки. Однако они эффективны для штамповки лишь крупногабаритных изделий и мало приемлемы для получения изделий диаметром менее  $500 \text{ мм}$ . Методы газовой штамповки с двухсторонним и односторонним нагревом заготовки обеспечивают контролируемый нагрев заготовки до интервала температур теплой и горячей

обработки, что дает возможность штамповать детали сложной формы за одну технологическую операцию. Однако они эффективны для штамповки только тонкостенных деталей диаметром более 300...350 мм и мало приемлемы для штамповки деталей диаметром менее 250 мм.

## 1.2. Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является расширение технологических возможностей газовой штамповки путем разработки устройства газовой штамповки, обеспечивающего повышение давления и температуры газа, действующего на поверхность обрабатываемой заготовки.

Для выполнения поставленной цели были сформулированы основные задачи:

- выполнить анализ путей расширения технологических возможностей газовой штамповки и конструктивных решений для их реализации;
- выполнить разработку конструктивной схемы устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления;
- провести теоретическое исследование рабочего процесса газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления и оптимизацию его работы;
- выполнить разработку и создание экспериментального устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления;
- выполнить разработку технологии производства штамповки сферообразных днищ на устройстве газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления;
- провести экспериментальные исследования рабочего процесса устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления;
- выполнить практическую апробацию устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления и оценку его технологических возможностей.

## 2. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ УСТРОЙСТВ ГАЗОВОЙ ШТАМПОВКИ С МУЛЬТИПЛИКАЦИЕЙ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

### 2.1. Схема устройства газовой штамповки с форкамерно-факельным зажиганием

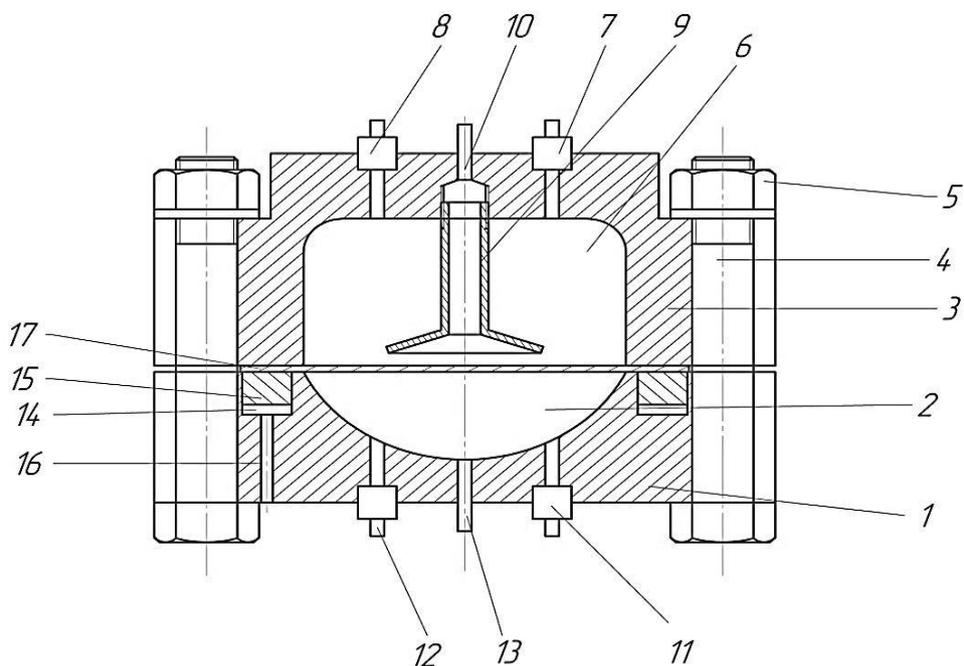
В известных устройствах после окончания процесса сгорания топливной смеси температура продуктов сгорания по всему объему камеры сгорания примерно одинаковая. Поэтому тепловые потоки от продуктов сгорания во всех направлениях практически одинаковые. Из-за этого большая часть тепловой энергии продуктов сгорания расходуется не на нагрев штампуемой заготовки, а на нагрев стенок камеры сгорания. Поэтому энергии продуктов сгорания хватает на нагрев заготовок сравнительно небольшой толщины. Это ограничивает технологические возможности устройств газовой штамповки. Расширение технологических возможностей устройств газовой штамповки может быть достигнуто перераспределением температуры в камере сгорания, то есть увеличением температуры газа вблизи поверхности штампуемой заготовки по сравнению со средней температурой в камере сгорания. Это может быть обеспечено применением форкамерно-факельного зажигания топливной смеси. Данное техническое решение реализовано в устройстве газовой штамповки, схема которого представлена на рисунке 2.1. Отличительной особенностью этого устройства является то, что оно содержит расположенную внутри камеры сгорания и соединенную с ней форкамеру, снабженную средством зажигания газовой смеси, при этом отверстие, соединяющее форкамеру с камерой сгорания, расположено со стороны матрицы. Кроме того, форкамера выполнена в форме гриба, причем головка гриба обращена к матрице [60].

Устройство содержит матрицу 1 с внутренней полостью 2 и корпус 3, соединенные между собой болтами 4 и гайками 5. В корпусе 3 соосно матрице 1 размещена камера сгорания 6, снабженная впускным клапаном 7 и выпускным клапаном 8. В осевой зоне камеры сгорания 6 расположена форкамера 9,

снабженная свечей зажигания 10. Форкамера 9 выполнена в форме гриба, т.е. имеет цилиндрическую часть малого диаметра и головку значительно большего диаметра, достигающего до 0,5...0,6 диаметра камеры сгорания. Выходное отверстие форкамеры 9, соединяющее ее полость с камерой сгорания 6, расположено со стороны матрицы 1. Объем полости форкамеры 9 не превышает 10% объема камеры сгорания 6. Матрица 1 снабжена впускным клапаном 11, выпускным клапаном 12 и свечей зажигания 13. В верхней части матрицы 1 выполнена кольцевая полость 14, в которой установлен кольцевой поршень 15. В матрице 1 выполнен так же канал 16 для подачи рабочей среды в кольцевую полость 14. Штампуемая заготовка 17 располагается между кольцевым поршнем 15 и корпусом 3.

Работа устройства осуществляется следующим образом. Через канал 16 в кольцевую полость 1 подается под давлением жидкость или сжатый воздух. При этом кольцевой поршень 15 производит зажим фланцевой части штампуемой заготовки, что обеспечивает герметичность полости 2 и камеры сгорания 6. После этого через впускные клапаны 7 и 11 в камеру сгорания 6 и полость 2 матрицы 1 подается горючий газ, например природный газ, а затем подается сжатый воздух. В результате этого в полости 2, в камере сгорания 6 и форкамере 9 образуется топливная смесь. При этом с обеих сторон заготовки 17 устанавливается одинаковое давление топливной смеси, поэтому заготовка в этот период не деформируется. При помощи свеч 10 и 13 топливные смеси в форкамере 9 и полости 2 матрицы 1 зажигаются. В форкамере 9 фронт пламени, непрерывно ускоряясь, перемещается в направлении к штампуемой заготовке 17. После достижения фронта пламени заготовки 17 пламя с высокой скоростью выбрасывается в камеру сгорания 6 через зазор между заготовкой 17 и форкамерой 9. Это обеспечивает интенсивные сгорания топливной смеси в камере сгорания 6. В результате сгорания топливных смесей температура и давление в полости 2 матрицы 1 и камере сгорания 6 многократно увеличиваются. При этом в обеих полостях устанавливается примерно одинаковое давление, но

температура газа вблизи поверхности заготовки 17 со стороны камеры сгорания 6 выше, чем со стороны матрицы 1 за счет неравномерного распределения температуры в камере сгорания 6.



1 – матрица; 2 – внутренняя полость; 3 – корпус; 4 – болты; 5 – гайки;  
6 – камера сгорания; 7, 11 – впускные клапаны; 8, 12 – выпускные клапаны;  
9 – форкамера; 10, 13 – свечи зажигания; 14 – кольцевая полость;  
15 – кольцевой поршень; 16 – канал; 17 – заготовка

Рисунок 2.1 – Схема устройства газовой штамповки с форкамерно-факельным зажиганием

Под воздействием высокотемпературного газа заготовки 17 интенсивно нагревается до достижения интервала температур горячей обработки (например: для стальной заготовки до 800...1000 °С). Затем открывается выпускной клапан 12 и продукты сгорания выпускаются из полости 2 матрицы 1. Давление в полости 2 падает. При этом под действием давления газа, находящегося в камере сгорания 6, заготовка 17 деформируется и заполняет полость 2 матрицы 1. После осуществления процесса штамповки, отвинтив гайки 5, корпус 3 отсоединяется от матрицы 1, и отштампованная деталь извлекается из матрицы 1. Затем на поверхность кольцевого поршня 15 устанавливается новая заготовка, и корпус 3

присоединяется к матрице 1. Далее рабочий цикл устройства повторяется в той же последовательности.

Оценим температуру продуктов сгорания. В полости матрицы процесс сгорания топливной смеси происходит при постоянном объёме. При этом вся теплота процесса сгорания идет на повышение внутренней энергии газа [61]. Тогда уравнение теплового баланса в расчете на 1 *кмоль* топливной смеси можно записать в следующем виде

$$\xi_z H_c = \mu c_{v_z} t_z - c_{v_c} t_c \quad (2.1)$$

где  $t_c$  – температура топливной смеси, °C;

$t_z$  – температура продуктов сгорания, °C;

$c_{v_c}, c_{v_z}$  – средние молярные теплоемкости при постоянном объеме топливной смеси и продуктов сгорания соответственно, *кДж/(кмоль\*К)*;

$H_c$  – теплота сгорания 1 *кмоль* топливной смеси;

$\xi_z$  – коэффициент использования теплоты;

$\mu$  – коэффициент молекулярного изменения топливной смеси.

Из уравнения (1) получим

$$t_z = \frac{c_{v_c} t_c + \xi_z H_c}{\mu c_{v_z}} \quad (2.2)$$

Пусть температура топливной смеси составляет 20 °C. В качестве горючего газа примем природный газ. Тогда  $H_c=76200$  *кДж/кмоль*; [62] .

$c_{v_z}=29$  *кДж/(кмоль\*К)*;  $c_{v_c}=20,8$  *кДж/(кмоль\*К)*;  $\mu=1,04$ ;  $\xi_z=0,8$ .

Подставляя эти значения в зависимость (2.2), получим  $t_z=2031$  °C.

Степень повышения давления в после сгорания топливной смеси определяется следующей зависимостью

$$\lambda = \frac{P_z}{P_c} = \mu \frac{T_z}{T_c} = \mu \frac{t_z+273}{t_c+273} \quad (2.3)$$

где  $P_c, P_z$  – давление топливной смеси и продуктов сгорания соответственно, *Па*;

$T_c, T_z$  – абсолютные температуры топливной смеси и продуктов сгорания, *К*.

Подставляя значения  $t_c$  и  $t_z$ , получим  $\lambda = 8,2$ , т.е. в результате сгорания топливной смеси давление повышается в 8,2 раз.

Рассмотрим теперь процесс сгорания в камере сгорания и форкамере. В процессе горения топливной смеси общий объем камеры сгорания и форкамеры не изменяется. Поэтому к концу процесса сгорания степень повышения давления  $\lambda$  в камере сгорания будет примерно такая же, как в матрице, т.е.  $\lambda_k \approx 8,2$ . При этом температура по объему камеры сгорания распределена неравномерно. Так как объем форкамеры сравнительно мал, и форкамера сообщена с камерой сгорания, то в процессе горения топливной смеси в форкамере давление изменяется незначительно. В связи с этим можно сделать вывод, что процесс горения в форкамере совершается при постоянном давлении. Тогда уравнение теплового баланса определяется по формуле:

$$\xi_z H_c = \mu c_{p_z} t'_z - c_{p_c} t_c \quad (2.4)$$

где  $c_{p_c}$ ,  $c_{p_z}$ , – средние молярные теплоемкости при постоянном давлении топливной смеси и продуктов сгорания,  $\text{кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{K})$ ;  
 $t'_z$  – температура продуктов сгорания в форкамере,  $^{\circ}\text{C}$ .

Отсюда получим

$$t'_z = \frac{\xi_z H_c + c_{p_c} t_c}{\mu c_{p_z}} \quad (2.5)$$

Теплоемкости при постоянном объеме и постоянном давлении связаны следующим уравнением [61].

$$c_p = c_v + R_\mu \quad (2.6)$$

где  $R_\mu$  – универсальная газовая постоянная;  $R_\mu = 8,314 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{K})$ .

Тогда

$$c_{p_c} = 20,8 + 8,314 = 29,114 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{K});$$

$$c_{p_z} = 29 + 8,314 = 37,314 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{K}).$$

Подставляя эти значения в зависимость (2.5), получим  $t'_z = 1630 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, температура продуктов сгорания в форкамере составляет  $1630 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Такая же температура будет вблизи поверхности штампуемой заготовки в момент

перехода пламени из форкамеры в камеру сгорания. В процессе горения топливной смеси в камере сгорания давление интенсивно повышается и к концу процесса достигает  $P_z$ . При этом происходит адиабатическое сжатие продуктов сгорания, находящихся вблизи штампуемой заготовки и в форкамере. Для адиабатического процесса давление и температура связаны следующим уравнением [61]

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (2.7)$$

где  $k$ —показатель адиабаты.

Применительно к газу, находящемуся вблизи поверхности заготовки и форкамере, это уравнение можно записать в следующем виде

$$\frac{T_z''}{T_z'} = \left(\frac{P_z}{P_c}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \lambda^{\frac{k-1}{k}} \quad (2.8)$$

где  $T_z'$  и  $T_z''$  – абсолютные температуры газа вблизи поверхности заготовки в начале и в конце процесса горения в камере сгорания.

Отсюда, учитывая, что  $T_z' = t_z' + 273$ ,  $T_z'' = t_z'' + 273$ , получим

$$t_z'' = (t_z' + 273)\lambda^{\frac{k-1}{k}} - 273 \quad (2.9)$$

Показатель адиабаты продуктов сгорания

$$k = \frac{c_{p_z}}{c_{v_z}} = \frac{37.323}{29} = 1,29 \quad (2.10)$$

Подставляя значения  $\lambda$  и  $k$  в зависимость (2.9), получим  $t_z''=2787$  °C, т.е. температура газа вблизи поверхности заготовки составляет **2787** °C. Это значительно выше температуры газа в полости матрицы. Следует отметить, что температура в верхней части камеры сгорания значительно меньше, чем на поверхности заготовки [63].

Таким образом, предложенное техническое решение обеспечивает увеличение температуры газа вблизи поверхности штампуемой заготовки на 700...800 °C. Это, существенно повышая тепловой поток от газа к заготовке, дает возможность осуществить нагрев до температуры горячей обработки заготовок

значительно большей толщины, что существенно расширяет технологические возможности устройства для штамповки.

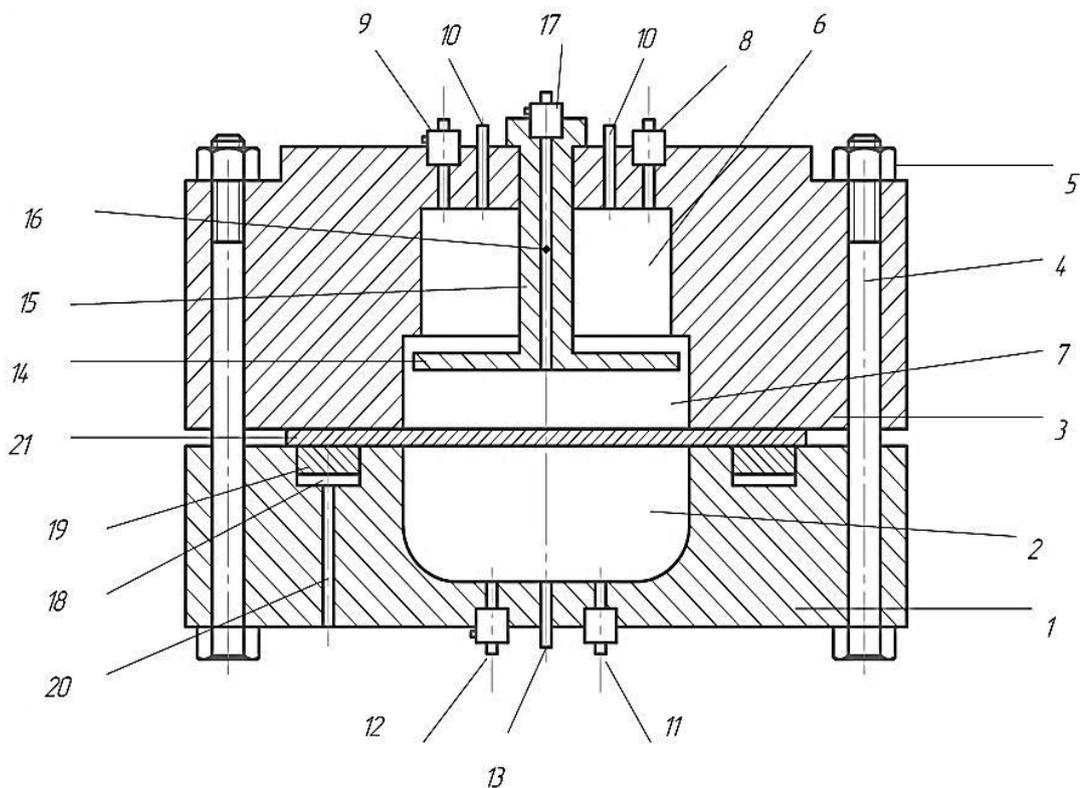
## **2.2. Схема устройства газовой штамповки со ступенчатой камерой сгорания**

Другим путем расширения технологических возможностей газовой штамповки является увеличение давления и температуры продуктов сгорания, действующих на поверхность обрабатываемой заготовки. Давление продуктов сгорания может быть увеличено повышением давления топливной смеси. В известных устройствах газовой штамповки давление топливной смеси достигает 0,8...1,0 МПа. Дальнейшее его увеличение нецелесообразно, так как при этом существенно усложняется герметизация полостей матрицы и камеры сгорания. Поэтому необходим поиск новых технических решений.

Еще одним методом повышения давления газа вблизи поверхности штампуемой заготовки является перераспределение давления газа в камере сгорания, разделив ее на две полости. Это реализовано в устройстве газовой штамповки, схема которого показана на рисунке 2.2.

Устройство содержит матрицу 1 с внутренней полостью 2 и корпус 3, соединенные между собой болтами 4 и гайками 5. В корпусе 3 соосно матрице 1 размещена двухступенчатая камера сгорания, первая полость 6 которой имеет меньший диаметр, а вторая полость 7 имеет больший диаметр. В корпусе 3 со стороны первой полости 6 камеры сгорания установлены впускной 8, выпускной клапан 9 и свечи зажигания 10. Матрица 1 снабжена впускным клапаном 11, выпускным клапаном 12 и свечей зажигания 13. Во второй полости камеры сгорания, т.е. в полости 7, установлен диск 14, закрепленный на торце подвижного штока 15. Противоположный торец штока расположен вне камеры сгорания. Диаметр диска 14 превышает диаметр первой полости камеры сгорания. В диске 14 и штоке 15 имеется сквозной канал 16, на конце которого вмонтирован выпускной клапан 17. Кольцевой поршень 19 установлен в проточенную кольцевую полость 18 матрицы 1. Для подвода в полость 18 рабочей жидкости

имеется канал 20. Штампуемая заготовка 21 располагается между кольцевым поршнем 19 и корпусом 3.



- 1 – матрица; 2 – внутренняя полость; 3 – корпус; 4 – болты; 5 – гайки;  
 6 – первая полость камеры сгорания; 7 – вторая полость камеры сгорания;  
 8, 11 – впускные клапаны; 9, 12, 17 – выпускные клапаны;  
 10, 13 – свечи зажигания; 14 – диск; 15 – шток; 16 – сквозной канал;  
 18 – кольцевая полость; 19 – кольцевой поршень; 20 – канал для подвода  
 жидкости; 21 – заготовка

Рисунок 2.2 – Схема устройства газовой штамповки со ступенчатой камерой сгорания

Работа устройства выполняется следующим образом. Через канал 20 в кольцевую полость 18 подводится под давлением жидкость. При этом кольцевой поршень 19 производит фланцевый зажим заготовки 21, благодаря чему обеспечивается герметичность полости 2 матрицы 1 и полостей 6 и 7 камеры сгорания. После этого через впускные клапаны 8 и 11 в полости 6 и 7 камеры сгорания и полость 2 матрицы 1 подается горючий газ, например природный газ, а

затем подается сжатый воздух. Затем при помощи свечи 10 и 13 топливные смеси поджигаются. При сгорании топливной смеси в полости 2 матрицы 1 давление увеличивается в 7...8 раз. Одновременно с этим горение происходит и в полости 6 камеры сгорания. При этом по мере перемещения фронта пламени в направлении диска 14, часть топливной смеси вытесняется из полости 6 в полость 7. В результате этого к моменту достижения фронта пламени полости 7 давление топливной смеси в ней увеличивается в 2,5 ... 3 раза. При сгорании этой смеси происходит резкое увеличение давления в полости 7, и под действием этого давления диск 14 со штоком 15 перемещается вверх и перекрывает полость 6, предотвращая утечку газа из второй полости камеры сгорания 7 в первую полость 6. После горения топливной смеси давление в полости 7 увеличивается в 6...7 раз. Таким образом, благодаря предварительному сжатию топливной смеси и ее сгоранию давление в полости 7 увеличивается в 15...20 раз. Поэтому давление в полости 7 становится в 2,5...3 раза выше давления продуктов сгорания в полости 2 матрицы 1. Под действием разности давлений заготовка 21 деформируется в направлении матрицы 1 (рисунок 2.3). При этом давление в полости 7 снижается, а в полости 2 повышается. Вследствие этого деформация заготовки 21 прекращается.

Одновременно с этим происходит интенсивный нагрев заготовки 21 под воздействием продуктов сгорания топливной смеси, находящихся в полостях 2 матрицы и второй полости камеры сгорания 7. При нагревании заготовки 21 до заданной величины открывается выпускной клапан 12, и продукты сгорания выпускаются из полости 2 матрицы 1. При этом под действием давления продуктов сгорания топливной смеси, находящихся в полости 7, заготовка 21 деформируется и, заполняет внутреннюю полость матрицы 2. Затем открываются выпускные клапаны 9 и 17, и продукты сгорания топливной смеси выпускаются из полостей 6 и 7 камеры сгорания. После этого диск 14 со штоком 15 под действием сил тяжести опускается в исходное положение. Затем, отвинтив гайки 5, корпус 3 отсоединяется от матрицы 1, и отштампованная деталь извлекается из

полости матрицы 1. После этого на поверхность кольцевого поршня 19 устанавливается новая заготовка, и корпус 3 присоединяется к матрице 1. Далее рабочий цикл устройства повторяется в той же последовательности.[64]

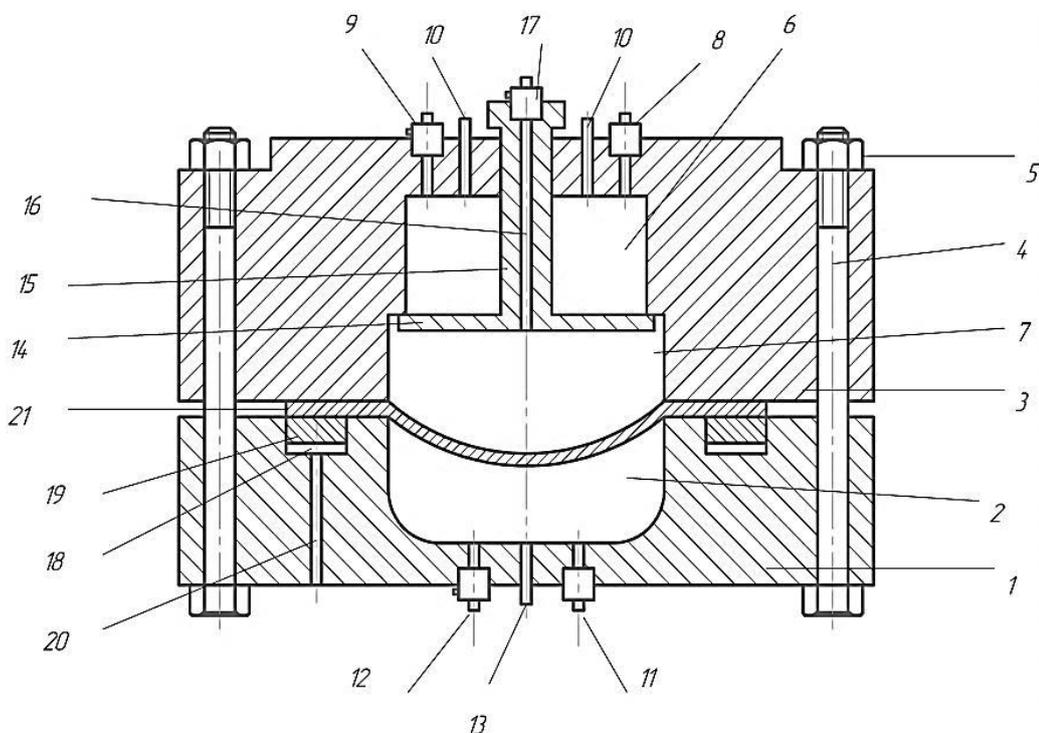
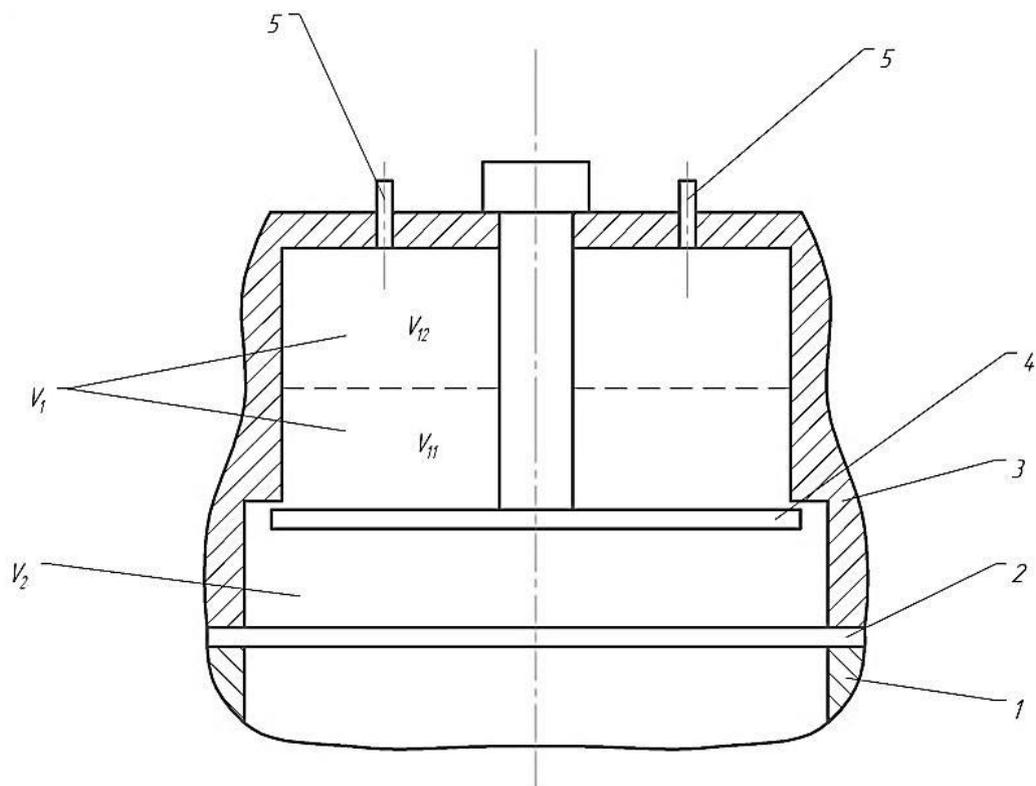


Рисунок 2.3 – Схема устройства для газовой листовой штамповки в момент окончания процесса сгорания

Для определения оптимальных соотношений объемов полостей камеры сгорания, рассмотрим процесс горения топливной смеси в первой полости. Расчетная схема процесса представлена на рисунке 2.4.

При зажигании топливной смеси при помощи четырех свеч, расположенных равномерно на торце камеры сгорания, на некотором расстоянии от торца камеры сгорания фронт пламени будет близким к плоскости. Поэтому будем считать фронт пламени плоским. В процессе перемещения фронта пламени давление в обеих полостях камеры сгорания монотонно увеличивается. При этом часть топливной смеси из первой полости камеры сгорания вытесняется во вторую полость.



1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – корпус; 4 – диск; 5 – свеча зажигания

Рисунок 2.4 – Расчетная схема процесса горения топливной смеси в полости камеры сгорания

Пусть часть смеси, вытесненная во вторую полость, первоначально занимало объем  $V_{11}$ , а сгоревшая часть смеси –  $V_{12}$ . При этом  $V_{11} + V_{12} = V_1$ , где  $V_1$  – объем первой полости.

Будем условно считать, что в процессе горения объем  $V_{12}$  не изменяется, то есть сгорание топливной смеси происходит при неизменном объеме, после чего, продукты сгорания топливной адиабатически расширяются и вытесняют топливную смесь объемом  $V_{11}$  во вторую полость. Тогда давление в объеме в  $V_{12}$  в конце процесса сгорания можно определить следующей зависимостью.

$$P_{12} = P_c \lambda \quad (2.11)$$

где  $P_c$  – давление топливной смеси, Па;

$\lambda$  – степень повышения давления при сгорании в постоянном объеме, для газоздушных смесей  $\lambda=7\dots 8$  [65].

Для процесса адиабатического расширения продуктов сгорания от объема  $V_{12}$  до  $V_1$ , можно записать

$$P_{12}V_{12}^k = P_1V_1^k \quad (2.12)$$

где  $k$  – показатель адиабаты продуктов сгорания;

$P_1$  – давление в момент окончания процесса горения в первой полости,  
 $Па$ .

Обозначим соотношение объемов

$$\beta = V_{11}/V_1 \quad (2.13)$$

Тогда, учитывая, что  $V_{11} + V_{12} = V_1$ , получим

$$V_{12} = (1 - \beta)V_1 \quad (2.14)$$

Из уравнений (2.11) – (2.14) после соответствующих преобразований получим зависимость для определения степени повышения давления к концу процесса горения в первой полости камеры сгорания

$$\frac{P_1}{P_c} = \lambda(1 - \beta)^k \quad (2.15)$$

Вытеснение топливной смеси объема  $V_{11}$  приводит к повышению давления топливной смеси во второй полости камеры сгорания от  $P_c$  до  $P_2$ . При этом объем топливной смеси уменьшается от  $V_{11} + V_2$  до  $V_2$ . Этот процесс также будем считать адиабатическим в виду его кратковременности. Тогда можно записать

$$P_c(V_{11} + V_2)^{k_c} = P_2V_2^{k_c} \quad (2.16)$$

где  $k_c$  – показатель адиабаты топливной смеси;

$V_2$  – объем второй полости камеры сгорания,  $м^3$ .

Отсюда получим

$$\frac{P_2}{P_c} = \left(\frac{V_{11}}{V_2} + 1\right)^{k_c} \quad (2.17)$$

Исходя из зависимости (2.13),  $V_{11} = \beta V_1$ . Тогда

$$\frac{P_2}{P_c} = \left(\beta \frac{V_1}{V_2} + 1\right)^{k_c} \quad (2.18)$$

В процессе горения топливной смеси в первой полости перепад давлений между первой и второй полостями невелик, поэтому можно считать  $P_2 = P_1$ . Тогда из уравнений (2.15) и (2.18) получим

$$\lambda(1-\beta)^k = \left(\beta \frac{V_1}{V_2} + 1\right)^{k_c} \quad (2.19)$$

Отсюда получим выражение для определения объемов полостей камеры сгорания

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{\beta} \left[ \lambda^{\frac{1}{k_c}} (1-\beta)^{\frac{k}{k_c}} - 1 \right] \quad (2.20)$$

Обозначим степень повышения давления топливной смеси к концу процесса горения в первой полости

$$\lambda_c = \frac{P_2}{P_c} = \frac{P_1}{P_c} \quad (2.21)$$

Определим  $\beta$  из уравнения (2.15) с учетом зависимости (2.21)

$$\beta = 1 - \left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (2.22)$$

С учетом этого выражения зависимость (2.20) после соответствующих преобразований примет следующий вид

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\lambda^{\frac{1}{k_c}} - 1}{1 - \left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^{\frac{1}{k}}} \quad (2.23)$$

На рисунке 2.5. представлен график зависимости  $V_1/V_2$  от  $\lambda_c$ , построенный по зависимости (2.23). При этом принято  $\lambda = 7$ ;  $k = 1,28$ ;  $k_c = 1,4$ . Как видно из графика для увеличения давления топливной смеси в 2,5...3 раза соотношение объемов  $V_1/V_2$  должно быть в пределах 1,8...2,5. Дальнейшее увеличение степени повышения давления топливной смеси нецелесообразно, так как при этом происходит интенсивный рост соотношения объемов  $V_1/V_2$ , что обуславливает чрезмерный рост объема камеры сгорания.

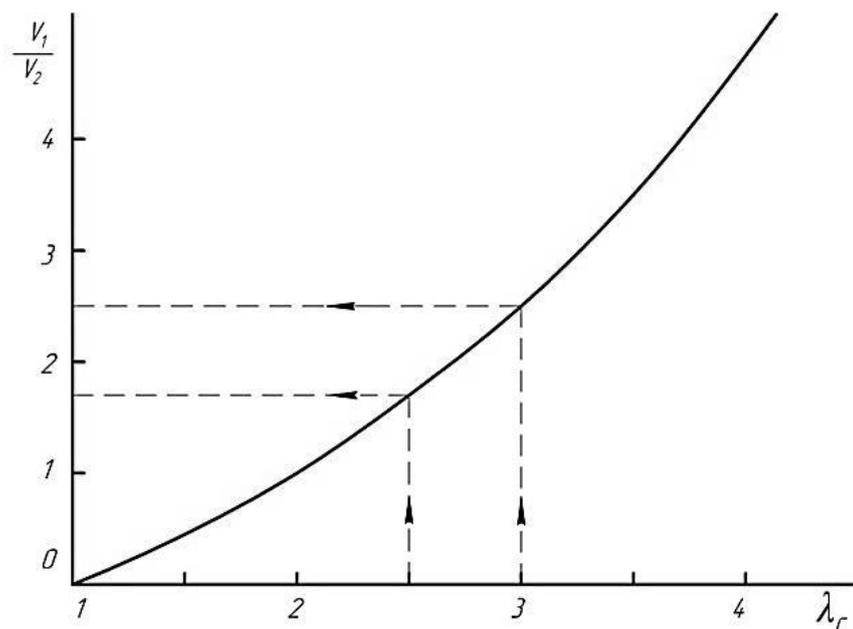


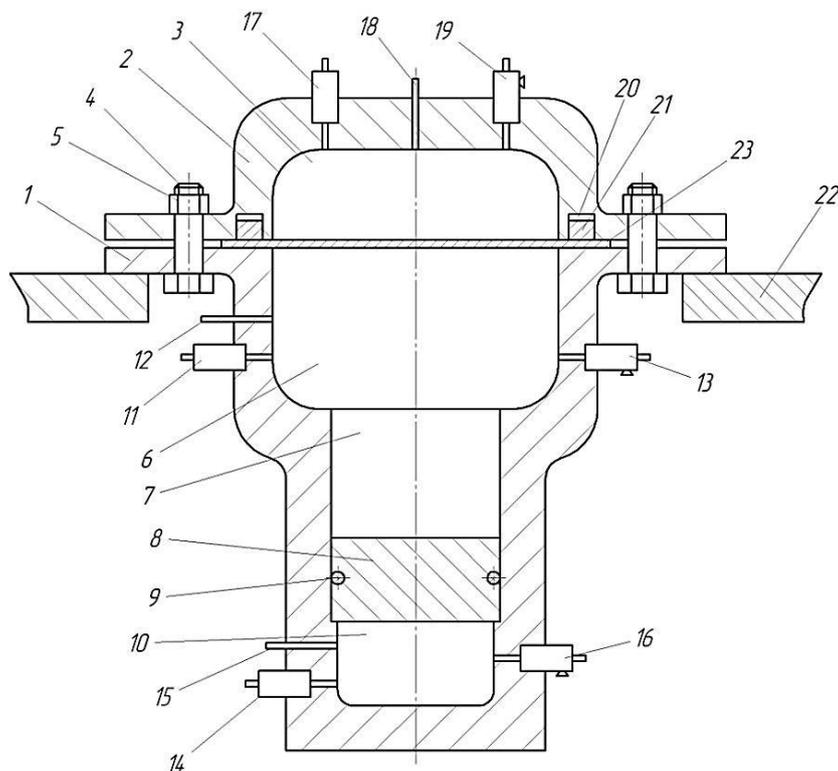
Рисунок 2.5 – График зависимости отношения объемов полостей камеры сгорания от степени повышения давления.

Обобщая вышеизложенное можно заключить, что в данном устройстве, благодаря предварительному сжатию топливной смеси, давление на поверхности штампуемой заготовки увеличивается в 2,5...3 раза. Это дает возможность штамповать детали значительно большей толщины, а также детали сложной формы, что существенно расширяет технологические возможности устройства газовой штамповки [66].

### 2.3. Схема устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления

Значительное расширение технологических возможностей газовой штамповки может быть достигнуто сжатием продуктов сгорания в процессе нагрева штампуемой заготовки. Это реализовано в устройстве газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления, схема которого представлена на рисунке 2.6. Устройство содержит корпус 1 и матрицу 2 с внутренней полостью 3, соединенные между собой при помощи болтов 4 и гаек 5. В корпусе 1 размещены камера сгорания 6 и рабочий цилиндр 7 с поршнем 8, снабженный уплотнением 9. В нижней части корпуса 1 расположена дополнительная камера сгорания 10. Камера сгорания 6 снабжена впускным клапаном 11, свечей зажигания 12,

выпускным клапаном 13. Дополнительная камера сгорания 10 также снабжена впускным клапаном 14, свечи зажигания 15 и выпускным клапаном 16. На матрице 2 установлены впускной клапан 17, свеча зажигания 18 и выпускной клапан 19.



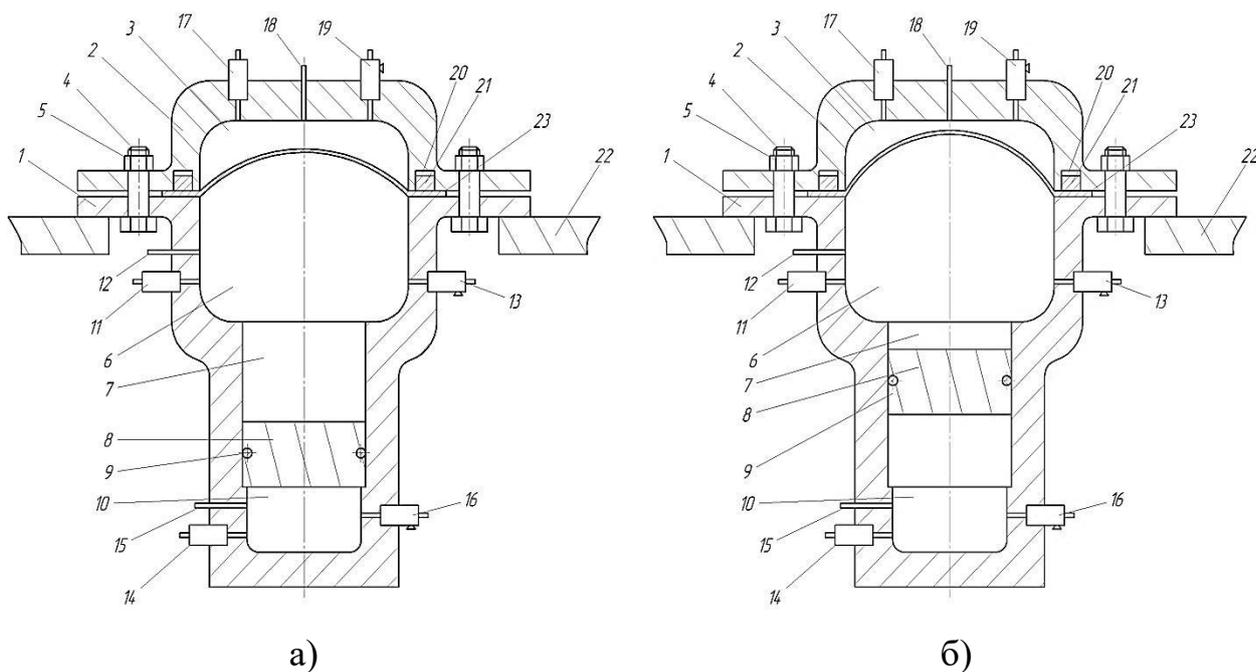
- 1 – корпус; 2 – матрица; 3 – внутренняя полость; 4 – болты; 5 – гайки;  
 6 – камера сгорания; 7 – рабочий цилиндр; 8 – поршень;  
 9 – уплотнение; 10 – дополнительная камера сгорания;  
 11, 14, 17 – впускные клапаны; 12, 15, 18 – свечи зажигания;  
 13, 16, 19 – выпускные клапаны; 20 – кольцевая полость;  
 21 – кольцевой поршень; 22 – опора; 23 – заготовка

Рисунок 2.6 – Схема устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления

В матрице 2 выполнена кольцевая полость 20, в которую установлен кольцевой поршень 21. Устройство устанавливается на опоре 22. Между корпусом 1 и кольцевым поршнем 21 устанавливаются листовая заготовка 23.

Работа устройства осуществляется в следующей последовательности. В кольцевую полость 20 подается под давлением жидкость или сжатый воздух. При этом кольцевой поршень 21 осуществляет прижим фланцевой части заготовки 23. Одновременно производится закрытие выпускных клапанов 13, 16, 19. Затем через впускные клапаны 11, 14, 17 производится подача горючего газа и сжатого воздуха в полость 3 матрицы 2, камера сгорания 6 и дополнительную камеру сгорания 10. При этом в полости 3, камерах сгорания 6, 10 и рабочем цилиндре 7 образуются топливные смеси. В камерах сгорания 6, 10 и рабочем цилиндре 7 устанавливается одинаковое давление топливной смеси, в полости 3 ее давление устанавливается в 2...3 раза ниже. Затем при помощи свеч 12 и 18 осуществляется зажигание топливных смесей в полости 3 и камере сгорания 6. В результате сгорания топливных смесей давление в полости 3, камере сгорания 6 и рабочем цилиндре 7 многократно повышается. При этом давление в камере сгорания 6 в 2...3 раза превышает давление в полости 3. Под действием разности давлений заготовка 23 деформируется, то есть осуществляется вытяжка в полость 3 матрицы 2. При этом происходит интенсивное пластическое течение металла с фланцевой части заготовки. В процессе вытяжки заготовки 23 усилие деформирования увеличивается, повышается также давление газа в полости 3 матрицы 2 вследствие его сжатия. Поэтому на определенной глубине матрицы 2 вытяжка заготовки прекращается (рисунок 2.7, а). В этом положении заготовка 23 находится в течение 0,5...1 с, при этом под действием продуктов сгорания заготовки интенсивно нагреваются. В процессе их нагрева температура продуктов сгорания снижается, соответственно уменьшается и давление в полости 3 и в камере сгорания 6. Затем при помощи свечи 15 осуществляется зажигание топливной смеси в дополнительной камере сгорания 10. В результате сгорания топливной смеси давление в этой камере многократно повышается. Под действием давления продуктов сгорания поршень 8 перемещается, вытесняя газ из рабочего цилиндра 7 в камеру сгорания 6. При этом происходит интенсивный рост давления и температуры газа в камере сгорания 6. Это обеспечивает

дальнейшую деформацию заготовки 23 (рисунок 2.7, б), а также увеличение ее температуры до достижения интервала температур горячей обработки. Затем открывается выпускной клапан 19, и газ из полости 3 матрицы 2 выпускается. Давление в полости матрицы 2 падает. При этом под действием давления газа, находящегося в камере сгорания 6, заготовка 23 деформируется и заполняет всю полость матрицы 2.



а) – первый этап; б) – второй этап

1 – корпус; 2 – матрица; 3 – внутренняя полость; 4 – болты; 5 – гайки;  
 6 – камера сгорания; 7 – рабочий цилиндр; 8 – поршень;  
 9 – уплотнение; 10 – дополнительная камера сгорания;  
 11, 14, 17 – впускные клапаны; 12, 15, 18 – свечи зажигания;  
 13, 16, 19 – выпускные клапаны; 20 – кольцевая полость;  
 21 – кольцевой поршень; 22 – опора; 23 – заготовка

Рисунок 2.7 – Этапы процесса штамповки в устройстве газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления

После осуществления процесса штамповки открываются выпускные клапаны 13, 16, 19 и продукты сгорания выпускаются из камеры сгорания 6,

рабочего цилиндра 7 и дополнительной камеры сгорания 10. При этом поршень 8 под давлением собственного веса опускается в исходное положение. Кольцевая полость 20 соединяется на слив. После этого, отвинтив гайки 5, матрица 2 отсоединяется от корпуса 1, и из неё извлекается отштампованное изделие.

Затем на корпусе 1 устанавливается новая заготовка, и матрица 2 присоединяется к корпусу 1. Далее рабочий цикл устройства повторяется в той же последовательности. Устройство может штамповать и двухслойные (биметаллические) изделия. При этом работа устройства осуществляется аналогично вышеописанному [67,68].

В данном устройстве благодаря наличию рабочего цилиндра с поршнем и дополнительной камеры сгорания обеспечивается на поверхности обрабатываемой заготовки высокое давление и высокая температура газа в течение достаточно длительного времени. Причём, максимальное давление газа достигается в конечной стадии процесса штамповки, то есть когда усилие деформации достигает максимальной величины. Благодаря этому данное устройство по сравнению с известными устройствами обеспечивает штамповку деталей значительно большей толщины, а также получение двухслойных (биметаллических) изделий из двух листовых заготовок, что существенно расширяет его технологические возможности.

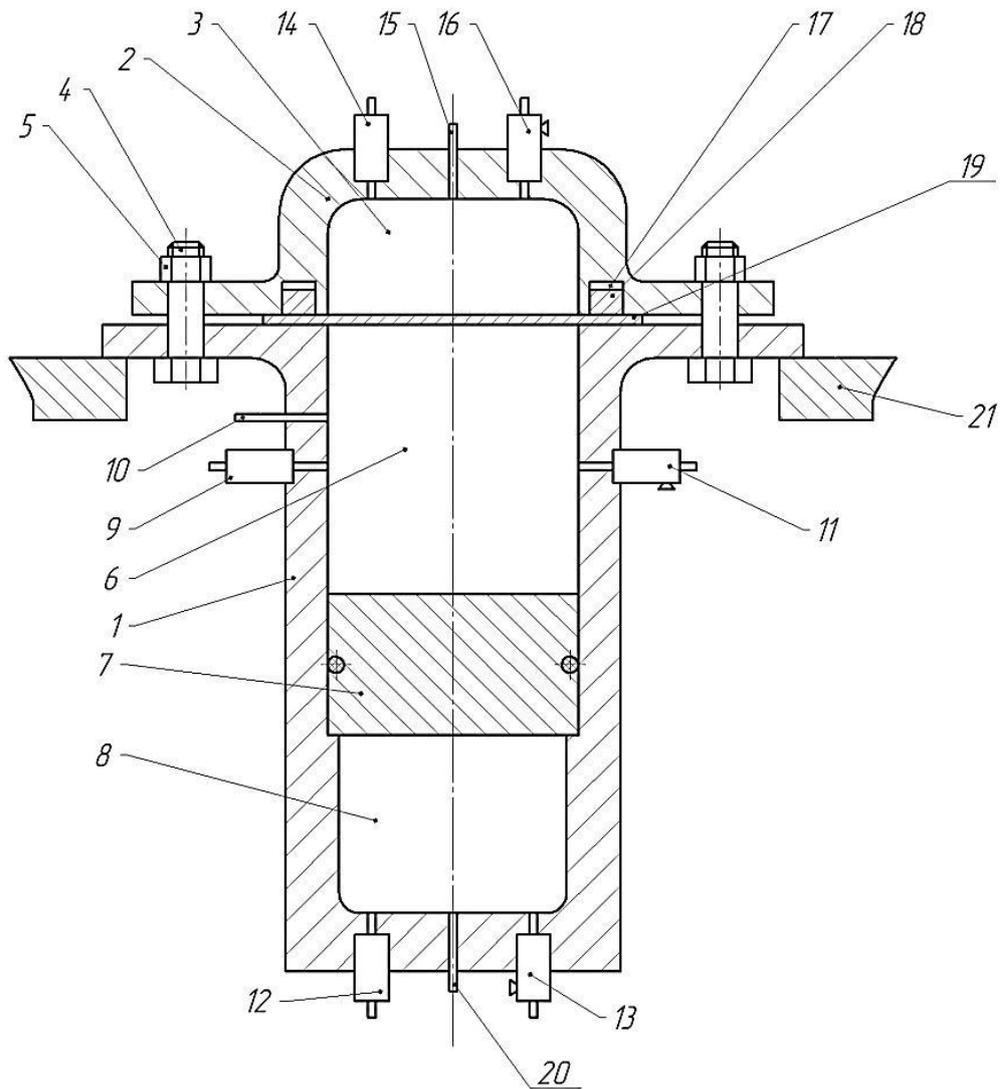
### **3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА УСТРОЙСТВА ГАЗОВОЙ ШТАМПОВКИ С ПОРШНЕВЫМ МУЛЬТИПЛИКАТОРОМ ДАВЛЕНИЯ**

#### **3.1. Этапы процесса штамповки устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления**

В устройстве газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления процесс штамповки совершается в два этапа. На первом этапе деформирование и нагрев штампуемой заготовки производится за счёт энергии, выделяющейся при сгорании топливных смесей в рабочем цилиндре и матрице. Длительность процесса горения в этих полостях не превышает 0,1 с. Затем в течение короткого промежутка времени (менее 1 с) под воздействием продуктов сгорания заготовка интенсивно нагревается. При этом температура заготовки достигает  $(0,6...0,7)t_{2.0.}$ , где  $t_{2.0.}$  – нижняя граница интервала горячей обработки. В частности для стальной заготовки температура горячей обработки составляет 850...900 °С, а для заготовок из алюминиевых сплавов – 350...400 °С [69,70]. После этого осуществляется второй этап процесса штамповки. При этом происходит сгорание топливной смеси в камере сгорания, что вызывает перемещение поршня и сжатия газа в рабочем цилиндре. Давление и температура газа в рабочем цилиндре увеличиваются, и это обеспечивает дальнейший нагрев заготовки до достижения интервала температура горячей обработки и окончательное формирование штампуемой детали в полости матрицы.

#### **3.2. Исследование рабочего процесса устройства газовой штамповки на первом этапе процесса штамповки**

На рисунке 3.1 представлена схема устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления. Принцип работы аналогичен принципу работы устройства представленного на рисунке 2.6. Данное устройство более технологично в изготовлении, поэтому в дальнейшем будем рассматривать данную схему.



- 1 – корпус; 2 – матрица; 3 – внутренняя полость; 4 – болты; 5 – гайки;  
 6 – рабочий цилиндр; 7 – поршень; 8 – камера сгорания;  
 9, 12, 14 – впускные клапаны; 10, 15, 20 – свечи зажигания;  
 11, 13, 16 – выпускные клапаны; 17 – кольцевая полость;  
 18 – кольцевой поршень; 19 – заготовка; 21 – опора

Рисунок 3.1 – Схема устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления

На первом этапе процесса штамповки в рабочем цилиндре и матрице происходят следующие термодинамические процессы: горение топливной смеси и охлаждение продуктов сгорания в процессе нагрева заготовки. Закономерность изменения давления в процессе горения топливной смеси может быть описана следующей зависимостью [71], полученной на основе уравнения Вибе [72].

$$P = P_c [1 + (\lambda - 1)(1 - e^{-6,906(\tau\tau_z^{-1})^{m+1}})] \quad (3.1)$$

где  $P_c$  – давление топливной смеси, Па;

$\tau$  – текущее значение времени, с;

$\tau_z$  – время полного сгорания топливной смеси, с;

$m$  – показатель характера сгорания;

$\lambda$  – степень повышения давления при сгорании топливной смеси в постоянном объеме.

Величины  $\lambda, m, \tau_z$  определяются экспериментально. Для газоздушных топливных смесей стехиометрического состава в зависимости от состава топливной смеси и объема камеры сгорания величина  $\lambda$  составляет 7...8 [71]. Величина  $m$  зависит от формы камеры сгорания. Для цилиндрических камер сгорания  $m = 4...4,5$ [59].

В процессе нагрева заготовки газ в рабочем цилиндре охлаждается, и давление его снижается. Экспериментальные исследования процесса горения газовых смесей в замкнутом объеме показали, что после завершения процесса сгорания снижение давления продуктов сгорания во времени происходит по линейному закону [71]. При этом интенсивность уменьшения давления зависит от соотношения объема полости горения к ее площади, с уменьшением этого соотношения давление снижается интенсивнее. Исходя из этого, закономерность изменения давления в рабочем цилиндре в период нагрева заготовки можно описать следующей зависимостью:

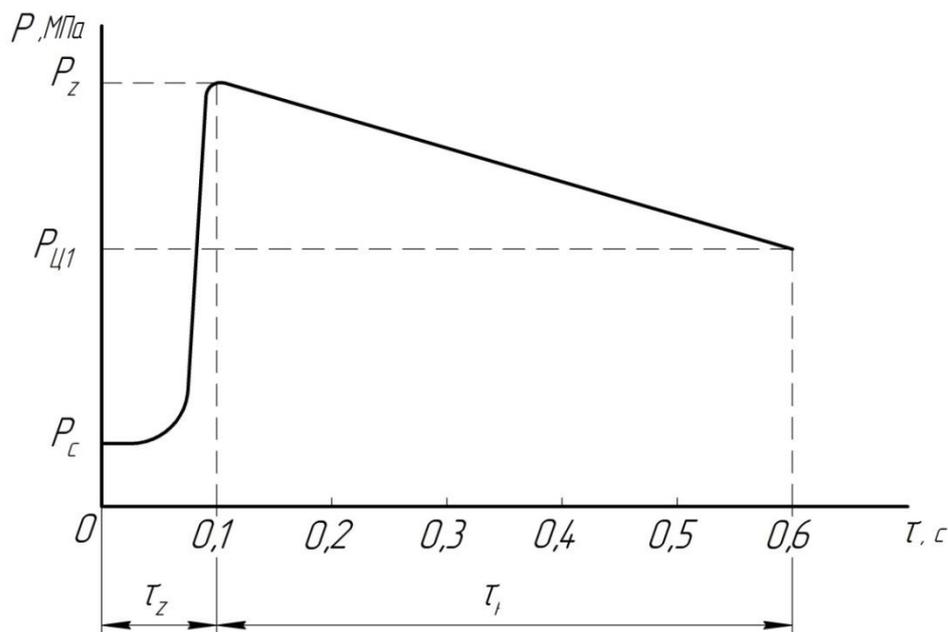
$$P = P_z (1 - \zeta \frac{\tau}{\tau_z}) \quad (3.2)$$

где  $\zeta$  – коэффициент, зависящий от соотношения объема рабочего цилиндра к площади его поверхности.

Величина  $\zeta$  находится в пределах 0,05...0,1.

На рисунке 3.2 представлен график изменения давления в рабочем цилиндре, построенный по зависимостям (3.1) и (3.2). В процессе горения топливной смеси длительностью  $\tau_z$  давление увеличивается от давления

топливной смеси  $P_c$  до  $P_z$ . В дальнейшем в процессе нагрева заготовки длительностью  $\tau_n$  давление монотонно снижается до  $P_{ц1}$ .



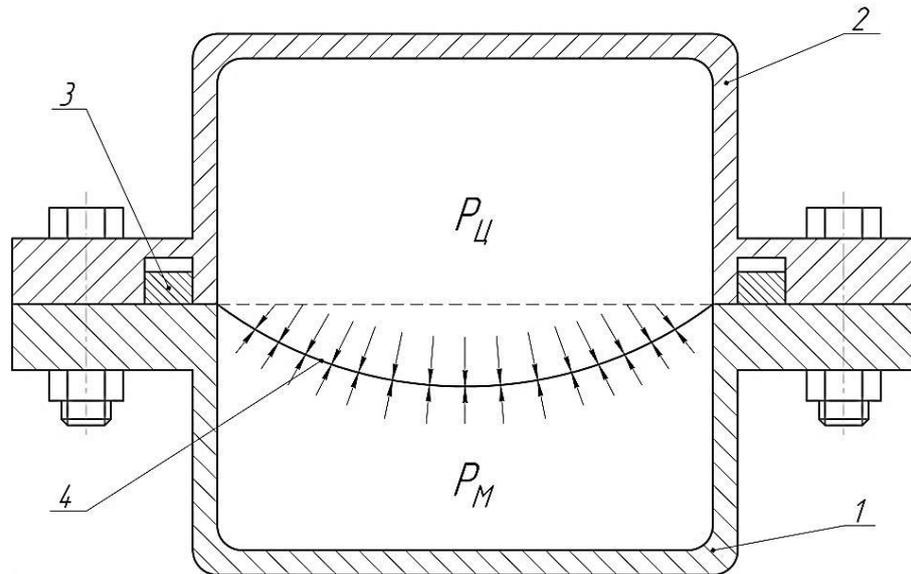
$\tau_z$  – длительность процесс сгорания;

$\tau_n$  – длительность нагрева заготовки

Рисунок 3.2 – Характер изменения давления в рабочем цилиндре на первом этапе процесса штамповки

Деформирование заготовки начинается в период горения топливной смеси. Схема нагружения обрабатываемой заготовки представлена на рисунке 3.3. С одной стороны заготовки на неё действуют продукты сгорания давлением  $P_m$ , а с другой стороны – продукты сгорания давлением  $P_{ц}$ . Давление  $P_{ц}$  в цилиндре в 1,5... 2 раза, выше давления  $P_m$  в матрице, поэтому заготовка деформируется в направлении матрицы. На фланцевую часть заготовки действует давление прижима, что предотвращает гофрообразование. За время горения топливных смесей в цилиндре и матрице, в виду быстротечности процесса, заготовка не успевает существенно нагреться. Поэтому деформация заготовки в полости матрицы сопровождается интенсивным течением металла с фланцевой части заготовки, благодаря этому заготовка не утоняется. В полости матрицы заготовка деформируется в форме, близкой к шаровому сегменту. В процессе

деформирования вследствие уменьшения объема матрицы происходит сжатие газа в ней.



1 – матрица; 2 – рабочий цилиндр; 3 – прижим; 4 – заготовка.

Рисунок 3.3 – Схема нагружения штампуемой заготовки

Это приводит к повышению давления в матрице и снижению давления в цилиндре, вследствие чего деформация заготовки прекращается. К этому времени высота образовавшегося шарового сегмента должна составлять около  $0,5...0,7 h_m$ , среднюю величину высоты примем равным  $0,6 h_m$ , где  $h_m$  – глубина центральной части матрицы. Это обеспечивается соответствующим подбором давления топливной смеси в рабочем цилиндре и матрице.

После завершения процесса сгорания заготовка под воздействием давления продуктов сгорания интенсивно нагревается. При этом температура заготовки достигает  $60...70\%$  конечной расчетной температуры, соответствующей интервалу температур горячей обработки материала заготовки. Определим требуемую величину давления топливной смеси для осуществления первого этапа процесса штамповки. Диаметр штампуемой заготовки во много раз больше толщины, поэтому деформирующуюся часть заготовки, находящуюся в полости матрицы, можно рассматривать как тонкую оболочку, нагруженную газом. Тогда для

определения возникающих в заготовке напряжений можно применить уравнение Лапласа для тонкой оболочки [73,74]:

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_\theta}{\rho_\theta} = \frac{P}{\delta} \quad (3.3)$$

где  $\sigma_m, \sigma_\theta$  – меридиальные и широтные напряжения, Па;

$\rho_m, \rho_\theta$  – меридиальные и широтные радиусы кривизны, м;

$P$  – давление, Па;

$\delta$  – толщина заготовки, м.

Так как заготовка деформируется в форме близкой к шаровому сегменту, то в данном случае  $\sigma_m = \sigma_\theta = \sigma$ . Тогда уравнение (3.3) примет следующий вид

$$2 \frac{\sigma}{R_c} = \frac{P}{\delta} \quad (3.4)$$

где  $R_c$  – радиус шарового сегмента, м.

Давления, действующие на поверхность заготовки, во много раз меньше напряжений, действующих в заготовке. Поэтому в данном случае напряженное состояние заготовки можно считать плоским. Тогда, учитывая что  $\sigma_m = \sigma_\theta = \sigma$ , условие пластичности можно представить как  $\sigma = \sigma_s$ ,  $\sigma_s$  – предел текучести материала заготовки. Тогда из уравнения (3.4) получим

$$2 \frac{\sigma_s}{R_c} = \frac{P}{\delta} \quad (3.5)$$

Основание шарового сегмента в данном случае равно диаметру матрицы. Поэтому радиус  $R_c$  определяется следующей зависимостью.

$$R_c = \frac{R_M^2 + h_c^2}{2h_c} \quad (3.6)$$

где  $R_M$  – радиус матрицы, м;

$h_c$  – высота шарового сегмента, м;

Давление на заготовку создается разностью давлений газа в цилиндре и матрице, поэтому

$$P = P_\text{ц} - P_M \quad (3.7)$$

Обозначим

$$j = \frac{P_M}{P_\text{ц}} \quad (3.8)$$

Тогда

$$P = P_{ц}(1 - j) \quad (3.9)$$

Используя зависимости (3.6) и (3.9), получим

$$\frac{4\sigma_s h_c}{R_M^2 + h_c^2} = \frac{P_{ц}(1-j)}{\delta} \quad (3.10)$$

Используя уравнение (3.10) определим давление в цилиндре.

$$P_{ц} = \frac{4\sigma_s h_c \delta}{(1-j)(R_M^2 + h_c^2)} \quad (3.11)$$

В процессе горения объем рабочего цилиндра увеличивается на величину объема деформирования заготовки, равной объему шарового сегмента. Однако для упрощения расчета будем считать, что процесс сгорания совершаются при неизменном объеме, после чего, продукты сгорания топливной адиабатически расширяются. Тогда можно записать

$$\frac{P_z}{P_{ц}} = \left(\frac{V_{ц} + V_c}{V_{ц}}\right)^k = \left(1 + \frac{V_c}{V_{ц}}\right)^k \quad (3.12)$$

где  $P_z$  – давление продуктов сгорания при сгорании в постоянном объеме, Па;

$V_c$  – объем шарового сегмента,  $m^3$ ;

$V_{ц}$  – объем рабочего цилиндра,  $m^3$ ;

$k$  – показатель адиабаты.

Величина  $P_z$  определяется следующей зависимостью

$$P_z = \lambda P_c \quad (3.13)$$

где  $P_c$  – величина давления топливной смеси.

Используя уравнения (3.11) – (3.13) определим зависимость для подсчета нужного давления топливной смеси в рабочем цилиндре устройства.

$$P_c = \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{V_c}{V_{ц}}\right)^k \frac{4\sigma_s h_c \delta}{(1-j)(R_M^2 + h_c^2)} \quad (3.14)$$

Как было отмечено выше к концу процесса сгорания топливных смесей в рабочем цилиндре и матрице величина  $h$  должна составлять  $0,6h_m$ , т.е.  $h_c = 0,6h_m$ . Тогда зависимость (3.14) можно представить в следующем виде:

$$P_c = \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{V_c}{V_{ц}}\right) k \frac{2,4\sigma_s h_M \delta}{(1-j)(R_M^2 + 0,36h_M^2)} \quad (3.15)$$

где  $h_M$  – глубина центральной части матрицы, м.

Объем шарового сегмента, входящий в зависимость (3.14) определяется следующей зависимостью.

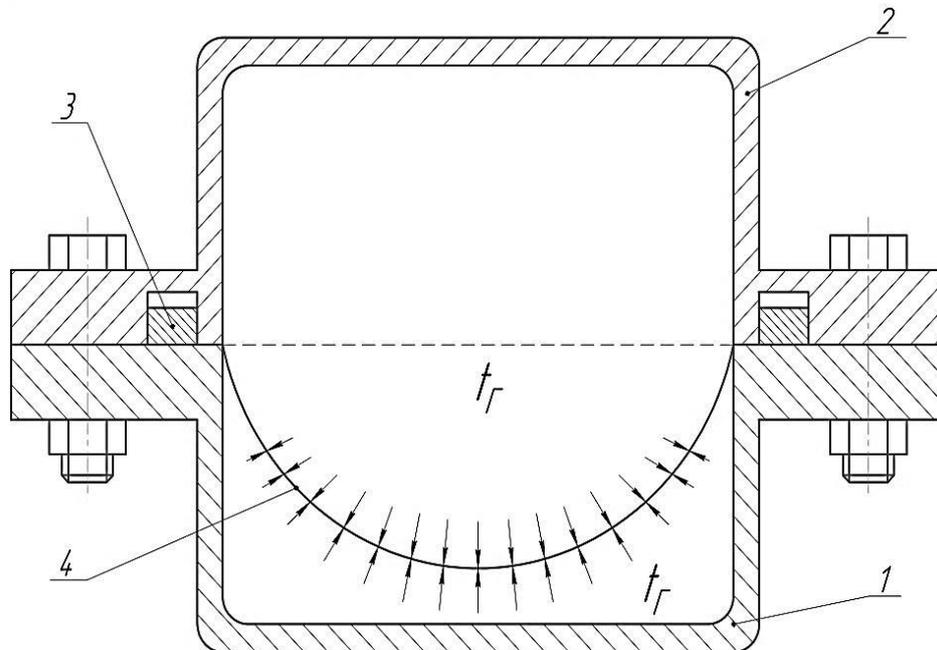
$$V_c = \frac{\pi h_c}{6} (3R_M^2 + h_c^2) \quad (3.16)$$

Так как  $h_c = 0,6h_M$ , то зависимость (3.16) примет следующий вид

$$V_c = 0,1\pi h_M (3R_M^2 + 0,36h_M^2) \quad (3.17)$$

Зависимость (3.15) в совокупности с зависимостью (3.17) определяет необходимую величину давления топливной смеси, обеспечивающей осуществление первого этапа процесса штамповки.

Рассмотрим теперь процесс нагрева заготовки. Основной нагрев заготовки происходит после завершения процесса сгорания топливных смесей в матрице и рабочем цилиндре. К этому времени заготовка, деформируясь, приобретает форму близкую к сферическому сегменту. Схема нагрева заготовки представлена на рисунке 3.4.



1 – матрица; 2 – рабочий цилиндр; 3 – прижим; 4 – заготовка.

Рисунок 3.4 – Схема нагрева штампуемой заготовки

На заготовку с обеих сторон действуют продукты сгорания, температура которых составляет 2000...2200 °С. Под воздействием продуктов сгорания заготовка интенсивно нагревается. Передача теплоты от продуктов сгорания заготовке происходит в основном за счет конвективного теплообмена.

Поэтому количество теплоты, передаваемой заготовке, определяется уравнением конвективного теплообмена Ньютона-Рихмана [61]:

$$dQ_{3_1} = \alpha_1 F_3 (t_r - t_{3_1}) d\tau \quad (3.18)$$

$$dQ_{3_2} = \alpha_2 F_3 (t_r - t_{3_2}) d\tau \quad (3.19)$$

где  $dQ_{3_1}$ ,  $dQ_{3_2}$  – элементарные количества теплоты, передаваемые заготовке со стороны матрицы и рабочего цилиндра за время  $d\tau$ ,

$\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи со стороны матрицы и цилиндра,  $Вт/(м^2 К)$ ;

$F_3$  – площадь тепловоспринимающей поверхности заготовки,  $м^2$ ;

$t_r$  – температура газа, °С;

$t_{3_1}$ ,  $t_{3_2}$  – температуры поверхностей заготовки со стороны матрицы и цилиндра, °С;

Условия теплообмена между газом и заготовкой со стороны матрицы и рабочего цилиндра примерно одинаковые, поэтому коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  можно считать одинаковыми. Кроме того, ввиду высокой теплопроводности и малой толщине заготовки температура по ее сечению существенно не изменяется. Таким образом, без большой погрешности можно считать, что

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha, t_{3_1} = t_{3_2} = t_3 \quad (3.20)$$

С учетом выражений (3.20) из уравнений (3.18) и (3.19) получим общее количество теплоты, воспринимаемой заготовкой, в следующем виде.

$$dQ_3 = dQ_{3_1} + dQ_{3_2} = 2\alpha F_3 (t_r - t_3) d\tau \quad (3.21)$$

Теплота от газа так же передается к стенкам матрицы и рабочего цилиндра. Будем считать, что при теплообмене газа с этими стенками коэффициент

теплоотдачи такой же, как при теплообмене с заготовкой. Тогда количество теплоты передаваемой стенкам матрицы и рабочего цилиндра, выражается следующими уравнениями:

$$dQ_{c_1} = \alpha F_M (t_r - t_M) d\tau \quad (3.22)$$

$$dQ_{c_2} = \alpha F_{Ц} (t_r - t_{Ц}) d\tau \quad (3.23)$$

где  $F_M, F_{Ц}$  – площади тепловоспринимающих поверхностей матрицы и рабочего цилиндра,  $m^2$ ;

$t_M, t_{Ц}$  – температуры стенок матрицы и рабочего цилиндра,  $^{\circ}C$ .

Температуры внутренних стенок матрицы и рабочего цилиндра существенно не отличаются. Будем считать их одинаковыми и равными температуре заготовки, т.е.

$$t_M = t_{Ц} = t_3 \quad (3.24)$$

До достижения температуры заготовки  $350...400^{\circ}C$  равенство (3.24) практически выполняется. При дальнейшем нагреве температура заготовки становится выше температуры стенок матрицы и рабочего цилиндра. Однако в первом приближении будем считать, что равенство (3.24) выполняется в течение всего процесса нагрева заготовки. Тогда из уравнений (3.22) и (3.23) с учетом равенства (3.24) получим общее количество теплоты, воспринимаемой стенками матрицы и рабочего цилиндра.

$$dQ_c = dQ_{c_1} + dQ_{c_2} = \alpha (F_M + F_{Ц}) (t_r - t_3) \quad (3.25)$$

Исходя из уравнений (3.21) и (3.25) можно записать:

$$\frac{dQ_c}{dQ_3} = \frac{\alpha (F_M + F_{Ц}) (t_r - t_3)}{2\alpha F_3 (t_r - t_3)}, \quad (3.26)$$

Отсюда получим

$$dQ_c = \frac{F_M + F_{Ц}}{2F_3} dQ_3 \quad (3.27)$$

Нагрев заготовки и стенок матрицы и рабочего цилиндра происходит за счет снижения температуры газа. Исходя из этого, можно записать

$$dQ_3 + dQ_c = -m_r c_r dt_r \quad (3.28)$$

где  $m_r$  – масса газа, кг;

$c_{\Gamma}$  – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, Дж/(кг·К).

Используя зависимость (3.27) и (3.28) определим

$$\frac{1}{2F_3} (F_M + F_{\text{ц}} + 2F_3) dQ_3 = -m_{\Gamma} c_{\Gamma} dt_{\Gamma} \quad (3.29)$$

Отсюда можно записать

$$dQ_3 = -\frac{2F_3}{F_M + F_{\text{ц}} + 2F_3} m_{\Gamma} c_{\Gamma} dt_{\Gamma} \quad (3.30)$$

Массу газа, входящую в уравнении (3.30) можно определить следующей зависимостью

$$m_{\Gamma} = \rho_{\Gamma} V_{\text{ц}} + \rho_{\Gamma_1} V_M \quad (3.31)$$

где  $\rho_{\Gamma}$ ,  $\rho_{\Gamma_1}$  – плотности газа в рабочем цилиндре и матрице соответственно, кг/м<sup>3</sup>;

$V_{\text{ц}}$ ,  $V_M$  – объем рабочего цилиндра и матрицы, м<sup>3</sup>.

Плотности газа  $\rho_{\Gamma}$  и  $\rho_{\Gamma_1}$  пропорциональны давлениям топливных смесей в рабочем цилиндре и матрице, т.е.

$$\frac{\rho_{\Gamma_1}}{\rho_{\Gamma}} = \frac{P_{c_1}}{P_c} = \beta_c \quad (3.32)$$

где  $P_{c_1}$  – давление топливной смеси в матрице, Па;  $\beta_c$  – соотношение давлений топливных смесей.

Из соотношения (3.32) получим

$$\rho_{\Gamma_1} = \beta_c \rho_{\Gamma} \quad (3.33)$$

Из зависимостей (3.31), (3.33) следует, что

$$m_{\Gamma} = \rho_{\Gamma} (V_{\text{ц}} + \beta_c V_M) \quad (3.34)$$

Подставляя в уравнение (3.30) получим

$$dQ_3 = -\frac{2F_3}{F_M + F_{\text{ц}} + 2F_3} \rho_{\Gamma} (V_{\text{ц}} + \beta_c V_M) c_{\Gamma} dt_{\Gamma} \quad (3.35)$$

Теплота, переданная от газа к заготовке расходуется на повышение ее температуры. Исходя из этого, можно записать

$$dQ_3 = m_3 c_3 dt_3 \quad (3.36)$$

где  $m_3$  – масса тепловоспринимающей части заготовки, кг;

$c_3$  – удельная теплоемкость материала заготовки, Дж/(кг·К).

Масса тепловоспринимающей части заготовки равна

$$m_3 = \rho_3 F_3 \delta \quad (3.37)$$

где  $\rho_3$  – плотность материала заготовки,  $кг/м^3$ ;

$F_3$  – площадь тепловоспринимающей поверхности заготовки,  $м^2$ .

В период нагрева заготовки тепловоспринимающая ее часть имеет форму близкую к форме шарового сегмента. Поэтому к форме шарового сегмента можно принять площадь  $F_3$  входящую в зависимость (3.37) и уравнение (3.35) равным площади шарового сегмента, т.е.

$$F_3 = \pi(R_M^2 + h_c^2) \quad (3.38)$$

где  $R_M$  – радиус матрицы,  $м$ ;

$h_c$  – высота шарового сегмента,  $м$ .

Так как  $h_c \approx 0,6h_M$ , то зависимость (3.38) можно представить в следующем виде:

$$F_3 = \pi(R_M^2 + 0,36h_M^2) \quad (3.39)$$

Используя зависимость (3.37) из уравнения (3.36) получим

$$dQ_3 = \rho_3 c_3 F_3 \delta dt_3 \quad (3.40)$$

Из уравнений (3.35) и (3.40) следует, что

$$\rho_3 c_3 F_3 \delta dt_3 = - \frac{2F_3}{F_M + F_{\Gamma} + 2F_3} \rho_{\Gamma} c_{\Gamma} (V_{\Gamma} + \beta_c V_M) dt_{\Gamma} \quad (3.41)$$

Обозначим:

$$f_3 = \frac{2F_3}{F_M + F_{\Gamma} + 2F_3} \quad (3.42)$$

$$\xi = \frac{1}{f_3} \frac{\rho_3 c_3 F_3 \delta}{\rho_{\Gamma} c_{\Gamma} (V_{\Gamma} + \beta_c V_M)} \quad (3.43)$$

где  $f_3$  – относительная площадь тепловоспринимающей поверхности заготовки;

$\xi$  – относительная теплоемкость заготовки, представляющая собой отношение теплоемкости заготовки к теплоемкости газа с учетом доли энергии газа, идущей только на нагрев заготовки.

Тогда уравнение (3.41) примет следующий вид:

$$\xi dt_3 = -dt_r \quad (3.44)$$

Интегрируя уравнение (3.44), получим

$$\xi(t_3 - t_{3_0}) = t_z - t_r \quad (3.45)$$

где  $t_{3_0}$  – температура заготовки в момент окончания процесса сгорания,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_z$  – температура продуктов сгорания в момент окончания процесса сгорания,  $^{\circ}\text{C}$ .

Используя зависимость (3.45) получим уравнение, связывающее данные температуры газа и заготовки.

$$t_r = t_z - \xi(t_3 - t_{3_0}), \quad (3.46)$$

Из уравнений (3.21) и (3.40) следует, что

$$\rho_3 c_3 F_3 \delta dt_3 = 2\alpha F_3 (t_r - t_3) d\tau \quad (3.47)$$

Тогда, подставляя значение  $t_r$  по зависимости (3.46) в уравнение (3.47), получим.

$$\rho_3 c_3 F_3 \delta dt_3 = 2\alpha F_3 [t_z + \xi t_{3_0} - (\xi + 1)t_3] d\tau$$

Отсюда получим

$$\frac{dt_3}{t_z + \xi t_{3_0} - (\xi + 1)t_3} = \frac{2\alpha}{\rho_3 c_3 \delta} d\tau \quad (3.48)$$

Интегрируя обе части уравнения (3.48) будем иметь

$$-\frac{1}{\alpha + 1} \ln[t_z + \xi t_{3_0} - (\xi + 1)t_3] = \frac{2\alpha}{\rho_3 c_3 \delta} \tau + C \quad (3.49)$$

Постоянную интегрирования  $C$  найдем из начальных условий: при  $\tau = 0$ ,  $t_3 = t_{3_0}$ .

$$C = -\frac{1}{\xi + 1} \ln(t_z - t_{3_0})$$

Подставляя найденное значение  $C$  в уравнение (3.49), получим

$$-\frac{1}{\xi + 1} \ln \frac{t_z + \xi t_{3_0} - (\xi + 1)t_3}{t_z - t_{3_0}} = \frac{2\alpha}{\rho_3 c_3 \delta} \tau \quad (3.50)$$

Потенцируя зависимость (3.50), получим

$$\frac{t_z + \xi t_{3_0} - (\xi + 1)t_3}{t_z - t_{3_0}} = e^{-\frac{2\alpha(\xi + 1)}{\rho_3 c_3 \delta} \tau} \quad (3.51)$$

После соответствующих преобразований этого уравнения можно записать

$$t_3 = \frac{1}{\xi+1} \left[ t_z (1 - e^{-\frac{2\alpha(\xi+1)}{\rho_3 c_3 \delta} \tau}) + t_{30} (\xi + e^{-\frac{2\alpha(\xi+1)}{\rho_3 c_3 \delta} \tau}) \right] \quad (3.52)$$

Зависимость (3.52) выражает закон изменения температуры заготовки

Для подсчета температуры заготовки по уравнениям (3.47) и (3.48) требуется знать величину коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , которая существенно зависит от давления топливной смеси. Величина  $\alpha$  определяется по уравнению полученной из экспериментальных исследований [75].

$$\alpha = b \left( \frac{P_c + 0,1}{1,1} \right)^{0,8} \quad (3.53)$$

где  $b$  – коэффициент, учитывающий форму и геометрические параметры камеры сгорания,  $b = 2 \dots 4$ .

Входящая в зависимость (3.53) величина  $\alpha$  измеряется в  $\text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , а давление топливной смеси  $P_c$  измеряется в  $\text{МПа}$ .

Начальная температура заготовки  $t_{30}$ , входящая в зависимость (3.52), учитывает нагрев заготовки в процессе горения топливной смеси. Определим ее величину. Общее количество теплоты, образующейся в процессе сгорания топливной смеси определяется по следующей зависимости

$$Q = H'_c \left( V_{\text{ц}} \frac{P_c}{P_a} + V_M \frac{P_{c1}}{P_a} \right) = H'_c \frac{P_c}{P_a} (V_{\text{ц}} + \beta_c V_M) \quad (3.54)$$

где  $H_c$  – теплотворная способность  $1 \text{ м}^3$  топливной смеси,  $\text{Дж}/\text{м}^3$ ;

$H'_c$  – низшая теплотворная способность  $1 \text{ нм}^3$  топливной смеси, определенной при нормальных условиях,  $\text{Дж}/\text{м}^3$ ;

$P_a$  – атмосферное давление,  $\text{Па}$ .

В процессе горения топливной смеси часть этой теплоты вследствие теплоотдачи передается стенкам рабочего цилиндра, матрицы и заготовке

$$Q_n = \varphi Q, \quad (3.55)$$

где  $Q_n$  – количество тепловых потерь,  $\text{Дж}$ ;

$\varphi$  – коэффициент потери теплоты.

По экспериментальным данным [76]  $\varphi = 0,12 \dots 0,18$ . Будем считать, что отводимая теплота  $Q_n$  равномерно распределяется по всей тепловоспринимающей поверхности, т.е. по поверхности рабочего цилиндра, матрицы и заготовки:

$$Q_n = Q'_z + Q'_c \quad (3.56)$$

где  $Q'_z$  – количество теплоты, воспринятой заготовкой, Дж;

$Q'_c$  – количество теплоты, воспринятой стенками рабочего цилиндра, Дж;

Тогда, учитывая зависимости (3.27) и (3.32) из уравнения (3.56) получим выражение для определения количества теплоты, воспринимаемой заготовкой

$$Q'_z = f_3 Q_n = f_3 \varphi Q = f_3 \varphi H'_c \frac{P_c}{P_a} (V_{ц} + \beta_c V_M) \quad (3.57)$$

Теплота  $Q'_z$  целиком идет на нагрев заготовки. Тогда уравнение теплового баланса заготовки можно записать в следующем виде

$$m_3 c_3 \Delta t_3 = Q'_z, \quad (3.58)$$

где  $\Delta t_3$  – приращение температуры заготовки в процессе горения топливной смеси, °С.

Отсюда, учитывая зависимость (3.37), получим

$$\rho_3 F_3 \delta c_3 \Delta t_3 = Q'_z \quad (3.59)$$

Отсюда, учитывая зависимость (3.57), получим

$$\Delta t_3 = \frac{f_3 \varphi H'_c P_c}{\rho_3 F_3 \delta c_3 P_a} (V_{ц} + \beta_c V_M). \quad (3.60)$$

Тогда температура заготовки в конце процесса горения топливной смеси

$$t_{30} = t_0 + \frac{f_3 \varphi H'_c P_c}{\rho_3 F_3 \delta c_3 P_a} (V_{ц} + \beta_c V_M) \quad (3.61)$$

где  $t_0$  – начальная температура заготовки, т.е. при установке заготовки на матрицу, °С.

Зависимость (3.52) в совокупности с зависимостями (3.53) и (3.61) позволяет определить температуру нагрева заготовки в зависимости от параметров топливной смеси и времени нагрева [77]. По этой зависимости был проведен расчет температуры стальной, алюминиевой заготовок при различных

давлениях топливной смеси, состоящей из смеси сжатого воздуха с пропан-бутаном стехиометрического состава.

При расчете варьировали давление топливной смеси  $P_c$ . Результаты расчета в виде графиков представлены на рисунках 3.5.- 3.6.

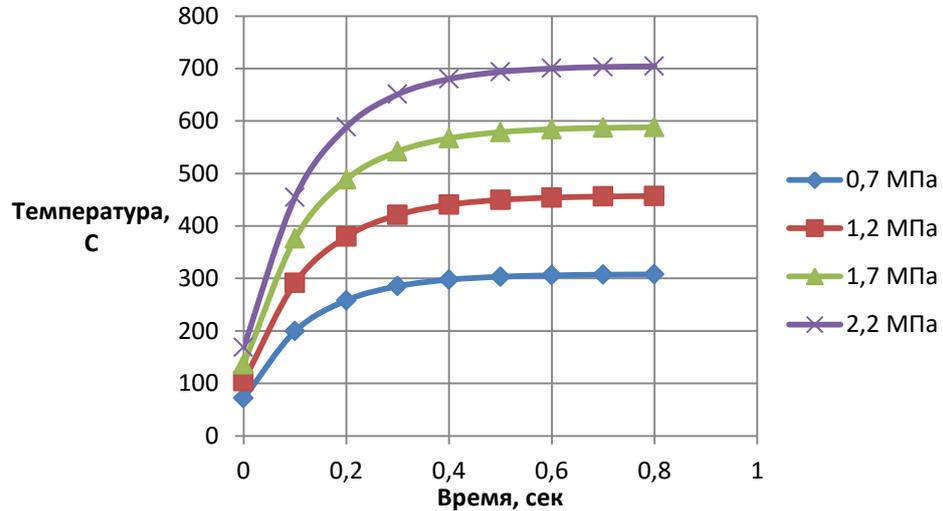


Рисунок 3.5 – Графики зависимости температуры нагрева стальной заготовки диаметром 160 мм толщиной 1,0 мм от времени при различных давлениях топливной смеси на первом этапе процесса штамповки

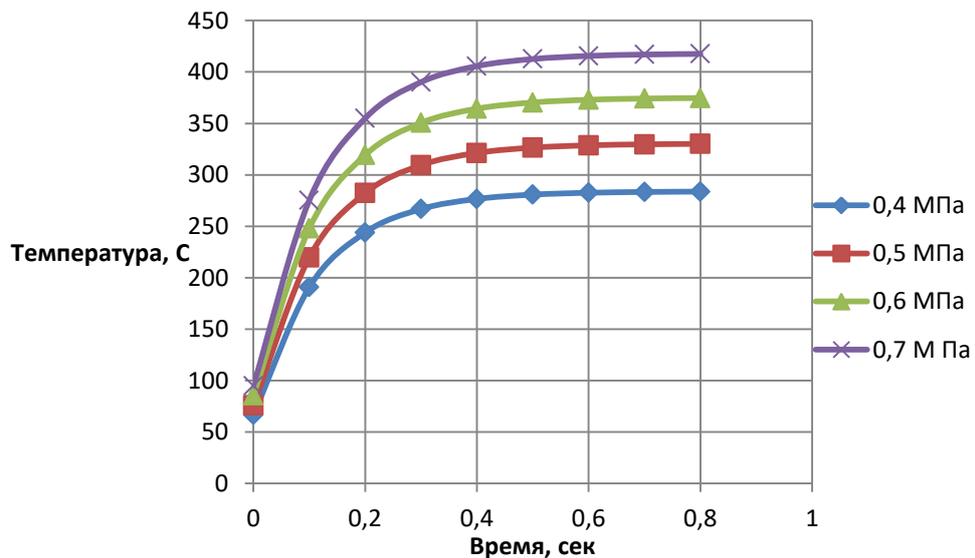


Рисунок 3.6 – Графики зависимости температуры нагрева алюминиевой заготовки толщиной 1,0 мм от времени при различных давлениях топливной смеси на первом этапе процесса штамповки

Как видно из представленных графиков температура заготовки сначала растёт очень быстро, затем, то есть через 0,4...0,5 с, интенсивность ее роста существенно снижается. Поэтому, учитывая снижение давления газа в процессе нагрева заготовки, длительность времени нагрева заготовки можно считать оптимальным в пределах 0,5...0,8 с.

Из зависимости (3.52) следует, что температура нагрева заготовки существенно зависит от величины  $\xi$  которая в свою очередь в значительной мере зависит от соотношения диаметра и высоты рабочего цилиндра. В этой связи определим оптимальные значения их соотношений. Для этого вычислим значения  $f_3$  и  $\xi$  используя зависимости (3.42) и (3.43). При этом будем считать, что матрица имеет цилиндрическую форму, причём ее диаметр равен диаметру рабочего цилиндра, а глубина матрицы равна половине ее диаметра. Тогда площадь тепловоспринимаемой поверхности матрицы равна сумме площади дна матрицы и ее боковой поверхности, то есть

$$F_M = \frac{\pi}{4} d_{\text{ц}}^2 + \pi d_{\text{ц}} * \frac{1}{2} d_{\text{ц}} = \frac{3}{4} \pi d_{\text{ц}}^2 \quad (3.62)$$

где  $d_{\text{ц}}$  — диаметр рабочего цилиндра, м.

Аналогично определяется площадь тепловоспринимающие поверхности рабочего цилиндра.

$$F_{\text{ц}} = \frac{\pi}{4} d_{\text{ц}}^2 + \pi d_{\text{ц}} h_{\text{ц}} \quad (3.63)$$

где  $h_{\text{ц}}$  — высота рабочего цилиндра, м.

Как отмечалось выше, заготовка в процессе нагрева имеет форму сферообразного сегмента, поэтому площадь тепловоспринимающей поверхности может быть определена по зависимости (3.39). Однако в данном случае для упрощения расчета площади ее тепловоспринимающей поверхности будем определять, считая заготовку плоской, т.е.

$$F_3 = \frac{\pi}{4} d_{\text{ц}}^2 \quad (3.64)$$

Тогда, учитывая зависимость (3.62) – (3.64), получим

$$F_M + F_{\text{ц}} + 2F_3 = \frac{3}{2} \pi d_{\text{ц}}^2 + \pi d_{\text{ц}} h_{\text{ц}} \quad (3.65)$$

Из зависимостей (3.42), (3.64), (3.65) получим выражение для вычисления относительной тепловоспринимающей поверхности заготовки.

$$f_3 = \frac{d_{ц}}{3d_{ц}+2h_{ц}} = \frac{1}{3+2h_{ц}/d_{ц}} \quad (3.66)$$

Вычислим теперь относительную теплоемкость заготовки  $\xi$ , используя зависимость (3.43). Для этого вначале вычислим объем рабочего цилиндра и объём матрицы:

$$V_{ц} = \frac{\pi}{4} d_{ц}^2 h_{ц}$$

$$V_{м} = \frac{\pi}{4} d_{ц}^2 * \frac{1}{2} d_{ц} = \frac{\pi}{8} d_{ц}^3$$

Тогда, считая  $\beta_c=0,5$ , получим

$$\frac{F_3}{V_{ц} + \beta_c V_{м}} = \frac{\frac{\pi}{4} d_{ц}^2}{\frac{\pi}{4} d_{ц}^2 h_{ц} + 0.5 \frac{\pi}{8} d_{ц}^3} = \frac{1}{h_{ц} + \frac{1}{4} d_{ц}} \quad (3.67)$$

Учитывая выражение (3.66) и (3.67), из зависимости (3.43) получим

$$\xi = (3 + 2 \frac{h_{ц}}{d_{ц}}) \frac{1}{h_{ц}/d_{ц} + 0,25} \frac{\delta \rho_3 c_3}{d_{ц} \rho_{гсг}} \quad (3.68)$$

Обозначим

$$\psi = (3 + 2 \frac{h_{ц}}{d_{ц}}) \frac{1}{h_{ц}/d_{ц} + 0,25} \quad (3.69)$$

Тогда

$$\xi = \psi \frac{\delta \rho_3 c_3}{d_{ц} \rho_{гсг}} \quad (3.70)$$

Величина  $\psi$  зависит только от соотношения высоты и диаметра рабочего цилиндра. На рисунке 3.7 представлен график этой зависимости. Как видно из графика при уменьшении значения  $h_{ц}/d_{ц}$  ниже 0,5 величина  $\psi$  резко увеличивается. При этом согласно зависимости (3.70) пропорционально  $\psi$  увеличивается относительная теплоемкость заготовки  $\xi$ . Из зависимости (3.52) следует, что увеличение  $\xi$  ведет к уменьшению температуры заготовки. Поэтому уменьшение величины  $h_{ц}/d_{ц}$  ниже 0,5 не целесообразно. При увеличении  $h_{ц}/d_{ц}$

более 1,5 величина  $\psi$  существенно не уменьшается, соответственно и величина  $\xi$  существенно не снижается, Однако при этом существенно увеличивается высота рабочего цилиндра. Поэтому можно считать оптимальными значения  $h_u/d_u$  в пределах от 0,5 до 1,5 .

На рисунке 3.7 представлен также график зависимости относительной площади тепловоспринимающей поверхности заготовки  $f_3$  от соотношения  $h_u/d_u$ . Этот график также подтверждает нецелесообразность увеличения  $h_u/d_u$  более 1,5. Так при  $h_u/d_u = 0,5$ ,  $f_3 = 0,25$  , при  $h_u/d_u = 2$ ,  $f_3 \approx 0,14$

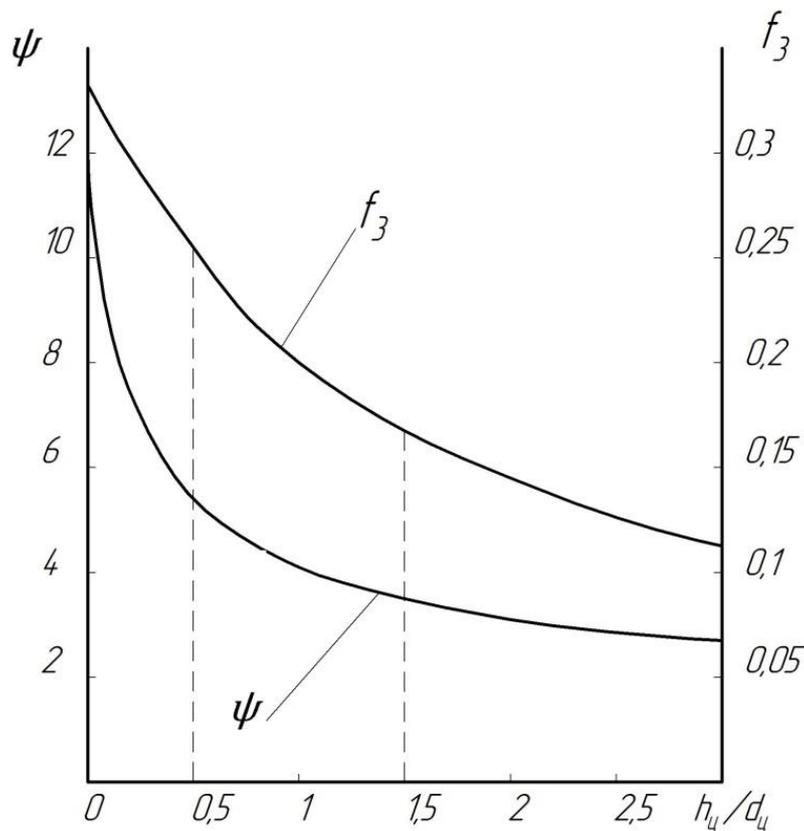


Рисунок 4.6 – Графическая зависимость величины  $\psi$  от высоты и диаметра рабочего цилиндра.

Величина  $f_3$  характеризует долю площади тепловоспринимающей поверхности заготовки в общей площади теплообмена. Следовательно, при  $h_u/d_u = 0,5$  на нагрев заготовки идёт 25% энергии, теряемой газом, а при  $h_u/d_u = 2$  – только 14%.

Вычислим, используя зависимость 3.70 величину  $\xi$  в оптимальном диапазоне значений  $h_y/d_y$  применительно к процессу штамповки деталей из стальной заготовки. Для стальной заготовки  $\rho_3=7800 \text{ кг/м}^3$ ;  $c_3=0,46 \text{ кДж/(кг*К)}$  [78]. Удельная теплоемкость продуктов сгорания  $c_r=1 \text{ кДж/(кг*К)}$  [62]. Масса газа в рабочем цилиндре не изменяется и объём рабочего цилиндра в период нагрева заготовки существенно не изменяется. Поэтому плотность продуктов сгорания равна плотности топливной смеси. Так как доля воздуха в топливной смеси составляет не менее 90%, то без большой погрешности можно принять равным плотности воздуха. Максимально возможное давление топливной смеси составляет  $2 \text{ МПа}$ , при большем давлении трудно обеспечить герметичность рабочего цилиндра.

Тогда

$$\rho_r = \rho_0 \frac{P_c}{P_a} = 1,225 * \frac{2}{0,1} = 24,5 \text{ кг/м}^3$$

где  $\rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3$  – плотность при нормальных условиях.

При указанных значениях параметров заготовки и газа вычислим значение следующего выражения:

$$\frac{\rho_3 c_3}{\rho_r c_r} = \frac{7800 * 0,46}{24,5 * 1} = 143,5$$

Подставляя это в зависимость (3.70), получим

$$\xi = 143,5 \psi \frac{\delta}{d_{ц}} \quad (3.71)$$

Определим по этой зависимости величину  $\xi$  в оптимальном диапазоне значений  $h_y/d_y$ . При  $h_y/d_y=0,5$  по зависимости (3.69)  $\psi=5,3$

Тогда

$$\xi = 143,5 * 5,3 \frac{\delta}{2h_{ц}} = 380,3 \frac{\delta}{h_{ц}}$$

При  $h_y/d_y=1$  по зависимости (3.69)  $\psi=4$

Тогда

$$\xi = 143,5 * 4 \frac{\delta}{h_{ц}} = 574 \frac{\delta}{h_{ц}}$$

При  $h_y/d_y=1,5$  аналогично получим  $\psi=3,4$

$$\xi = 143,5 * 3,4 * 1,5 \frac{\delta}{h_{ц}} = 731,8 \frac{\delta}{h_{ц}}$$

Для определения необходимой величины  $h_y$  воспользуемся уравнением (3.45), представив его в следующем виде:

$$\xi \Delta t_3 = \Delta t_r \quad (3.72)$$

где  $\Delta t_3$  – повышение температуры заготовки в процессе ее нагрева, °C;

$\Delta t_r$  – снижение температуры газа, °C.

Для случая штамповки стальной заготовки можно считать, что  $\Delta t_3=600$  °C;  $\Delta t_r=1400$  °C.

Подставим в уравнение (3.72) найденные выражения для определения  $\xi$  при различных значениях  $h_y/d_y$ .

При  $h_y/d_y = 0,5$

$$380,3 * 600 \frac{\delta}{h_{ц}} = 1400$$

Отсюда получим

$$h_{ц} = 163,5\delta \quad (3.73)$$

Аналогично при  $h_y/d_y=1$  получим

$$h_{ц} = 245,5\delta \quad (3.74)$$

а при  $h_y/d_y=1,5$

$$h_{ц} = 313,6\delta \quad (3.75)$$

Анализируя зависимости (3.73) – (3.74), можно заключить следующее.

При  $h_y/d_y=1,5$  нагрев стальной заготовки до интервала температур горячей обработки возможно при ее толщине не более 1,2 мм, так как при большей толщине заготовки высота рабочего цилиндра оказывается чрезмерно большим. При  $h_y/d_y=1$  возможен нагрев до интервала температур горячей обработки стальной заготовки толщиной до 1,5 мм, а при  $h_y/d_y = 0,5$  – стальной заготовки толщиной до 2 мм.

С увеличением диаметра заготовки увеличивается также и доля энергии газа, расходуемой на нагрев заготовки в связи с повышением относительной площади заготовки, определяемой зависимостью (3.42). Поэтому с увеличением диаметра заготовки температура ее нагрева повышается. На рисунке 3.8 представлены графики зависимости температуры стальной заготовки толщиной 1,0 мм от времени при давлении топливной смеси 1,7 МПа для разных диаметров заготовок на первом этапе процесса штамповки. Из этих графиков видно, что при увеличении диаметра заготовки от 160 мм до 400 мм максимальная температура нагрева заготовки увеличивается от 580 °С до 900 °С. Поэтому для нагрева заготовки меньшего диаметра требуется большее давление топливной смеси.

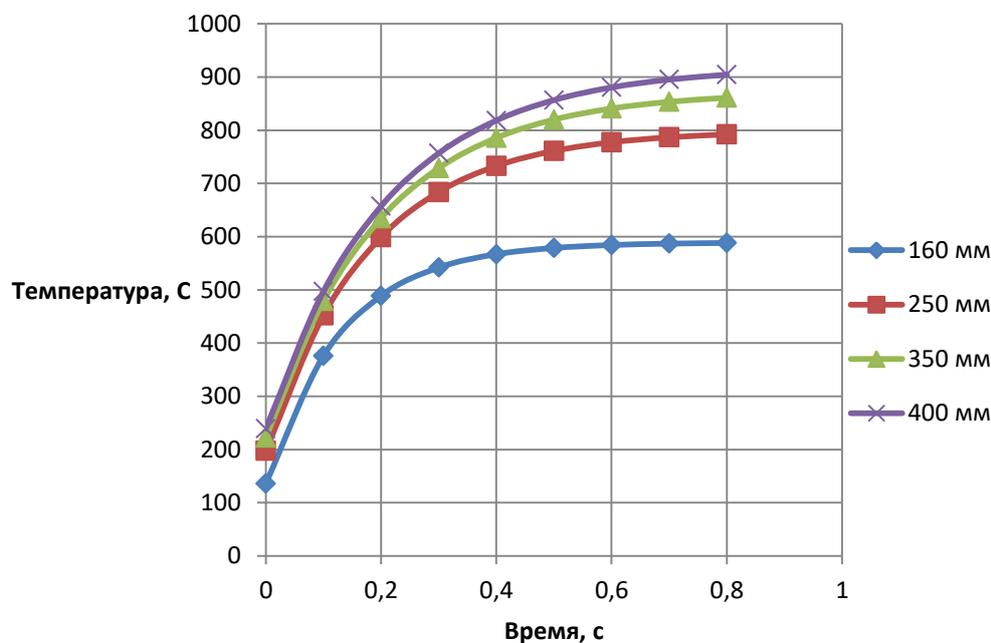


Рисунок 3.8 – Графики зависимости температуры нагрева стальной заготовки толщиной 1,0 мм от времени при давлении топливной смеси 1,7 МПа для разных диаметров заготовок на первом этапе процесса штамповки

### 3.3. Исследование рабочего процесса устройства газовой штамповки на втором этапе процесса штамповки

Второй этап процесса штамповки начинается после завершения первого этапа. К этому времени штампуемая заготовка значительно нагревается, а газ в

рабочем цилиндре охлаждается. Поэтому к концу первого этапа температура в рабочем цилиндре уменьшается до  $T_{ц1}$ , а снижается до  $P_{ц1}$ .

Оценим величины  $T_{ц1}$  и  $P_{ц1}$ . Нижняя граница интервала температур горячей обработки сталей составляет 850...900 °С. Поэтому при штамповке стальных деталей на первом этапе процесса заготовка нагревается до 500...600 °С. Для этого температура газа к концу первого этапа должна быть не ниже 600...700 °С, а абсолютная температура  $T_{ц1} = 900...1000$  К. Следовательно к этому моменту абсолютная температура газа уменьшается в 2,3...2,5 раз ( $T_z/T_{ц1} \approx 2400/1000 = 2,4$ ). Так как при этом объем рабочего цилиндра существенно не изменяется, то и давление уменьшается во столько же раз. В случае штамповки деталей из алюминиевых сплавов на первом этапе заготовка нагревается до 300...400 °С, при этом абсолютная температура газа в цилиндре  $T_{ц1}$  может снижаться до 700...800 К. Поэтому в этом случае  $T_z/T_{ц1} \approx 3$ , то есть абсолютная температура газа в цилиндре снижается примерно в 3 раза. Следовательно, примерно в 3 раза уменьшается и давление газа в цилиндре.

На втором этапе процесса штамповки характер изменения давления в рабочем цилиндре и камере сгорания существенно зависит от способа зажигания топливной смеси в камере сгорания. При искровом зажигании при помощи свечи скорость горения топливной смеси сравнительно невелика. При форкамерно-факельном зажигании скорость горения топливной смеси существенно повышается, это существенно влияет на характер движения поршня и рост давления в рабочем цилиндре.

Рассмотрим сначала процесс, совершающийся при искровом зажигании топливной смеси в камере сгорания. При зажигании топливной смеси в камере сгорания давление в ней начинает повышаться. При этом поршень остается неподвижным. Когда давление в камере сгорания становится выше давления в рабочем цилиндре, поршень начинает перемещаться. При этом ввиду невысокой скорости горения перепад давления между камерой сгорания и рабочим цилиндром невелик. Поэтому поршень не приобретает большую скорость, и при

уравнивании давлений в камере сгорания и рабочем цилиндре поршень останавливается.

Определим увеличение давления в рабочем цилиндре, обусловленное перемещением поршня. Пусть к моменту остановки поршня объем камеры сгорания увеличивается на  $\Delta V$ , соответственно настолько же уменьшается объем рабочего цилиндра. Будем считать, что весь процесс горения в камере сгорания происходит при постоянном объеме. Тогда давление продуктов сгорания будет равно  $P_z$ , которая определяется по зависимости (3.14). Затем продукты сгорания адиабатически расширяются в объеме  $\Delta V$ . Тогда можно записать:

$$P_{k1}V_k^k = P_{k2}(V_k + \Delta V)^k \quad (3.76)$$

где  $P_{k1}, P_{k2}$  – давления в камере сгорания перед началом и в конце движения поршня, Па;

$V_k$  – начальный объем камеры сгорания,  $m^3$ .

Давление  $P_{k1}$  равно давлению конца процесса сгорания в камере сгорания. Это давление равно давлению конца процесса сгорания в рабочем цилиндре, так как давление топливных смесей в камере сгорания и рабочем цилиндре одинаковы. Поэтому можно считать, что  $P_{k1} = P_z$ . Тогда из уравнения (3.76) получим

$$P_{k2} = P_z \left( \frac{V_k}{V_k + \Delta V} \right)^k \quad (3.77)$$

В процессе движения поршня продукты сгорания в рабочем цилиндре сжимаются. Считая этот процесс адиабатическим, можно записать:

$$P_{ц1}V_{ц}^k = P_{ц2}(V_{ц} - \Delta V)^k \quad (3.78)$$

где  $P_{ц1}, P_{ц2}$  – давление в рабочем цилиндре перед началом и в конце движения поршня, Па;

$V_{ц}$  – начальный объем рабочего цилиндра,  $m^3$ .

Отсюда получим

$$P_{ц2} = P_{ц1} \left( \frac{V_{ц}}{V_{ц} - \Delta V} \right)^k \quad (3.79)$$

В момент остановки поршня давление в рабочем цилиндре равно давлению в камере сгорания, т.е.

$$P_{ц2} = P_{к2} \quad (3.80)$$

Тогда из уравнений (3.77), (3.79), (3.80) получим

$$P_z \left( \frac{V_k}{V_k + \Delta V} \right)^k = P_{ц1} \left( \frac{V_{ц}}{V_{ц} - \Delta V} \right)^k \quad (3.81)$$

Отсюда следует, что

$$\left( \frac{P_z}{P_{ц1}} \right)^{\frac{1}{k}} \frac{V_k}{V_k + \Delta V} = \frac{V_{ц}}{V_{ц} - \Delta V} \quad (3.82)$$

Обозначим

$$\Pi = \frac{P_z}{P_{ц1}} \quad (3.83)$$

Тогда из уравнения (3.82) получим

$$\Pi^{\frac{1}{k}} \frac{V_k}{V_k + \Delta V} = \frac{V_{ц}}{V_{ц} - \Delta V} \quad (3.84)$$

После соответствующих преобразований уравнения (3.84) получим

$$\frac{\Delta V}{V_{ц}} = \frac{\vartheta_k (\Pi^{\frac{1}{k}} - 1)}{1 + \vartheta_k \Pi^{\frac{1}{k}}}, \quad (3.85)$$

$$\vartheta_k = \frac{V_k}{V_{ц}}, \quad (3.86)$$

где  $\vartheta_k$  – относительный объем камеры сгорания,  $m^3$ .

Зависимость (3.79) представим в следующем виде

$$P_{ц2} = P_{ц1} \left( \frac{1}{1 - \Delta V/V_{ц}} \right)^k \quad (3.87)$$

Тогда, подставляя в зависимость (3.87) значение  $\Delta V/V_{ц}$  из уравнения (3.85), получим зависимость для определения максимального давления в рабочем цилиндре

$$P_{ц max} = P_{ц1} \left( \frac{1+\vartheta_k \Pi^k}{1+\vartheta_k} \right)^k \quad (3.88)$$

Обозначим

$$\Pi_{ц} = \frac{P_{ц max}}{P_{ц1}}, \quad (3.89)$$

где  $\Pi_{ц}$  – степень мультипликации давления в рабочем цилиндре.

Учитывая уравнение (3.88), зависимость (3.89) можно представить в следующем виде

$$\Pi_{ц} = \left( \frac{1+\vartheta_k \Pi^k}{1+\vartheta_k} \right)^k \quad (3.90)$$

Из этой зависимости следует, что степень мультипликации давления в рабочем цилиндре зависит от относительного объема камеры сгорания  $\vartheta_k$  и начального соотношения давлений камеры сгорания и рабочего цилиндра  $\Pi$ . На рисунке 3.9 представлены графики зависимости степени мультипликации давления в рабочем цилиндре от относительного объема камеры сгорания при различных значениях  $\Pi$  при искровом зажигании топливной смеси

Как видно из этих графиков с увеличением относительного объема камеры сгорания  $\vartheta_k$  величина  $\Pi_{ц}$  непрерывно повышается. В диапазоне значений  $\vartheta_k$  от 0 до 1 величина  $\Pi_{ц}$  интенсивно повышается. Поэтому величина  $\vartheta_k$  должна быть не менее 1. Однако увеличение в  $\vartheta_k$  более 2 также нерационально, так как это ведет к чрезмерному увеличению габаритных размеров устройство для штамповки и уменьшению его экономичности. Поэтому можно считать, что рациональный диапазон значения  $\vartheta_k$  находится в пределах от 1 до 2.

Величина  $\Pi_{ц}$  существенно зависит также от начального соотношения давлений камеры сгорания и рабочего цилиндра, т.е. значение  $\Pi$ . Для случая штамповки стальных деталей величина  $\Pi$  находится в пределах 2,0 ... 2,5. В этом диапазоне значений  $\Pi$  при  $\vartheta_k=1$  величина  $\Pi_{ц}$  составляет 1,4...1,7, т.е. давление в рабочем цилиндре увеличивается в 1,4...1,7 раз.

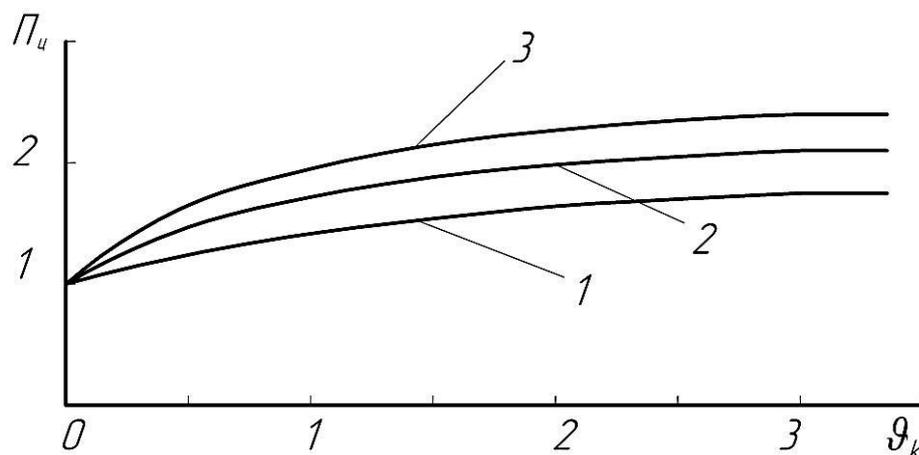


Рисунок 3.9 – Зависимость степени мультипликации давления в рабочем цилиндре от  $v_k$  при искровом зажигании топливной смеси в камере сгорания при различных значениях  $\Pi$ : 1 -  $\Pi = 2$ ; 2 -  $\Pi = 2,5$ ; 3 -  $\Pi = 3$

В случае штамповки алюминиевых сплавов при  $v_k=2$  величина  $\Pi$  составляет 2,5...3. При этих значениях  $\Pi$  давление в рабочем цилиндре увеличивается 1,9...2,3 раза.

В процессе сжатия продуктов сгорания в рабочем цилиндре увеличение давления продуктов сгорания сопровождается повышением температуры. Считая процесс сжатия адиабатическим, степень повышения температуры можно определить следующей зависимостью

$$\bar{T}_{ц} = \frac{T_{ц\ max}}{T_{ц1}} = \left(\frac{P_{ц\ max}}{P_{ц1}}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \Pi_{ц}^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{1+v_k\Pi^{\frac{1}{k}}}{1+v_k}\right)^{(k-1)} \quad (3.91)$$

где  $T_{ц1}, T_{ц\ max}$  – абсолютные температуры продуктов сгорания перед началом и в конце движения поршня,  $K$ .

На рисунке 3.10 представлены графики зависимости степени повышения температуры продуктов сгорания в рабочем цилиндре от относительного объема камеры сгорания при различных значениях  $\Pi$  при искровом зажигании топливной смеси в камере сгорания. Как видно из этих графиков в диапазоне значение  $v_k$  в пределах 1...2 абсолютная температура продуктов сгорания увеличивается в 1,1...1,2 раз в зависимости от значений  $\Pi$ .

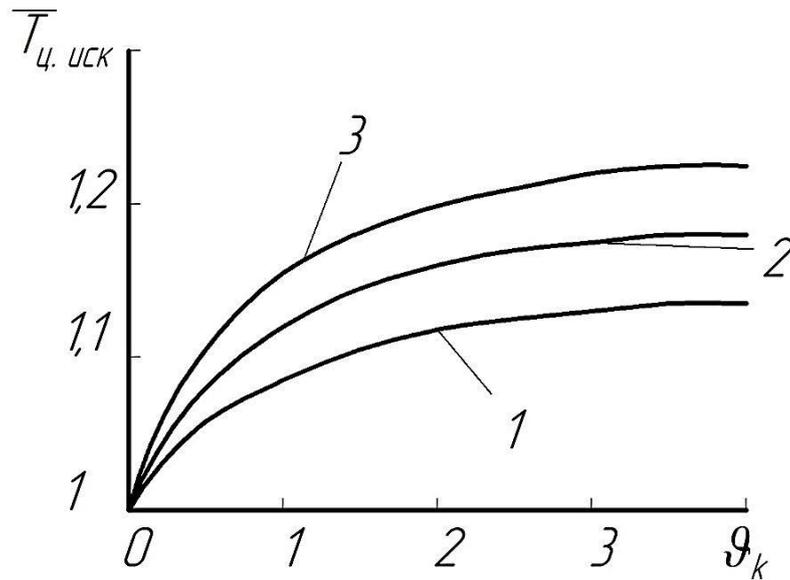


Рисунок 3.10 – Зависимость степени повышения температуры в рабочем цилиндре от  $\vartheta_k$  при искровом зажигании топливной смеси в камере сгорания при различных значениях  $P$ : 1 -  $P = 2$ ; 2 -  $P = 2,5$ ; 3 -  $P = 3$

Длительность процесса сгорания топливной смеси в камере сгорания существенно не отличается от длительности процесса сгорания в рабочем цилиндре. Поэтому длительность процесса горения в камере сгорания можно считать равной  $\tau_z$ . За это время из-за перемещения поршня давление в рабочем цилиндре увеличивается от  $P_{ц1}$  до  $P_{ц max}$ . На рисунке 3.11 представлены графики изменения давления в рабочем цилиндре и камере сгорания (штриховая линия) на первом и втором этапах процесса штамповки. На первом этапе давление в камере сгорания остается постоянным, равным давлению топливной смеси  $P_c$ . Затем в начале второго этапа за время  $\tau_z$  оно увеличивается до  $P_{ц max}$ . В дальнейшем давление в камере сгорания и рабочем цилиндре монотонно снижается.

Рассмотрим теперь закономерность изменения давления в рабочем цилиндре при форкамерно-факельном зажигании топливной смеси в камере сгорания.

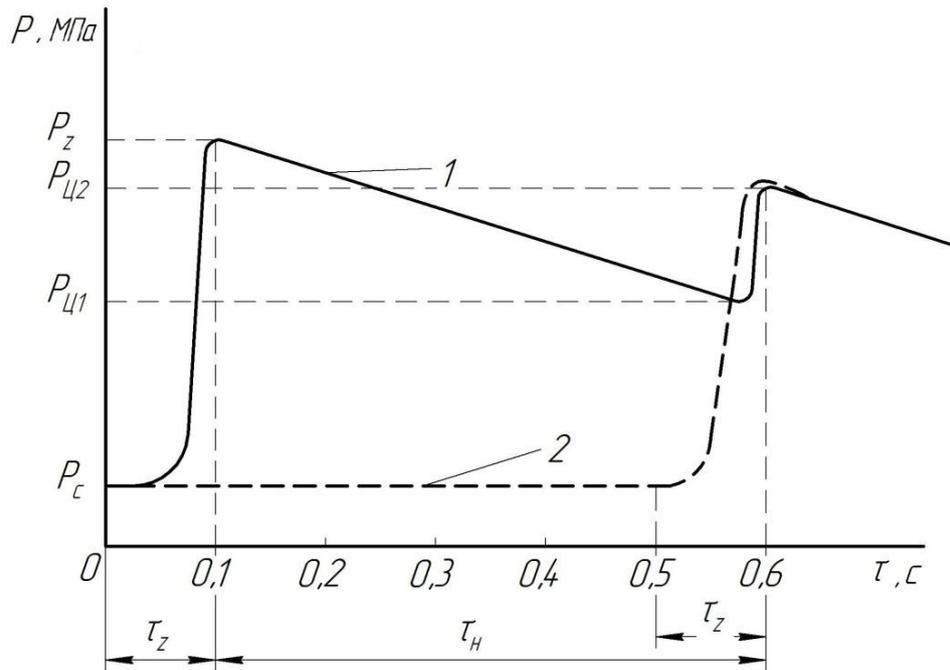


Рисунок 3.11 – Характер изменения давления в рабочем цилиндре на втором этапе процесса штамповки при искровом зажигании топливной смеси в камере сгорания

Устройство газовой штамповки, содержащее форкамеру представлено на рисунке 3.12. Наличие форкамеры обеспечивает интенсивное сгорание топливной смеси и существенное сокращение его длительности. Процесс сгорания топливной смеси в камере сгорания протекает практически при постоянном объеме, поэтому давление продуктов сгорания определяется по зависимости (3.13), а абсолютная температура продуктов сгорания можно определить по следующим зависимости:

$$T_z = T_c \lambda \quad (3.92)$$

где  $T_z, T_c$  – абсолютные температуры продуктов сгорания и топливной смеси,  $K$ ;

$\lambda$  – степень повышения давления при сгорании в постоянном объеме.

При использовании газоздушных топливных смесей  $\lambda = 7 \dots 8$ , при этом абсолютная температура  $T_z$  продуктов сгорания составляет  $2100 \dots 2400 K$ . В

дальнейшем, то есть в процессе нагрева обрабатываемой заготовки, абсолютная температура газа в цилиндре уменьшается до  $T_{ц1}$ .

Так как давление топливных смесей в рабочем цилиндре и камере сгорания одинаковые, то давление и абсолютная температура продуктов сгорания в камере сгорания также определяются зависимостями (3.13) и (3.92). Тогда, учитывая уравнение (3.83), можно заключить, что к началу второго этапа процесса штамповки давление в камере сгорания в  $\Pi$  раз превышает давление в рабочем цилиндре. Согласно вышеизложенному величина  $\Pi$  находится в пределах 2...3.

Рассмотрим рабочий процесс устройства для штамповки в период мультипликации давления в рабочем цилиндре, который начинается при движении поршня. Исследование этого процесса проведем при следующих допущениях: движение поршня начинается после завершения процесса сгорания; отсутствует теплоотвод от газа в стенки рабочего цилиндра и камеры сгорания. Обоснованность этих допущений обусловлено следующими обстоятельствами. Длительность процесса сгорания топливной смеси не превышает 0,01 с. За это время перемещение поршня очень мало, и им можно пренебречь. В процессе движения поршня имеет место теплоотвод от газа к стенкам цилиндра и камеры сгорания, однако при этом тепловые потери сравнительно невелики. В поршневых двигателях внутреннего сгорания они составляют около 10% [79,80].

В данном случае условия аналогичные, поэтому тепловые потери не превышают 10%, и они существенно не влияют на исследуемые нами параметры устройства для штамповки. Перемещение поршня происходит под действием разности давлений между камерой сгорания и рабочим цилиндром.

Исходя из этого, запишем уравнения движения поршня:

$$\frac{dX}{d\tau} = W \quad (3.93)$$

$$\frac{dw}{d\tau} = \frac{f_{ц}}{m} (P_{к} - P_{ц}) \quad (3.94)$$

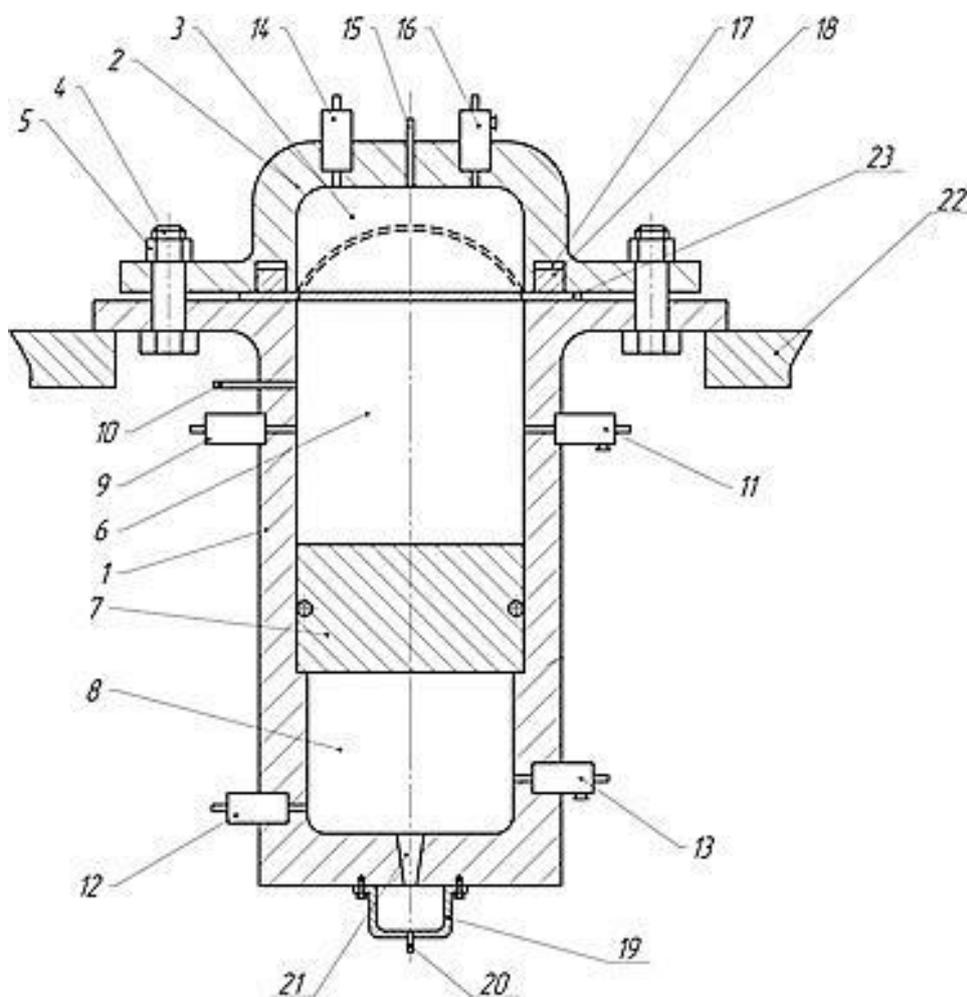
где  $X$ ,  $W$  – перемещение и скорость поршня;

$m$  – масса поршня, кг;

$\tau$  – время, с.

$P_k, P_{ц}$  – текущие значения давления в камере сгорания и рабочем цилиндре, Па;

$f_{ц}$  – площадь поперечного сечения цилиндра,  $m^2$ ;



- 1 – корпус; 2 – матрица; 3 – внутренняя полость; 4 – болты; 5 – гайки;  
 6 – рабочий цилиндр; 7 – поршень; 8 – камера сгорания;  
 9, 12, 14 – впускные клапаны; 10, 15, 20 – свечи зажигания;  
 11, 13, 16 – выпускные клапаны; 17 – кольцевая полость;  
 18 – кольцевой поршень; 19 – форкамера; 21 – канал форкамеры  
 22 – опора; 23 – заготовка.

Рисунок 3.12 – Схема устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления, снабженным форкамерой

В процессе движения поршня в камере сгорания происходит адиабатическое расширение газа, а в рабочем цилиндре происходит адиабатическое сжатие газа. При этом объем камеры сгорания увеличивается на  $f_{ц}X$ , а объем рабочего цилиндра уменьшается на такую же величину. Тогда, учитывая, что  $P_{к1} = P_z$  и используя известные зависимости адиабатического процесса [81], можно записать:

$$P_k = P_{к1} \left( \frac{V_k}{V_k + f_{ц}X} \right)^k = P_z \left( \frac{1}{1 + f_{ц}X/V_k} \right)^k \quad (3.95)$$

$$P_{ц} = P_{ц1} \left( \frac{f_{ц}h}{f_{ц}h - f_{ц}X} \right)^k = P_{ц1} \left( \frac{1}{1 - X/h} \right)^k \quad (3.96)$$

где  $P_{к1}$  – давление газа в камере сгорания перед началом движения поршня,

$$P_{к1} = P_z, \text{ Па};$$

$$V_k – \text{начальный объем камеры сгорания, м}^3;$$

$$h – \text{начальная высота цилиндра, м};$$

$$k – \text{показатель адиабаты продуктов сгорания.}$$

Введем следующие безразмерные величины:

$$\bar{P}_k = \frac{P_k}{P_z}, \quad \bar{P}_{ц} = \frac{P_{ц}}{P_z}, \quad x = \frac{X}{h}, \quad \bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_z}, \quad \bar{w} = \frac{t_z}{h} W, \quad v_k = \frac{V_k}{f_{ц}h},$$

где  $\bar{P}_k, \bar{P}_{ц}$  – безразмерные давления газа в камере сгорания и цилиндре;

$x$  – относительное перемещение поршня;

$\bar{w}$  – безразмерная скорость поршня;

$\bar{\tau}$  – безразмерное время;

$\tau_z$  – характерное время, равное длительности процесса сгорания в рабочем цилиндре, с;

$v_k$  – относительный объем камеры сгорания.

Подставляя эти величины в уравнения (3.93) – (3.96), получим следующую систему безразмерных уравнений:

$$\frac{dx}{d\bar{\tau}} = \bar{w} \quad (3.97)$$

$$\frac{d\bar{w}}{d\bar{\tau}} = N(\bar{P}_K - \bar{P}_Ц) \quad (3.98)$$

$$\bar{P}_K = \left( \frac{1}{1 + x/\vartheta_k} \right)^k \quad (3.99)$$

$$\bar{P}_Ц = \frac{1}{\Pi} \frac{1}{(1-x)^k} \quad (3.100)$$

$$N = \frac{\tau_z^2 f_Ц P_K}{mh} \quad (3.101)$$

Начальные условия дифференциальных уравнений (3.97) и (3.98) имеют следующий вид:

$$\text{при } \bar{\tau} = 0, x = 0, \bar{w} = 0 \quad (3.102)$$

Система безразмерных уравнений (3.97) – (3.101) в совокупности с начальными условиями (3.102) описывают движение поршня и изменение параметров газа в камере сгорания и цилиндре. Преобразуем уравнение (3.98). Так как:

$$\frac{d\bar{w}}{d\bar{\tau}} = \frac{dx}{d\bar{\tau}} \frac{d\bar{w}}{dx} = \bar{w} \frac{d\bar{w}}{dx} = \frac{d\frac{\bar{w}^2}{2}}{dx}$$

Подставляя это в уравнение (3.98), получим:

$$\frac{1}{2} \frac{d\bar{w}^2}{dx} = N(\bar{P}_K - \bar{P}_Ц)$$

Отсюда будем иметь:

$$\frac{1}{2} d\bar{w}^2 = N(\bar{P}_K - \bar{P}_Ц) dx$$

Тогда учитывая уравнения (3.99) и (3.100), получим:

$$\frac{1}{2} d\bar{w}^2 = N \left( \frac{1}{(1 + x/\vartheta_k)^k} - \frac{1}{\Pi} \frac{1}{(1-x)^k} \right) dx$$

Интегрируя обе части этого уравнения, получим:

$$\frac{1}{2} \bar{w}^2 = \frac{N\vartheta_k}{1-k} \left( 1 + \frac{x}{\vartheta_k} \right)^{1-k} + \frac{N}{\Pi(1-k)} (1-x)^{1-k} + C \quad (3.103)$$

Постоянную интегрирования  $C$  определим, исходя из условия:

при  $x = 0$   $\bar{w} = 0$ . Тогда из уравнения (3.103) получим:

$$0 = \frac{N\vartheta_k}{1-k} + \frac{N}{\Pi(1-k)} + C$$

$$\text{Отсюда: } C = -\frac{N\vartheta_k\Pi+N}{\Pi(1-k)}$$

Подставляя это в уравнение (3.103), получим закон изменения скорости поршня по ходу его движения:

$$\bar{w} = \left( \frac{2N}{\Pi(k-1)} \left( \vartheta_k\Pi + 1 - \frac{\vartheta_k\Pi}{\left(1+\frac{x}{\vartheta_k}\right)^{k-1}} - \frac{1}{(1-x)^{k-1}} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.104)$$

Дальнейшее интегрирование полученной зависимости для определения скорости и перемещения поршня в функции от времени не представляется возможным, поэтому общее решение системы уравнений (3.97) – (3.101) может быть получено только численными методами, например методом Рунге-Кутты [82].

Используя зависимость (3.104), определим максимальный относительный ход поршня  $x$ , то есть до его остановки, при которой имеет место максимальное сжатие газа в рабочем цилиндре. Считая  $\bar{w} = 0$ , из уравнения (3.104) получим:

$$v_k\Pi + 1 - \frac{\vartheta_k\Pi}{\left(1+\frac{x}{\vartheta_k}\right)^{k-1}} - \frac{1}{(1-x)^{k-1}} = 0 \quad (3.105)$$

Обозначим:

$$\psi = \vartheta_k\Pi \left( 1 - \frac{1}{\left(1+\frac{x}{\vartheta_k}\right)^{k-1}} \right) \quad (3.106)$$

$$\varphi = \frac{1}{(1-x)^{k-1}} - 1 \quad (3.107)$$

Тогда уравнение (3.105) можно представить в следующем виде:

$$f = \varphi \quad (3.108)$$

Решение уравнения (3.108) проведено графически. Согласно зависимостям (3.106) и (3.107) величина  $f$  зависит от  $x, \vartheta_k, \Pi$ , а величина  $\varphi$  зависит только от  $x$ . На рисунке 3.13 представлены графики зависимости  $\varphi$  и  $f$  от  $x$  при  $\Pi = 3$  и различных значениях  $v_k$ .

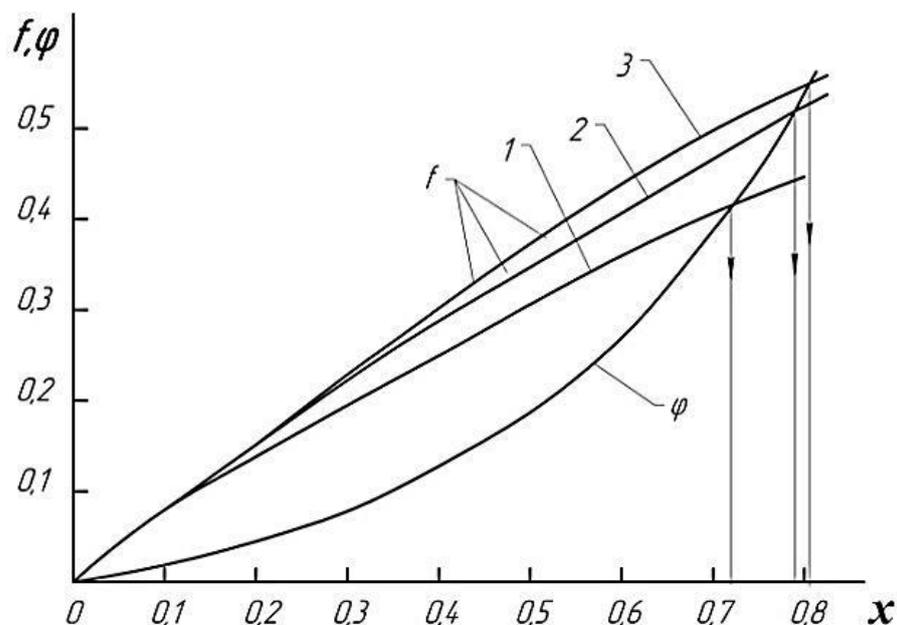


Рисунок 3.13 – Графическое решение уравнения (3.94) при  $\Pi = 3$  и различных значениях  $\vartheta_k$

Точки пересечения графиков  $\varphi$  с графиками  $f$  определяют искомые значения  $x$ , то есть  $x = x_k$ , являющиеся решениями уравнения (3.108).

По этим графикам определены значения  $x_k$  и для этих случаев. По найденным значениям  $x_k$  построены графики зависимости  $x_k$  от  $\vartheta_k$  при различных значениях  $\Pi$  (рисунок 3.14) как видно из этих графиков с ростом  $\vartheta_k$  величина  $x_k$  увеличивается, но при  $\vartheta_k > 2,5$  интенсивность роста  $x_k$  существенно снижается.

Величина  $x_k$  определяет максимальное сжатие газа в рабочем цилиндре. Тогда, учитывая, что  $x = X/h$ , из зависимости (3.96) получим выражение для определения максимального давления газа в цилиндре:

$$P_{ц\ max} = \frac{P_{ц1}}{(1-x_k)^k} \quad (3.109)$$

Тогда степень повышения давления газа в рабочем цилиндре равна:

$$\Pi_{ц} = \frac{P_{ц\ max}}{P_{ц1}} = \frac{1}{(1-x_k)^k} \quad (3.110)$$

Так как  $x_k$  существенно зависит от  $\vartheta_k$  и  $\Pi$ , то и степень повышения давления  $\Pi_{ц}$  зависит от этих величин.

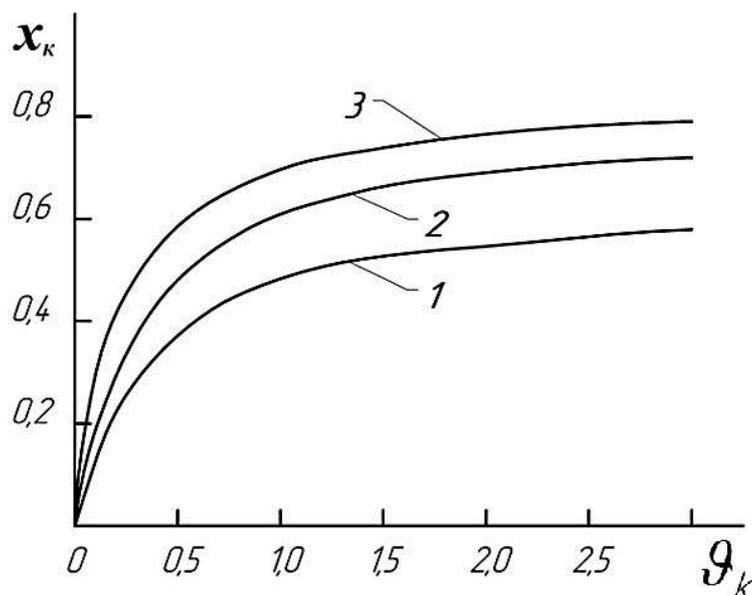


Рисунок 3.14– Зависимость  $x_k$  от  $v_k$  при различных значениях  $\Pi$ :

1 -  $\Pi = 2$ ; 2 -  $\Pi = 2,5$ ; 3 -  $\Pi = 3$

На рисунке 3.15 представлены графики зависимости  $\Pi_{ц}$  от  $v_k$  при различных значениях  $\Pi$ . Из этих графиков видно, что с увеличением относительного объема камеры сгорания  $v_k$  степень повышения давления в цилиндре  $\Pi_{ц}$  непрерывно увеличивается, но при  $v_k > 2$  интенсивность ее роста существенно снижается. Исходя из этого и учитывая увеличение габаритных размеров камеры сгорания с ростом  $v_k$ , можно считать оптимальными значения  $v_k$  в пределах  $1 \dots 2$ . При  $v_k=1$  и  $\Pi=2$  давление повышается в 2,5 раза. При  $\Pi=2,5$  и  $\Pi=3$  в диапазоне изменения  $v_k$  от 1 до 2 давление газа в рабочем цилиндре повышается в  $4 \dots 6$  раз.

Первоначальное соотношение давлений между камерой сгорания и рабочим цилиндром  $\Pi$  существенно влияет на степень повышения давления в цилиндре  $\Pi_{ц}$ . Чем больше  $\Pi$ , тем выше и  $\Pi_{ц}$ . В частности, при  $v_k = 2,5$  величина  $\Pi_{ц}$  в  $2 \dots 2,5$  раза превышает  $\Pi$ . Следовательно, во столько же раз максимальное давление газа в рабочем цилиндре превышает максимальное давление газа в камере сгорания. Это давление, действуя на поверхность штампуемой заготовки, обеспечивает дальнейшую ее деформацию. Причем, максимальное давление газа действует в конечной стадии процесса штамповки, когда усилие деформирования заготовки достигает максимального значения.

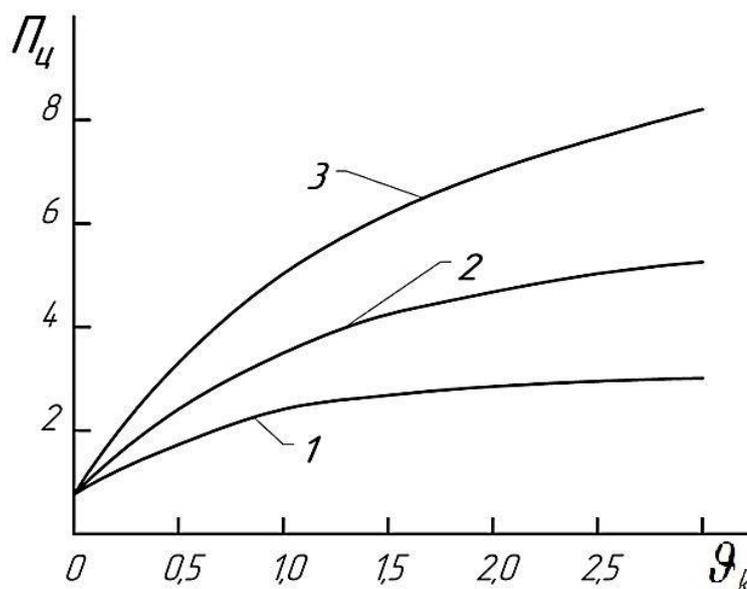


Рисунок 3.15 – Зависимость степени повышения давления газа в рабочем цилиндре от относительного объема камеры сгорания  $v_k$  при форкамерно-факельном зажигании топливной смеси в камере сгорания при разных значениях  $\Pi$ : 1 -  $\Pi = 2$ ; 2 -  $\Pi = 2,5$ ; 3 -  $\Pi = 3$

П: 1 -  $\Pi = 2$ ; 2 -  $\Pi = 2,5$ ; 3 -  $\Pi = 3$

Это дает возможность увеличить в 2...3 раза толщину штампуемых деталей. На рисунке 3.16 представлен характер изменения давления в рабочем цилиндре на втором этапе процесса штамповки.

Сжатие газа в рабочем цилиндре сопровождается увеличением температуры газа. Используя известные соотношения между давлением и температурой для адиабатического процесса [81] и зависимость (3.96), закон изменения температуры газа в рабочем цилиндре в процессе движения поршня можно представить в следующем виде:

$$T_{ц} = T_{ц1} \left( \frac{1}{(1-x/h)} \right)^{k-1} \quad (3.111)$$

где  $T_{ц1}$  – абсолютная температура газа в цилиндре перед началом движения поршня,  $K$ .

Тогда, учитывая, что  $x = X/h$ , степень повышения абсолютной температуры газа в цилиндре можно представить в следующем виде:

$$\bar{T}_{ц} = \frac{T_{ц}}{T_{ц1}} = \left( \frac{1}{(1-x)} \right)^{k-1} \quad (3.112)$$

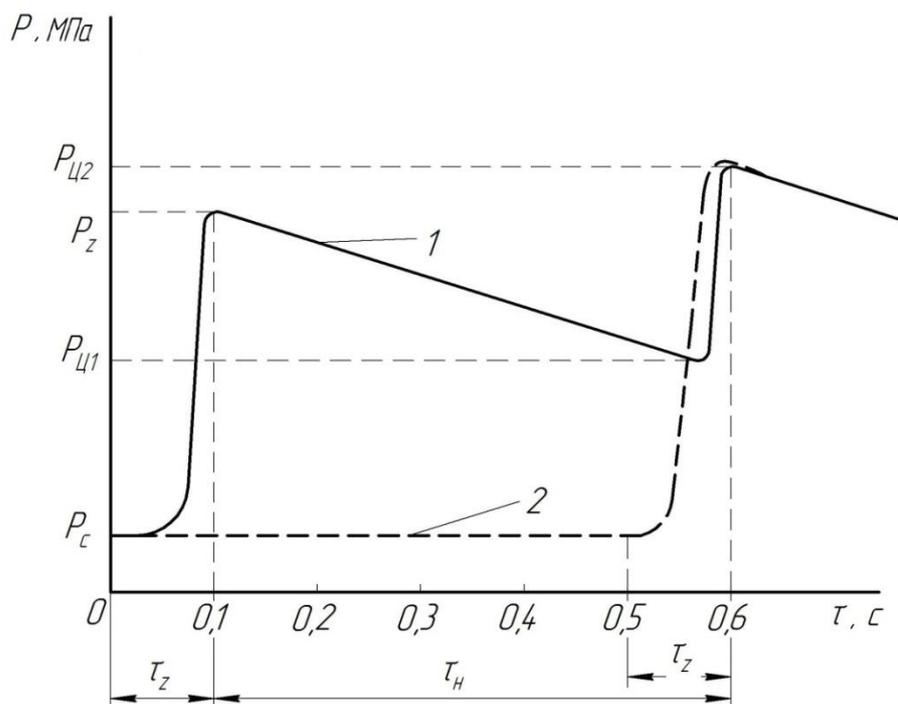


Рисунок 3.16 – Характер изменения давления в рабочем цилиндре на втором этапе процесса штамповки при форкамерно-факельном зажигании топливной смеси в камере сгорания

Подставляя  $x = x_k$  в зависимость (3.112), получим выражение для определения максимальной степени повышения температуры в рабочем цилиндре:

$$\bar{T}_{ц max} = \frac{T_{ц max}}{T_{ц1}} = \left( \frac{1}{(1-x_k)} \right)^{k-1} \quad (3.113)$$

На рисунке 3.17. представлены графики, построенные по зависимости (3.113). При этом значения  $x_k$  взяты из графиков на рисунке 3.14. Из графиков видно, что максимальная температура газа в цилиндре существенно зависит от величин  $v_k$  и  $\Pi$ , с ростом этих параметров температура газа повышается. В частности при  $v_k = 2,5$  в зависимости от значения  $\Pi$  температура газа повышается в 1,3...1,5 раза. Это обеспечивает интенсивный нагрев штампуемой заготовки до достижения интервала температур горячей обработки. При этом следует отметить, что интенсивному нагреву заготовки способствует также увеличение коэффициента теплоотдачи, обусловленное увеличением давления газа [83].

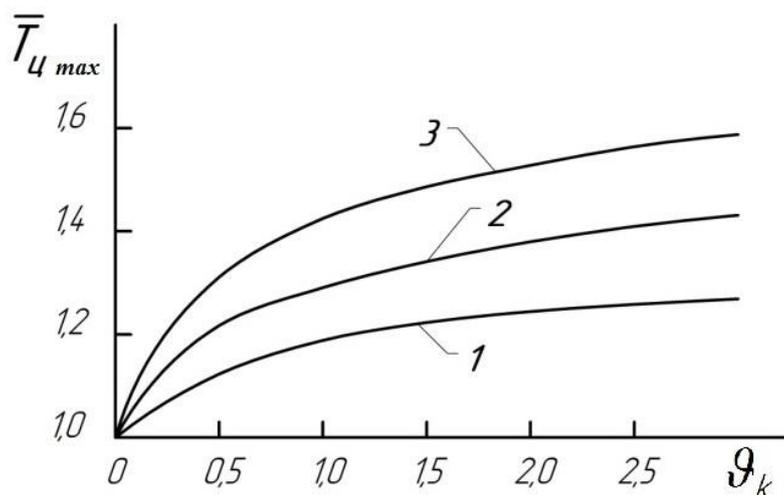


Рисунок 3.17 – Зависимость степени повышения температуры газа в цилиндре от  $\vartheta_k$  при форкамерно-факельном зажигании топливной смеси при различных значениях  $\Pi$ : 1 -  $\Pi = 2$ ; 2 -  $\Pi = 2,5$ ; 3 -  $\Pi = 3$ .

Условия теплообмена между газом и заготовкой на втором этапе процесса штамповки такие же, как и на первом этапе. Поэтому для определения температуры заготовки на втором этапе может быть использована зависимость (3.52), но при этом необходимо учесть нагрев заготовки на первом этапе, а так же иметь ввиду, что начальная температура газа равна не  $T_z$ , а  $T_{ц2}$ . Для учета этого определяем температуру газа в конце первого этапа процесса штамповки, используя уравнение (3.46), то есть

$$t_{r1} = t_z - \xi(t_{3_1} - t_{3_0}) \quad (3.114)$$

где  $t_{3_1}$  – температура заготовки в конце первого этапа.

Определяем абсолютную температуру газа в цилиндре расширения в конце первого этапа.

$$T_{ц1} = t_{r1} + 273 \quad (3.115)$$

Используя зависимость (3.113) определяем максимальную абсолютную температуру газа на втором этапе

$$T_{ц max} = T_{ц1} * \bar{T}_{ц max} = \bar{T}_{ц max} (t_{r1} + 273) \quad (3.116)$$

Определяем максимальную температуру газа на втором этапе

$$t_{r2} = T_{ц max} - 273 = \bar{T}_{ц max} (t_{r1} + 273) - 273 \quad (3.117)$$

Величина  $\bar{T}_{ц max}$  определяется, используя графики 3.16. При этом начальное соотношение давлений между камерой сгорания и рабочим цилиндром вычисляется по следующей зависимости

$$\Pi = \frac{t_z + 273}{t_{r1} + 273} \quad (3.118)$$

С учетом изложенного (3.52) для определения температуры заготовки применительно к второму этапу процесса штамповки может быть представлена в следующем виде:

$$t_3 = \frac{1}{\xi + 1} \left[ t_{r1} \left( 1 - e^{-\frac{2\alpha(\xi+1)}{\rho_3 c_3 \delta} \tau} \right) + t_{31} \left( \xi + e^{-\frac{2\alpha(\xi+1)}{\rho_3 c_3 \delta} \tau} \right) \right] \quad (3.119)$$

Для заготовки диаметром 160 мм был проведен расчет и построены графики зависимости температуры  $t$  стальной заготовки толщиной 1,0 мм от времени нагрева толщиной 1 мм при разных давлениях топливной смеси (рисунок 3.18).

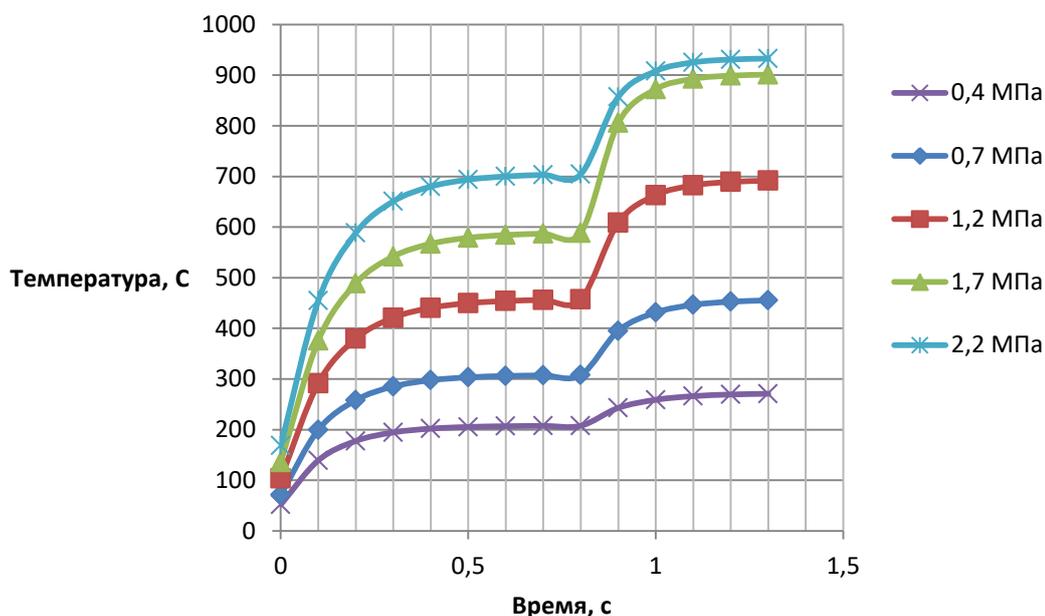


Рисунок 3.18 – Графики зависимости температуры стальной заготовки диаметром 160 мм толщиной 1,0 мм от времени при разных давлениях топливной смеси в конце второго этапа процесса штамповки.

Был проведен расчет и построены графики зависимости температуры  $t$  стальной заготовки толщиной 1,0 мм от времени при давлении топливной смеси для разных диаметров заготовок (рисунок 3.19).

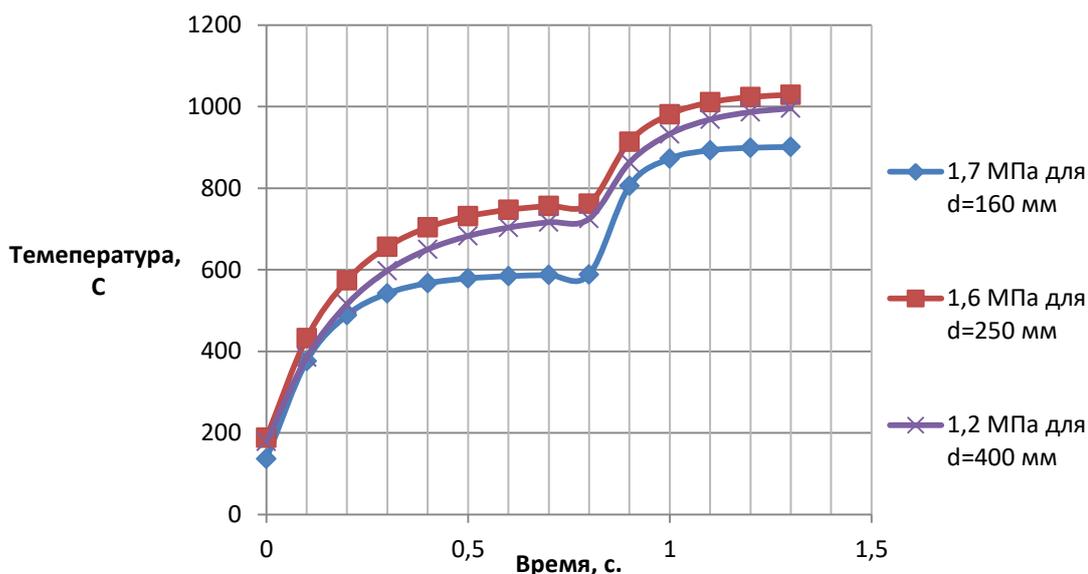


Рисунок 3.19 – Графики зависимости температур нагрева стальных заготовок толщиной 1,0 мм от времени при разных давлениях топливных смеси для разных диаметров заготовок на первом и втором этапах процесса штамповки

### Заключение по разделу

1. В устройстве газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления процесс штамповки осуществляется в два этапа: на первом этапе нагрев и деформация заготовки осуществляется за счет энергии продуктов сгорания, образующихся в рабочем цилиндре, а на втором этапе – за счет энергии продуктов сгорания, образующихся в камере сгорания.

2. На первом этапе процесса штамповки при сгорании топливной смеси в рабочем цилиндре давление увеличивается в 7...8 раз, в дальнейшем в процессе нагрева заготовки давление монотонно снижается, закон его снижения можно считать линейным. Температура нагрева заготовки существенно зависит от времени нагрева, давления топливной смеси и геометрических и теплофизических параметров заготовки. Получена зависимость для расчета температуры нагрева заготовки. Оптимальная длительность процесса заготовки составляет 0,5...0,8 с.

3. На втором этапе процесса штамповки благодаря сжатию продуктов сгорания при перемещении поршня происходит существенное повышение давления в рабочем цилиндре, которое непосредственно передается на

штампующую заготовку. При этом степень мультипликации давления в рабочем цилиндре зависит от способа зажигания топливной смеси в камере сгорания, а также от величины относительного объема камеры сгорания, оптимальные значения которого находятся в пределах 1...2 [84]. При искровом зажигании топливной смеси в камере сгорания давление в рабочем цилиндре в конечной стадии процесса штамповки увеличивается в 1,4...1,7 раза в зависимости от величины  $\vartheta_k$ , а при форкамерно-факельном зажигании – в 4...6 раз, что дает возможность в 2...3 раза увеличить толщину штампуемых деталей.

4. На втором этапе процесса штамповки увеличение давления продуктов сгорания в рабочем цилиндре сопровождается повышением их температуры. При искровом зажигании топливной смеси в камере сгорания абсолютная температура продуктов сгорания увеличивается в 1,1...1,2 раза, а при форкамерно-факельном зажигании в 1,3...1,5 раза. Это обеспечивает повышение температуры нагрева заготовки.

## 4. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ УСТРОЙСТВА ГАЗОВОЙ ШТАМПОВКИ С ПОРШНЕВЫМ МУЛЬТИПЛИКАТОРОМ ДАВЛЕНИЯ

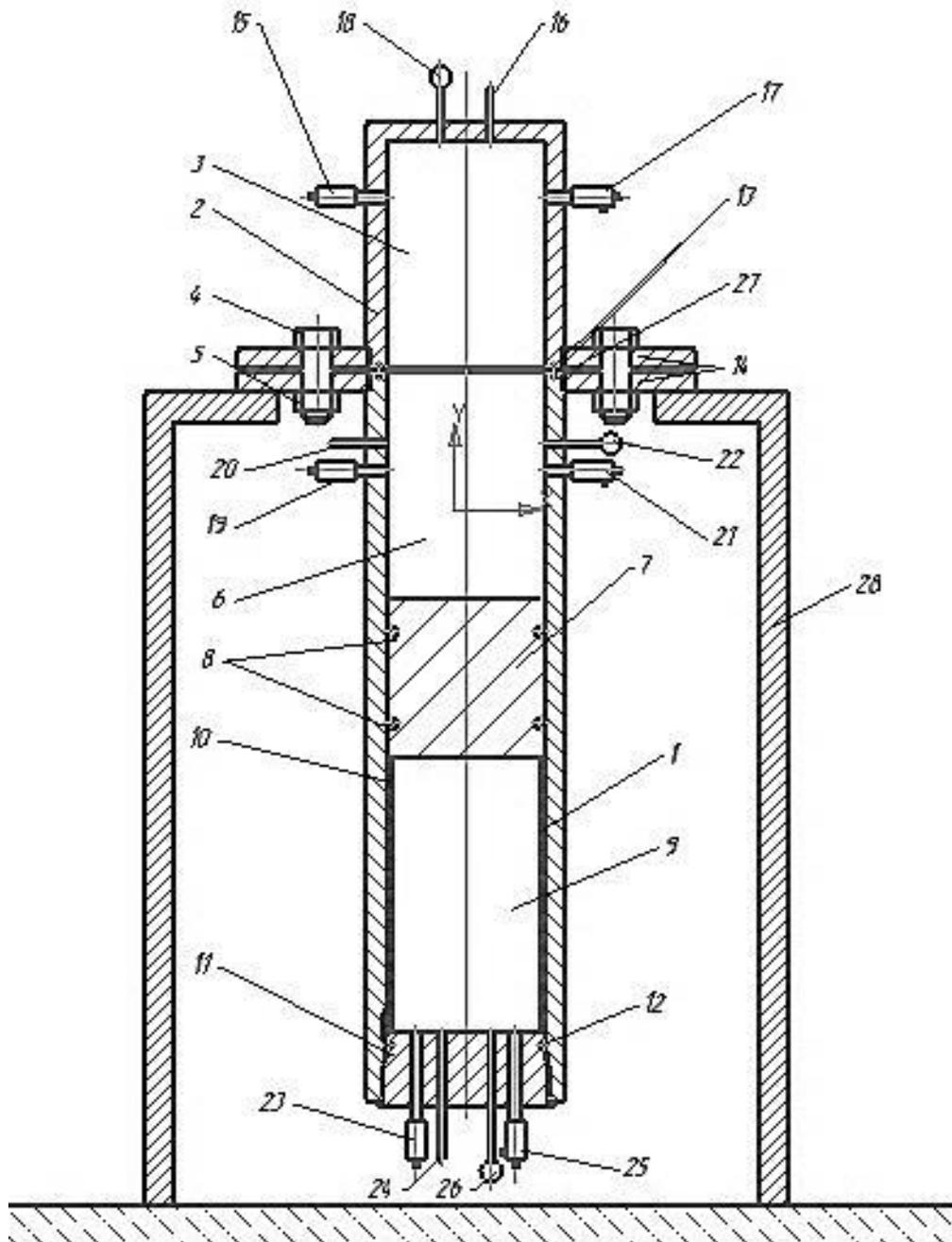
### 4.1 Разработка и создание устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления

Для практической апробации результатов теоретических исследований и конструктивной схемы устройства было разработано и создано устройство газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления, схема которого представлена на рисунке 4.1. Данная схема по принципу работы идентична схеме представленной на рисунке 2.6, но более технологична для изготовления. Рабочий цилиндр 6 и камера сгорания 9 расположены в едином корпусе 1, выполненном из трубчатой заготовки из стали 40Х ГОСТ 8732-78. Дно камеры сгорания выполнено разъемной. Матрица так же выполнена из трубчатой заготовки из стали 40Х. Дно матрицы образовано сваркой к ней диска из стали 45 ГОСТ 19903-74 толщиной 20 мм.

Для установки на матрице, рабочем цилиндре свеч зажигания, впускных клапанов, выпускных клапанов для измерения давлений были проточены бобышки с соответствующими диаметрами и шагами резьбы. После чего бобышки были приварены в отверстия матрицы, рабочего цилиндра.

При разработке конструкции устройства газовой штамповки стремились предотвратить возникновения дополнительных термических напряжений, обусловленных нагревом стенок устройства. С этой целью сочленение матрицы с рабочим цилиндром выполнено при помощи фланцевого соединения. Благодаря этому стенки матрицы, рабочего цилиндра и камеры сгорания при нагреве могут беспрепятственно удлиняться, не вызывая появления термических напряжений.

При определении размеров устройства газовой штамповки за базу приняты размеры рабочего цилиндра



- 1 – корпус; 2 – матрица; 3 – полость матрицы; 4 – болт; 5 – гайка;  
 6 – рабочий цилиндр; 7 – поршень; 8 – поршневые кольца;  
 9 – камера сгорания; 10 – гильза; 11 – крышка камеры сгорания;  
 12, 13 – уплотнительные кольца; 14 – фланец;  
 15, 19, 23 – впускные клапаны; 16, 20, 24 – свечи зажигания;  
 17, 21, 25 – выпускные клапаны; 18, 22, 26 – клапаны для измерения  
 давлений; 27 – заготовка; 28 – подставка

Рисунок 4.1 – Схема экспериментального устройства

С целью апробации возможности штамповки изделий малых размеров, внутренний диаметр рабочего цилиндра принят равным 160 мм. Высота внутренней полости рабочего цилиндра принята равной 230 мм. При меньшей высоте трудно обеспечить нагрев заготовок толщиной более 1 мм, так как требуется чрезмерно высокое давление топливной смеси. Диаметр камеры сгорания равен диаметру рабочего цилиндра. Предусмотрена возможность регулирования высоты камеры сгорания. Для этого поршень установлен на гильзе. Установка между поршнем и гильзой кольца позволяет регулировать высоту камеры сгорания в пределах 20-60 мм. При этом соотношение объемов камеры сгорания и рабочего цилиндра изменяется в пределах 1...1,5, что находится в диапазоне оптимальных значений этого соотношения, найденное при теоретическом анализе.

Толщина стенок матрицы, рабочего цилиндра и камеры сгорания принята одинаковой, равной 20 мм. Она установлена из результатов прочностного расчета. Управляющие клапаны системы топливоподачи устройства газовой штамповки допускают давление газа и воздуха 0,9 МПа. При этом максимальное давление топливной смеси составляет 0,7 МПа. При таком давлении топливной смеси давление продуктов сгорания составляет 6...7 МПа. Поэтому расчет на прочность проведен при давлении 7 МПа. В приложении 1 представлены расчетные значения деформаций и напряжений, возникающих в корпусе рабочего цилиндра и камеры сгорания, при давлении 7 МПа, выполненные по программе SolidWorks 2013. На рисунках 4.2-4.5 представлены чертежи корпуса, поршня матрицы и крышки камеры сгорания. Чертежи остальных деталей устройства представлены в приложениях 2-4.

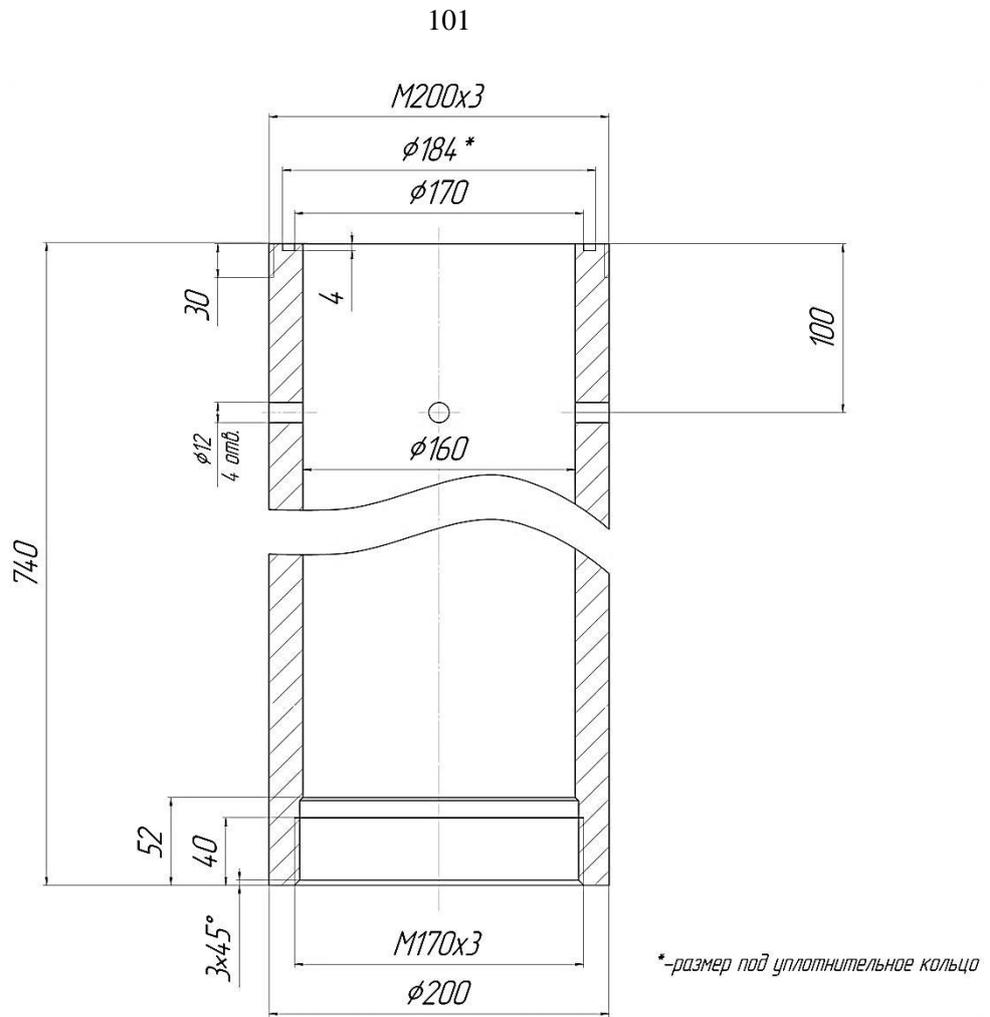


Рисунок 4.2 – Корпус

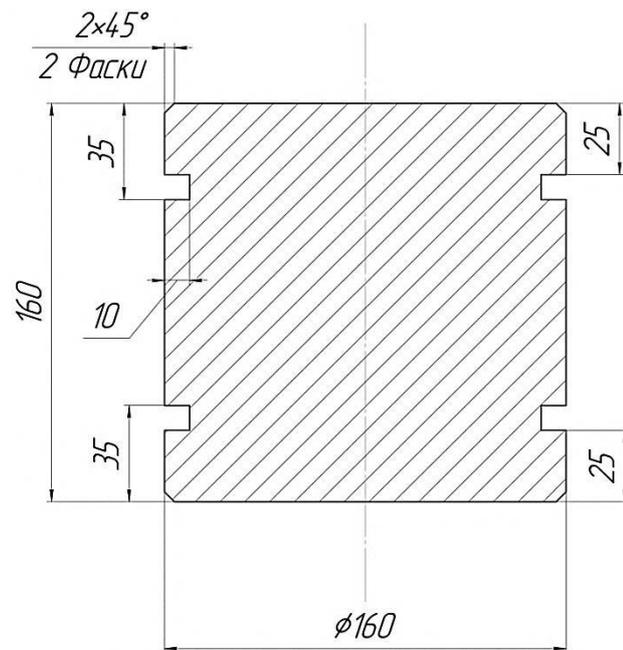


Рисунок 4.3 – Поршень

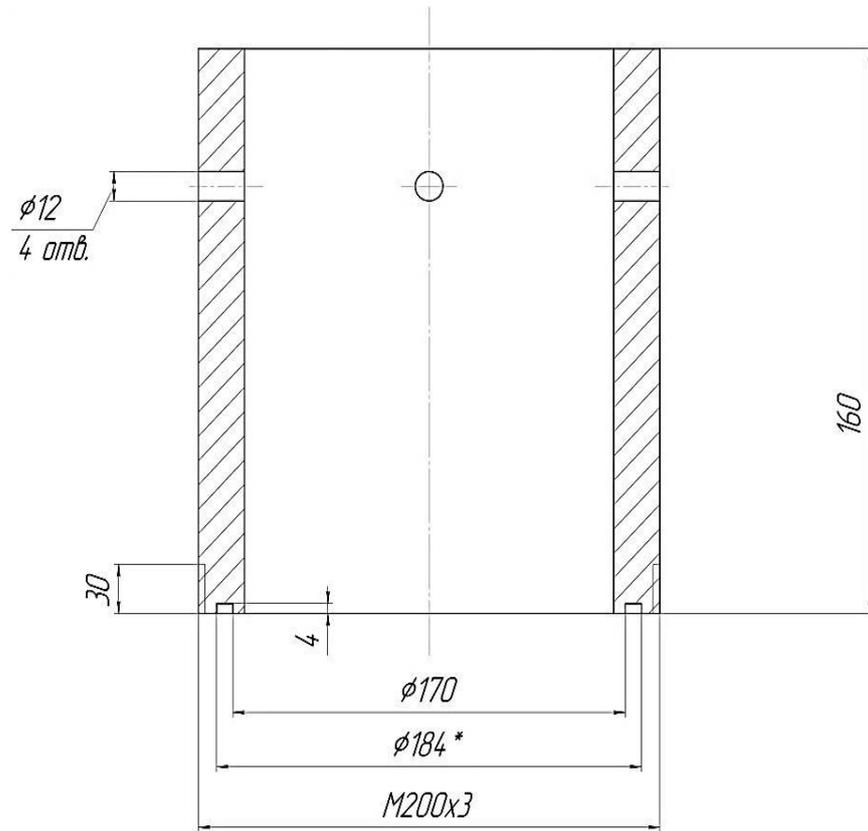
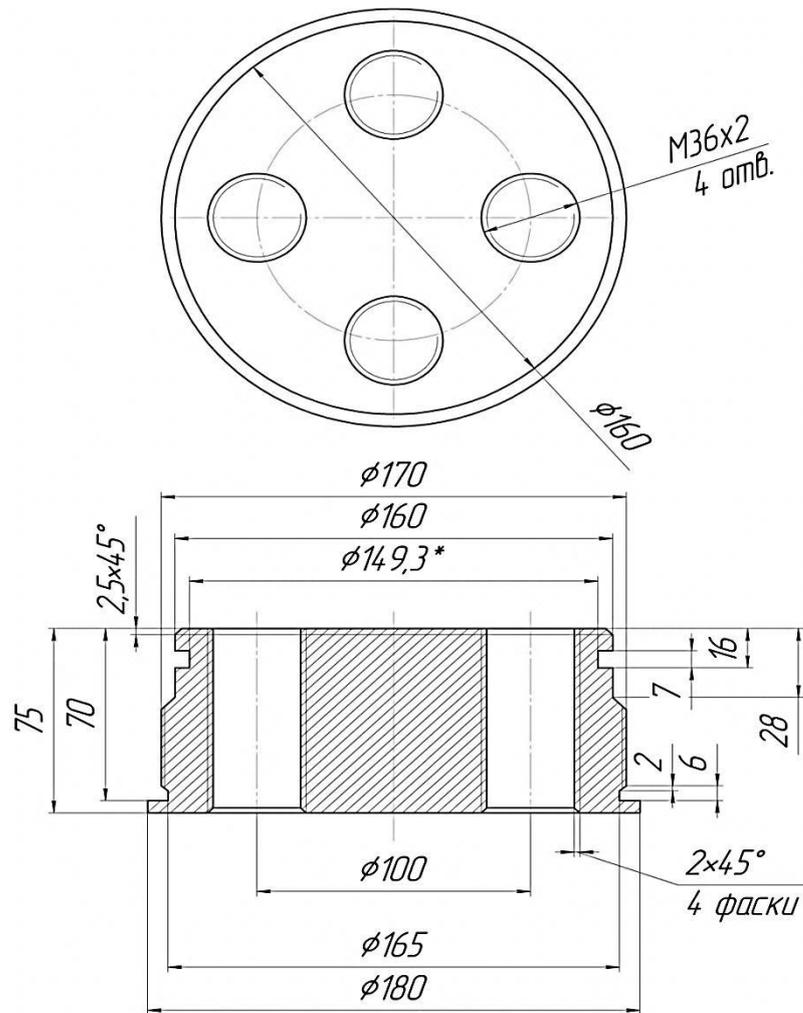


Рисунок 4.4 – Матрица



\*-Размер под уплотняющее кольцо

Рисунок 4.5 – Крышка камеры сгорания

Система топливоподачи установки снабжена электропневматическими клапанами для подачи компонентов топливной смеси в матрицу, рабочий цилиндр и камеру сгорания. Она содержит так же обратные клапана для предотвращения обратного движения топливной смеси. Подача горючего газа производится из баллона с пропан-бутановой смесью. Нагнетание сжатого воздуха производится компрессором снабженным ресивером. Максимальное нагнетаемое давление воздуха 0,9 МПа. Система зажигания, снабжена трансформатором для подачи на свечу зажигания тока. Все подводящие к установке рукава марки I-8-4-ГОСТ 9356-75 (рисунок 4.6).

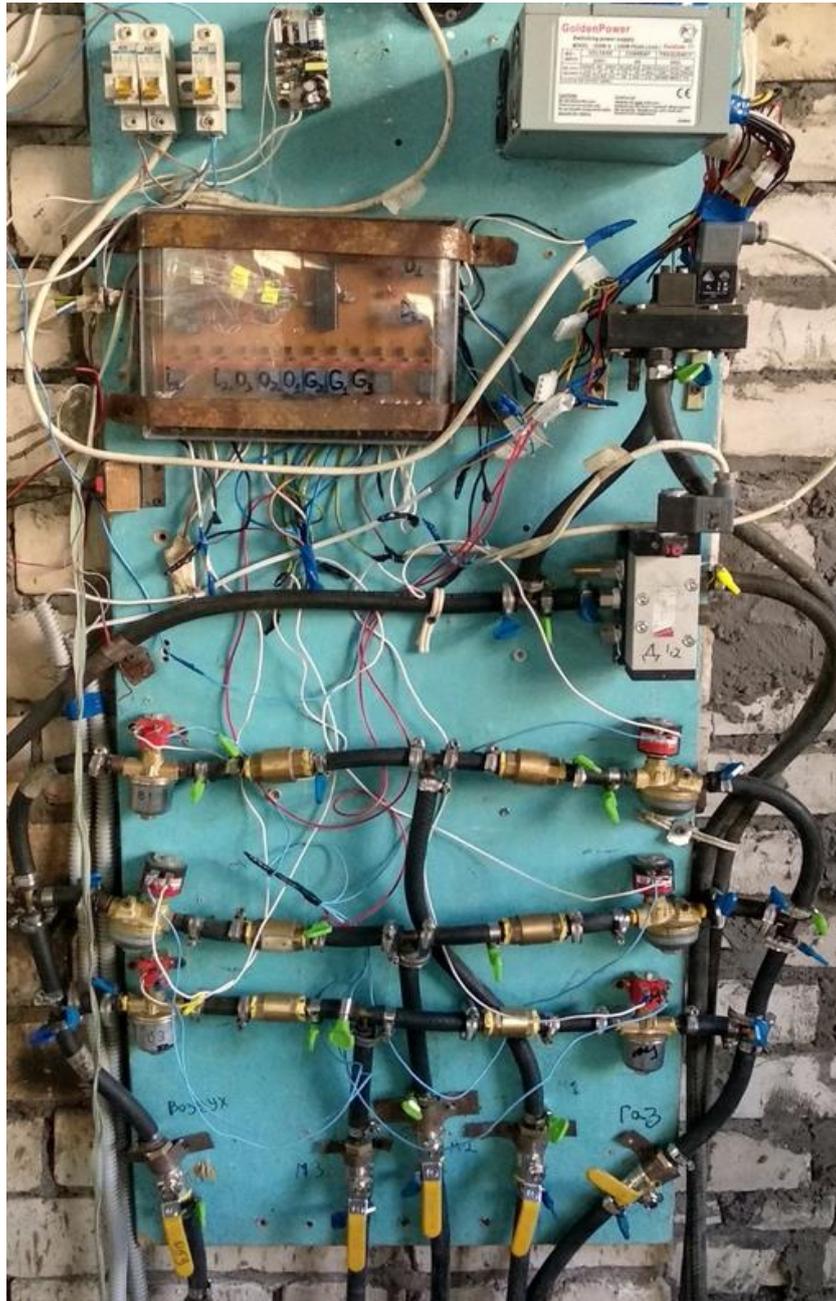


Рисунок 4.6– Система топливоподачи

Программирование работы установки осуществляется с помощью разработанной операционной системы на языке программирования Assembler, работающей на управляющей плате, состоящей из микроконтроллера Atmega16a, электрических реле, транзисторов, светодиодов, резисторов и оптопар (рисунок 4.7).

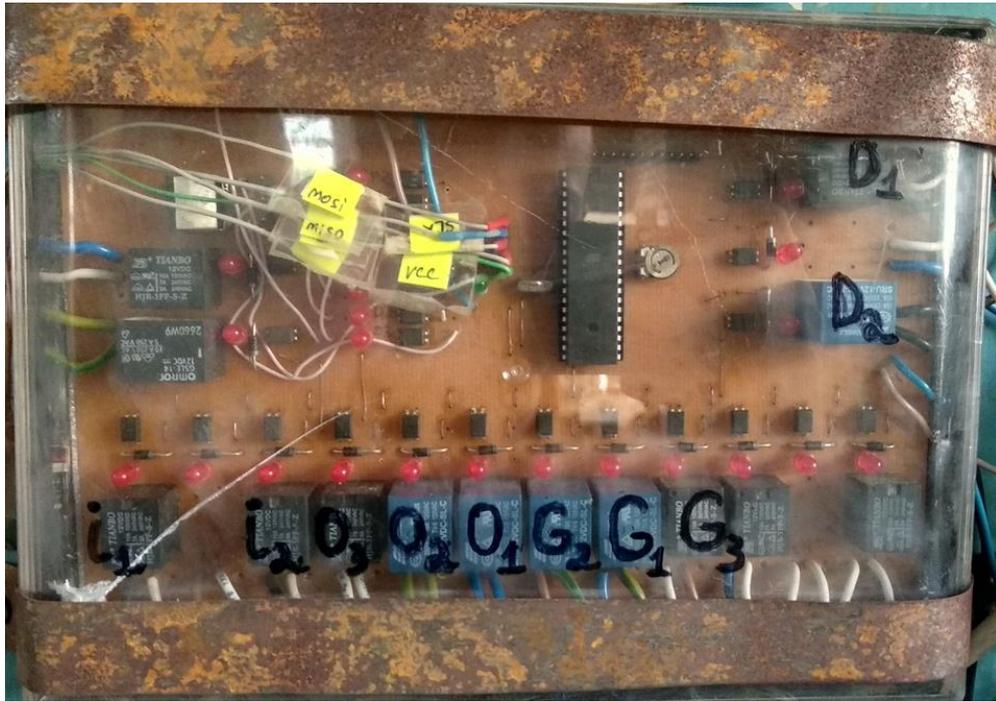


Рисунок 4.7 – Управляющая плата

После монтажа устройства газовой штамповки и его соединения с системой подачи было проведено его испытание на прочность. При этом вместо клапанов для измерения давлений, свеч зажигания и выпускных клапанов были закручены заглушки, а в полость матрицы, рабочего цилиндра и камеры сгорания был подан сжатый воздух давлением  $7 \text{ МПа}$ . По истечении 5 минут видимых деформаций матрицы, рабочего цилиндра и камеры сгорания не наблюдалось. После этого была проведена проверка работоспособности устройства для штамповки. При этом проверялись перемещение поршня, работа системы топливоподачи и системы зажигания. Испытания показали надежную работу устройства и его систем. Это позволило использовать устройство для проведения экспериментальных исследований. Фотография устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления представлена на рисунке 4.8



Рисунок 4.8 – Фотография разработанного экспериментального устройства для листовой штамповки с поршневым мультипликатором давления

Краткая техническая характеристика экспериментального устройства:

Максимальный диаметр обрабатываемых заготовок, мм..... 250

Максимальная толщина обрабатываемых заготовок, мм..... 2

Габаритные размеры устройства:

Высота, мм.....1250

Поперечные размеры ,мм.....300x600

Диаметр камеры сгорания, мм.....160

Диаметр полости матрицы, мм.....160

Энергоноситель — смесь горючего газа со сжатым воздухом.

Максимальное давление энергоносителя, МПа ..... 0,9

## 4.2 Методика проектирования устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления

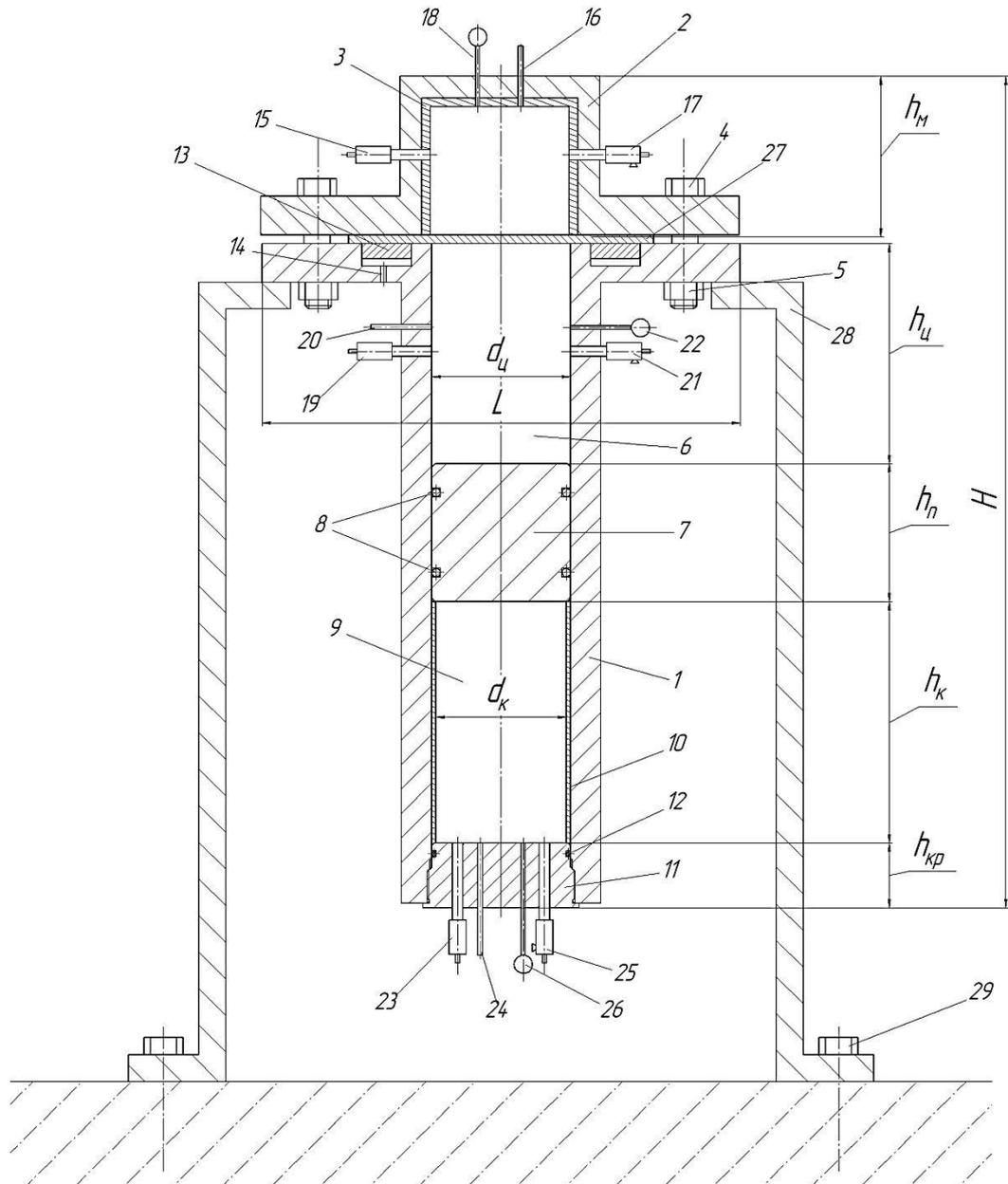
В отличие от экспериментального устройства, представленного на рисунке 4.8, устройство газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления, предназначенное для использования в промышленном производстве, должно быть снабжено автономным средством для прижима фланцевой части штампуемой заготовки. Схема конструкции этого устройства представлено на рисунке 4.9. На торце корпуса 1 выполнена кольцевая полость, в которой установлен кольцевой поршень 13, служащий в качестве прижима штампуемой заготовки 27. Усилие прижима создается под действием давления жидкости, подаваемого в кольцевую полость через канал 14. Благодаря наличию автономного прижимного устройства усилие прижима не зависит от силы затяжки болтов, соединяющих матрицедержатель 2 с корпусом 1, и она может регулироваться в зависимости от параметров штампуемых деталей.

Методика проектирования устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления составлена на базе конструктивной схемы представленной на рисунке 4.9. Основные размеры устройства, определяемые при его проектировании, указаны на этом рисунке. Исходными основными данными при проектировании устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления являются:

- максимальный диаметр штампуемых деталей  $d_{\max}$ ;
- максимальная толщина штампуемых деталей  $\delta_{\max}$ .

Диаметр штампованных деталей изменяется в широком диапазоне: от 100 мм до 800 мм и более. Вся совокупность деталей в этом диапазоне может быть распределена на три группы:

- детали небольших размеров – от 100 до 250 мм;
- детали средних размеров – от 250 до 450 мм;
- крупногабаритные детали – более 450 мм.



- 1 – корпус; 2 – матрицедержатель; 3 – матрица; 4 – болт; 5 – гайка;  
 6 – рабочий цилиндр; 7 – поршень; 8 – поршневые кольца;  
 9 – камера сгорания; 10 – гильза; 11 – крышка камеры сгорания;  
 12 – уплотнительные кольца; 13 – кольцевой поршень;  
 14 – кольцевой канал; 15, 19, 23 – впускные клапаны; 16, 20, 24 – свечи  
 зажигания; 17, 21, 25 – выпускные клапаны; 18, 22, 26 – клапаны для измерения  
 давлений; 27 – заготовка; 28 – подставка; 29 – крепежный болт.

Рисунок 4.9 – Расчетная схема устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления

Штамповку деталей этих трех групп целесообразно осуществлять соответственно трем типоразмерам устройства газовой штамповки.

Основным размером проектируемого устройства является диаметр рабочего цилиндра  $d_{ц}$  его целесообразно принять равным максимальному диаметру штампуемых деталей, то есть

$$d_{ц} = d_{ц_{max}} \quad (4.1)$$

По диаметру рабочего цилиндра и максимальной толщине штампуемых деталей определяется высота рабочего цилиндра, используя при этом зависимости (3.73) – (3.75):

Для штамповки деталей диаметром до 250 мм

$$h_{ц} = 313,6\delta_{max};$$

Для штамповки деталей диаметром до 450 мм

$$h_{ц} = 245,5\delta_{max};$$

Для штамповки деталей диаметром более 450 мм

$$h_{ц} = 163,5\delta_{max}.$$

По диаметру и высоте рабочего цилиндра определяется его объем

$$V_{ц} = \frac{\pi}{4} d_{ц}^2 h_{ц} \quad (4.2)$$

По объему рабочего цилиндра определяется объем камеры сгорания, учитывая при этом оптимальный диапазон значений относительного объема камеры сгорания  $\vartheta_k = 1 \dots 1,5$ .

$$V_k = \vartheta_k V_{ц} \quad (4.3)$$

Диаметр камеры сгорания вычисляется исходя из диаметра рабочего цилиндра

$$d_k = d_{ц} - 2\delta_{г} \quad (4.5)$$

где  $\delta_{г}$  – толщина гильзы,  $\delta_{г} = 0,005 \dots 0,01$  м.

По объему и диаметру камеры сгорания определяется ее высота.

$$h_k = \frac{4}{\pi} \frac{V_k}{d_k^2} \quad (4.6)$$

Высота поршня определяется, исходя из его диаметра.

$$h_{\Pi} = (0,8 \dots 1,0)d_{\Pi} \quad (4.7)$$

Диаметр матрицы соответствует диаметру штампуемой заготовки, поэтому внутренний диаметр матрицедержателя рассчитывается по следующей зависимости:

$$d_{\text{м}} = d_{\text{max}} + 2\delta_{\text{м}} \quad (4.8)$$

где  $\delta_{\text{м}}$  – толщина матрицы,  $\delta_{\text{м}}=0,010\dots0,015$  м.

Высота матрицедержателя определяется по конструктивным соображениям, исходя из его диаметра

$$h_{\text{м}} = (0,6 \dots 0,7)d_{\text{м}} \quad (4.9)$$

Общая высота устройства газовой штамповки

$$h_{\text{у}} = h_{\text{м}} + h_{\text{ц}} + h_{\text{п}} + h_{\text{к}} + h_{\text{кр}} \quad (4.10)$$

где  $h_{\text{кр}}$  – высота крышки камеры сгорания, м.

Толщина стенки рабочего цилиндра  $\delta_{\text{ц}}$  определяется расчетом на прочность. При этом расчет проводится по общей методике расчета толстостенного цилиндра нагруженного внутренним давлением [85]. Расчетное давление определяется по зависимости:

$$P_{\text{р}} = K_{\text{з}}\lambda P_{\text{сmax}} \quad (4.11)$$

где  $K_{\text{з}}$  – коэффициент запаса,  $K_{\text{з}}=1,5$ ;

$P_{\text{сmax}}$  – максимальное давление топливной смеси, Па.

Поперечные габариты устройства газовой штамповки определяются диаметром кольцевого поршня и диаметром болтов, соединяющих матрицедержатель с корпусом. Внутренний и наружный диаметры кольцевого поршня определяются исходя из диаметра рабочего цилиндра.

$$d_{\text{пв}} = d_{\text{ц}} + 2a_{\text{п}} \quad (4.12)$$

$$d_{\text{пн}} = d_{\text{пв}} + 2b_{\text{п}} \quad (4.13)$$

где  $d_{\text{пв}}$ ,  $d_{\text{пн}}$  – внутренний и наружный диаметры кольцевого поршня, м;

$a_{\text{п}}$  – расстояние от внутреннего диаметра цилиндра до внутреннего диаметра кольцевого поршня,  $a_{\text{п}}=0,01\dots0,02$  м;

$v_{\text{п}}$  – ширина кольцевого поршня,  $v_{\text{п}}=0,05\dots0,15$  м.

Определяется максимальное усилие, возникающее в процессах горения топливных смесей в камере сгорания и рабочем цилиндре.

$$P_{\text{max}} = \frac{\pi}{4} d_{\text{ц}}^2 \lambda P_{c \text{max}} \quad (4.14)$$

На это усилие по известной методике [86] рассчитываются болты, соединяющие матрицедержатель с корпусом. После определения диаметра болтов рассчитывается максимальный поперечный размер устройства газовой штамповки.

$$L = d_{\text{пн}} + 2d_{\text{б}} + 2c_1 + 2c_2 \quad (4.15)$$

где  $d_{\text{б}}$  – диаметр тела болта, м;

$c_1, c_2$  – расстояния от болта до наружного диаметра кольцевого поршня и до наружного контура устройства соответственно,

$c_1 = 0,02\dots0,04$  м;  $c_2 = 0,03\dots0,05$  м.

Вышеизложенная методика расчета обобщена в виде расчетной схемы представленной на рисунке 4.10

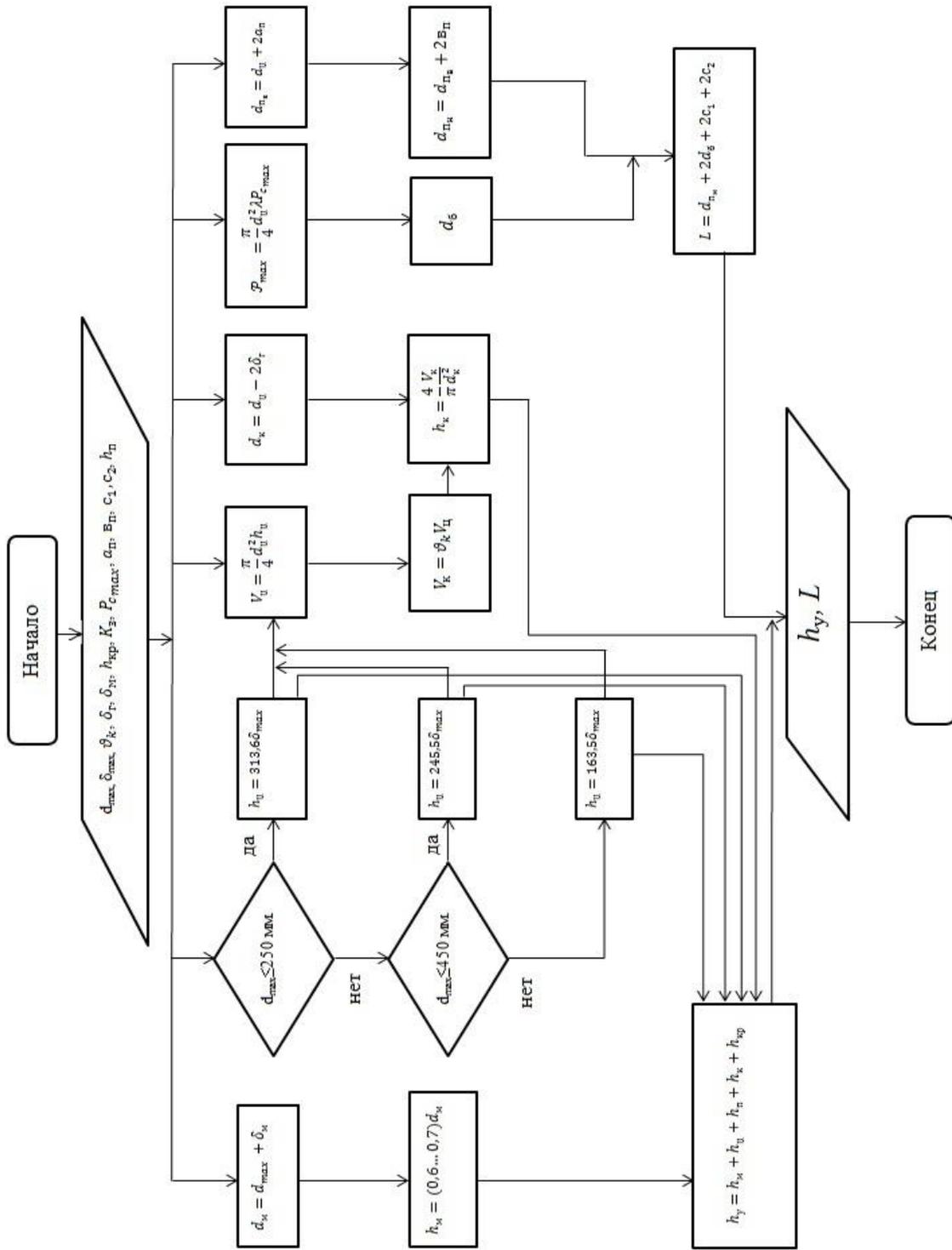


Рисунок 4.10 – Схема расчета основных размеров устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления.

## **5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА УСТРОЙСТВА ГАЗОВОЙ ШТАМПОВКИ С ПОРШНЕВЫМ МУЛЬТИПЛИКАТОРОМ ДАВЛЕНИЯ**

### **5.1 Цель и задачи экспериментальных исследований**

Целью экспериментальных исследований являлась оценка достоверности результатов теоретического анализа и практическая апробация устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

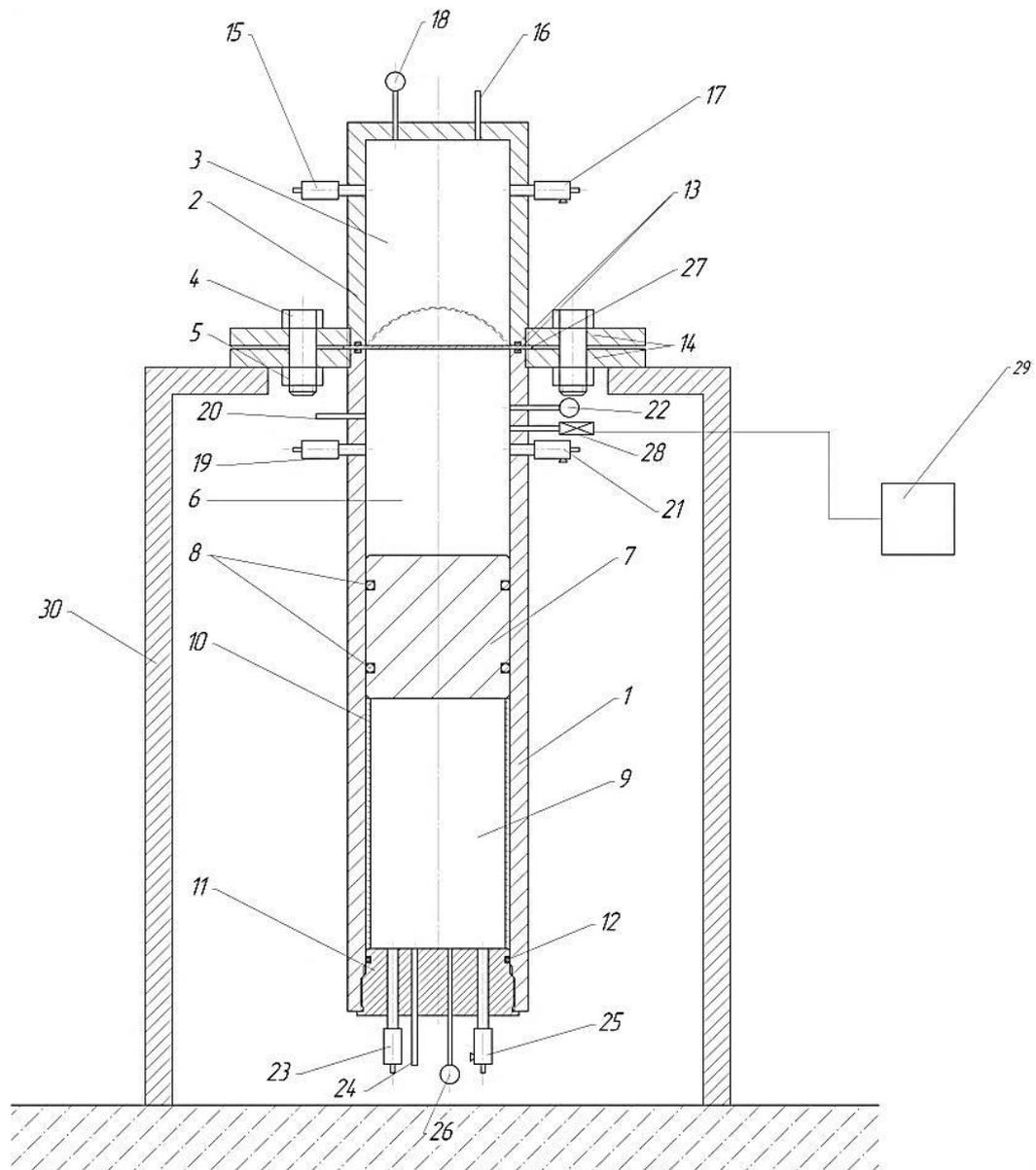
- определение закономерности изменения давления в рабочем цилиндре;
- определение повышения давления в рабочем цилиндре, обусловленного наличием поршневого мультипликатора давления;
- отладка рабочего процесса устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления;
- отладка технологических режимов процесса устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления;

### **5.2. Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов**

Для проведения экспериментальных исследований разработано и создано экспериментальное устройство, схема которого представлена на рисунке 5.1.

Устройство содержит корпус 1 и матрицу 2 с внутренней полостью 3, соединенные между собой при помощи фланцев 14, болтов 4 и гаек 5. В корпусе 1 размещены рабочий цилиндр 6 с поршнем 7 с установленными поршневыми кольцами 8 и камера сгорания 9. На торце корпуса и матрицы выполнены кольцевые канавки для установки кольцевого уплотнения 13.

Рабочий цилиндр 6 снабжен впускным клапаном 19, свечей зажигания 20, выпускным клапаном 21, клапаном для измерения давления 22. Камера сгорания 9 снабжена впускным клапаном 23, свечей зажигания 24, выпускным клапаном 25 и клапаном для измерения давления 26, которые установлены на крышку корпуса 11 с уплотнителем 12.



- 1 – корпус; 2 – матрица; 3 – полость матрицы; 4 – болт; 5 – гайка;  
 6 – рабочий цилиндр; 7 – поршень; 8 – поршневые кольца;  
 9 – камера сгорания; 10 – гильза; 11 – крышка камеры сгорания; 12,  
 13 – уплотнительные кольца; 14 – фланец;  
 15, 19, 23 – впускные клапаны; 16, 20, 24 – свечи зажигания;  
 17, 21, 25 – выпускные клапаны; 18, 22, 26 – клапаны для измерения  
 давлений; 27 – заготовка; 28 – датчик избыточного давления;  
 29 – осциллограф; 30 – подставка

Рисунок 5.1 – Схема устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления

На матрице 2 установлены впускной клапан 15, свеча зажигания 16, выпускной клапан 17 и клапан для измерения давления 18. Штампующая заготовка 27 располагается между корпусом 1 и матрицей 2. Для замера давления в процессе горения топливной смеси в рабочем цилиндре размещен датчик избыточного давления «Курант ДИ» 0...16 МПа, с классом точности 0,25%, выходным сигналом  $4 \div 20$  мА, с открытой мембраной, диапазоном частот 0...3000 Гц. – 28. Сигнал от датчика давления передается аналоговому осциллографу 29. Для проведения экспериментальных исследований используется аналоговый двухканальный осциллограф модели ATTEN ADS1062C. Устройство устанавливается на подставку 30.

Перед началом экспериментов провели тарировку датчика давления. Для этого рабочий цилиндр наполняли воздухом давлением 0,7 МПа, которое контролировалось образцовым манометром класса 0,4, выходное электрическое напряжение датчика давления фиксировалось, затем воздух из рабочего цилиндра сбрасывали и снова фиксировали электрическое напряжение. При этом было установлено давление 0,1 МПа соответствует выходному электрическому напряжению 0,068 В. Затем осуществляли наполнение топливной смесью камеры сгорания, рабочего цилиндра и матрицы. Давление топливной смеси в рабочем цилиндре и камере сгорания устанавливается одинаковым и варьировали в пределах 0,5... 0,7 МПа, а в полости матрицы устанавливали в два раза меньше. Процентное содержание пропан-бутанового газа в топливной смеси подбиралось исходя из данных паспорта газа (Приложение 5). Зажигание топливных смесей в рабочем цилиндре и матрице производили одновременно через 0,5 с после окончания процесса наполнения камеры сгорания. Длительность процесса нагрева заготовки, т.е. промежуток времени между зажиганием топливной смеси в рабочем цилиндре и матрице варьируется в пределах 0,5 ... 1,5 с. Зажигание топливной смеси в камере сгорания производили двумя способами: искровым зажиганием посредством свечи и форкамерно-факельным зажиганием. Во втором случае вместо свечи 24 зажигания в крышке корпуса 11 ввинчивали форкамеру со

свечей зажигания схема, которой представлена в приложении 6. После каждого эксперимента полости рабочего цилиндра, камеры сгорания и матрицы продували сжатым воздухом.

Штамповке подвергались круглые заготовки диаметром 200 мм из листовой стали толщиной 1 мм. Деформацию оценивали по глубине вытяжки заготовки. Для этого после каждого эксперимента производили измерение глубины вытяжки заготовки. Для проведения экспериментальных исследований был использован лист стальной

Лист Х/К

Б - ПН - О - 1x1250x2500 ГОСТ 19904- 90

Ст3 – Ш – Г – ГОСТ 16523-89

### **5.3 Экспериментальные исследования рабочего процесса совершающегося в рабочем цилиндре**

Было проведено несколько серий экспериментов. Первая серия экспериментов была посвящена исследованию закономерности изменения давления в рабочем цилиндре в течение первого этапа процесса штамповки. При этом топливной смесью наполняли только рабочий цилиндр и матрицу и осуществляли одновременные их зажигания. Давление топливной смеси в рабочем цилиндре составляло 0,6 МПа и 0,7 МПа, а в матрице – 2 раза меньше.

На рисунке 5.2 представлена осциллограмма изменения давления в рабочем цилиндре при давлении топливной смеси 0,6 МПа на первом этапе процесса штамповки, где  $C_{игА}$  – напряжение до подачи топливной смеси в рабочий цилиндр,  $B$ ;  $C_{игВ}$  – максимальное напряжение при горении топливной смеси,  $B$ ;  $\Delta U$  – разность между  $C_{игА}$  и  $C_{игВ}$ ,  $B$ .

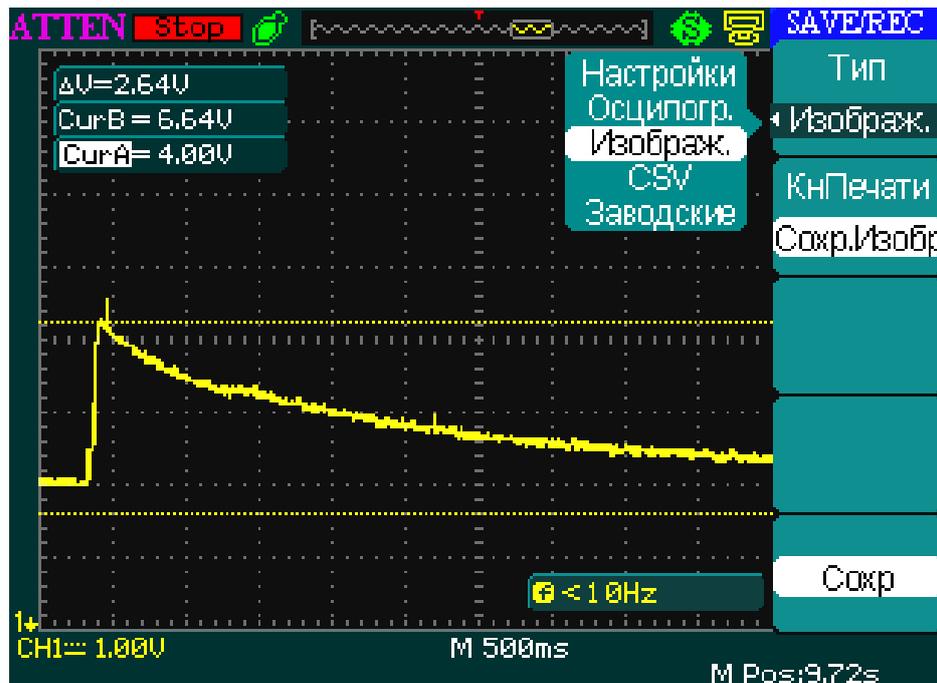


Рисунок 5.2 – Осциллограмма изменения давления в рабочем цилиндре на первом этапе процесса штамповки при давлении топливной смеси  $P_c = 0,6 \text{ МПа}$

При сгорании топливной смеси давление в рабочем цилиндре резко увеличивается до максимального значения  $P_z$ . Исходя из данных осциллограммы, максимальное давление продуктов сгорания в рабочем цилиндре составляет по вольт-амперной характеристике  $\Delta U = 2,64 \text{ В}$ , что соответствует  $P_z \approx 3,9 \text{ МПа}$ .

После окончания процесса сгорания топливной смеси давление в рабочем цилиндре непрерывно уменьшается, причем интенсивность снижения давления со временем уменьшается. Однако криволинейный график снижения давления без большой погрешности может быть заменен прямой линией, т.е. зависимость изменения давления во времени можно считать линейным, как это было принято при теоретическом анализе. При этом коэффициент  $\zeta$ , входящий в зависимость (3.2), равен тангенсу угла наклона этой прямой горизонтальной оси. Анализ полученных осциллограмм показал, что величина  $\zeta$  составляет  $0,05 \dots 0,07$ .

Следующий эксперимент был проведен при давлении топливной смеси в рабочем цилиндре  $P_c = 0,7 \text{ МПа}$ . После проведения экспериментов исходя из

данных полученных осциллографом (рисунок 5.3) максимальное давление продуктов сгорания в камере сгорания составляет по вольт-амперной характеристике  $\Delta U=2,92 В$ , что соответствует  $P_z \approx 4,3 МПа$ .

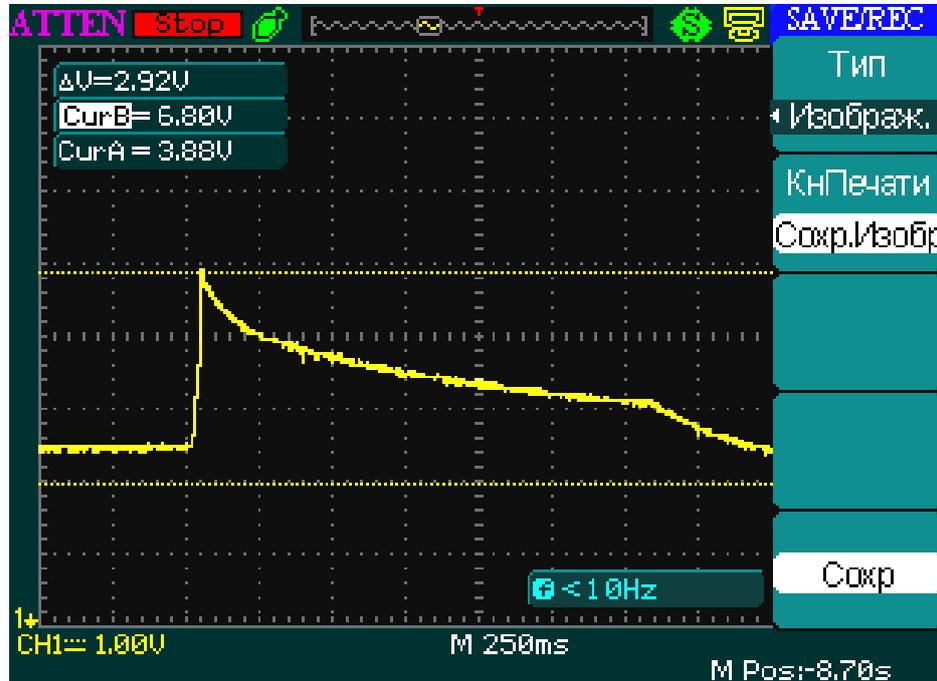


Рисунок 5.3 – Осциллограмма изменения давления в рабочем цилиндре на первом этапе процесса штамповки при давлении топливной смеси  $P_c = 0,7 МПа$

Третья серия экспериментов была посвящена исследованию закономерности изменения давления в рабочем цилиндре на втором этапе процесса штамповки при искровом зажигании топливной смеси в камере сгорания. В этой серии экспериментов камеру сгорания и рабочий цилиндр наполняли топливной смесью давлением  $0,6 МПа$  и  $0,7 МПа$ , а в матрице – 2 раза меньше. При этом относительный объем камеры сгорания составлял около 1,5, то есть  $\vartheta_k = 1,5$ . После зажигания топливной смеси в рабочем цилиндре и матрице через  $0,5...1,5 с$  производили зажигание топливной смеси в камере сгорания, а затем через  $0,5..1 с$  выпуск из полости матрицы продуктов сгорания. Одна из осциллограмм изменения давления в рабочем цилиндре, полученная при давлении топливной смеси  $0,6 МПа$ , представлена на рисунке 5.4. Осциллограмма имеет

два пика, т.е. два максимума. Первый из них соответствует концу процесса сгорания в рабочем цилиндре. Второй пик соответствует концу процесса сжатия продуктов сгорания, обусловленного движением поршня под действием давления в камере сгорания. Полученные осциллограммы показали, что за счет сжатия продуктов сгорания давление в рабочем цилиндре увеличивается в 1,2...1,5 раз при давлении топливной смеси 0,6 МПа.

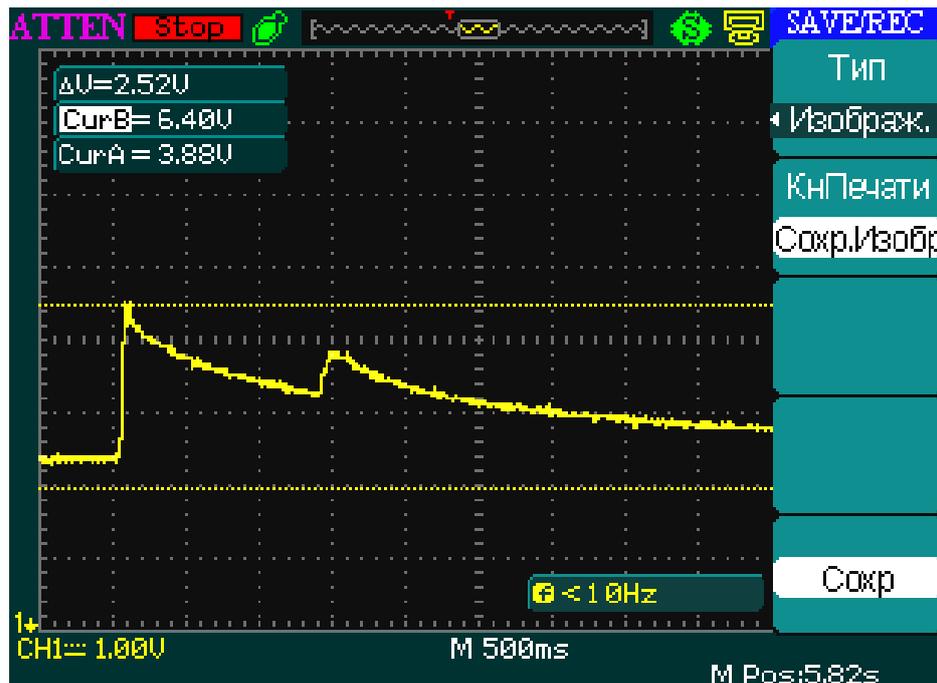


Рисунок 5.4 – Осциллограмма изменения давления в рабочем цилиндре при штамповке с поршневым мультипликатором давления при давлении топливной смеси  $P_c = 0,6$  МПа

Так же были проведены эксперименты при давлении топливной смеси 0,7 МПа. На рисунке 5.5 и 5.6 представлена осциллограмма изменения давления в рабочем цилиндре, анализ этой осциллограммы показывает, что давление в рабочем цилиндре увеличивается в 1,2...1,5 раз.

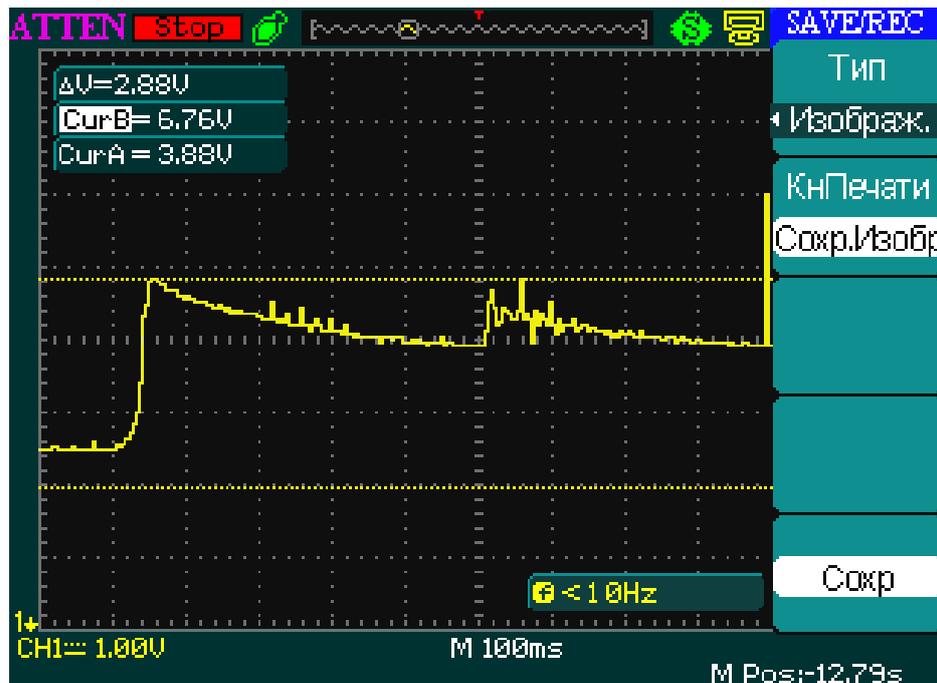


Рисунок 5.5 – Осциллограмма изменения давления в рабочем цилиндре при штамповке с поршневым мультипликатором давления при давлении топливной смеси  $P_c = 0,7 \text{ МПа}$

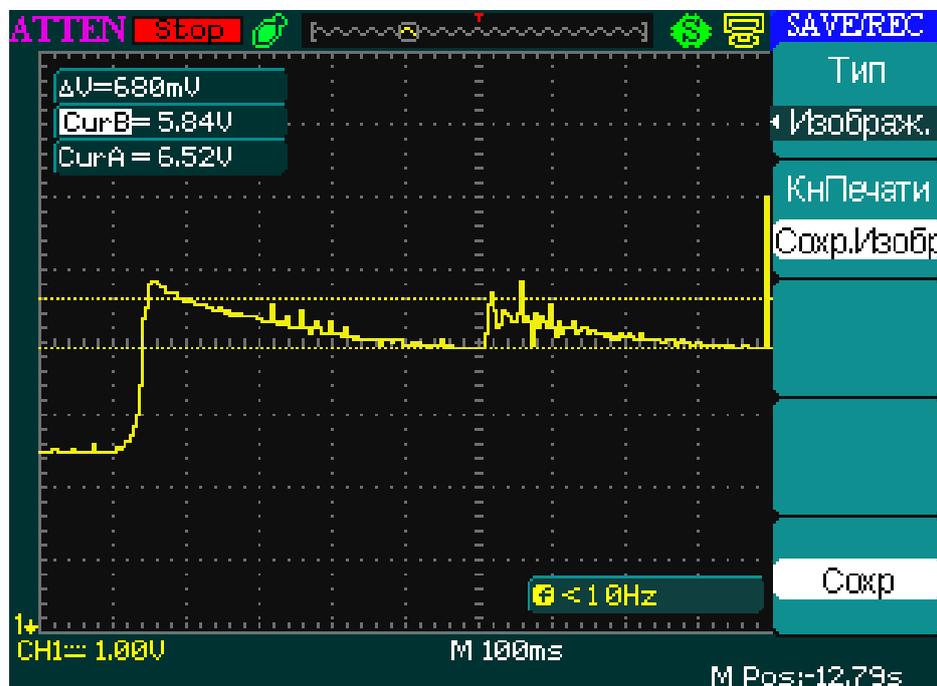


Рисунок 5.6 – Осциллограмма изменения давления в рабочем цилиндре при штамповке с поршневым мультипликатором давления при давлении топливной смеси  $P_c = 0,7 \text{ МПа}$

Четвертая серия экспериментов была посвящена исследованию закономерности изменения давления в рабочем цилиндре на втором этапе процесса штамповки при форкамерно-факельном зажигании топливной смеси в камере сгорания. Для проведения экспериментов к камере сгорания была подсоединена форкамера, снабженной свечей зажигания. Для обеспечения разгона поршня высота рабочего цилиндра была увеличена за счет уменьшения высоты камеры сгорания, при этом относительный объем камеры сгорания составлял 1, то есть  $\vartheta_k = 1$ . В этой серии экспериментов, также как в предыдущей серии экспериментов давление топливной смеси в камере сгорания и рабочем цилиндре составляло 0,6 МПа и 0,7 МПа. При этом наполнение топливной смесью осуществляли через форкамеру. На рисунке 5.7 представлена осциллограмма изменения давления в рабочем цилиндре при форкамерно-факельном методе зажигания топливной смеси, полученная при давлении 0,6 МПа.



Рисунок 5.7– Осциллограмма изменения давления в рабочем цилиндре при штамповке с поршневым мультипликатором давления, снабженным форкамерой при давлении топливной смеси  $P_c = 0,6$  МПа

Анализируя осциллограмму, стоит отметить, что второй пик – максимальное увеличение давления на втором этапе процесса штамповки практически равен максимальному давлению на первом этапе процесса. Полученная осциллограмма показала, что за счет сжатия продуктов сгорания давление в рабочем цилиндре увеличивается в 1,8...2,1 раз при давлении топливной смеси 0,6 МПа.

При давлении топливной смеси 0,7 МПа давление продуктов сгорания в рабочем цилиндре увеличивается в 1,4...1,7 раз (рисунок 5.8).



Рисунок 5.8 – Осциллограмма изменения давления в рабочем цилиндре при штамповке с поршневым мультипликатором давления, снабженным форкамерой при давлении топливной смеси  $P_c = 0,7$  МПа.

Полученные осциллографом результаты показывают, что с увеличением давления топливной смеси, сжатие давления продуктов сгорания в рабочем цилиндре в конце второго этапа процесса штамповки тоже увеличивается. Исходя из этого при одинаковых режимах подачи топливной смеси  $P_c$  максимальная степень сжатия продуктов сгорания с использованием форкамерно-факельного зажигания выше, чем при искровом зажигании. Так же на основе

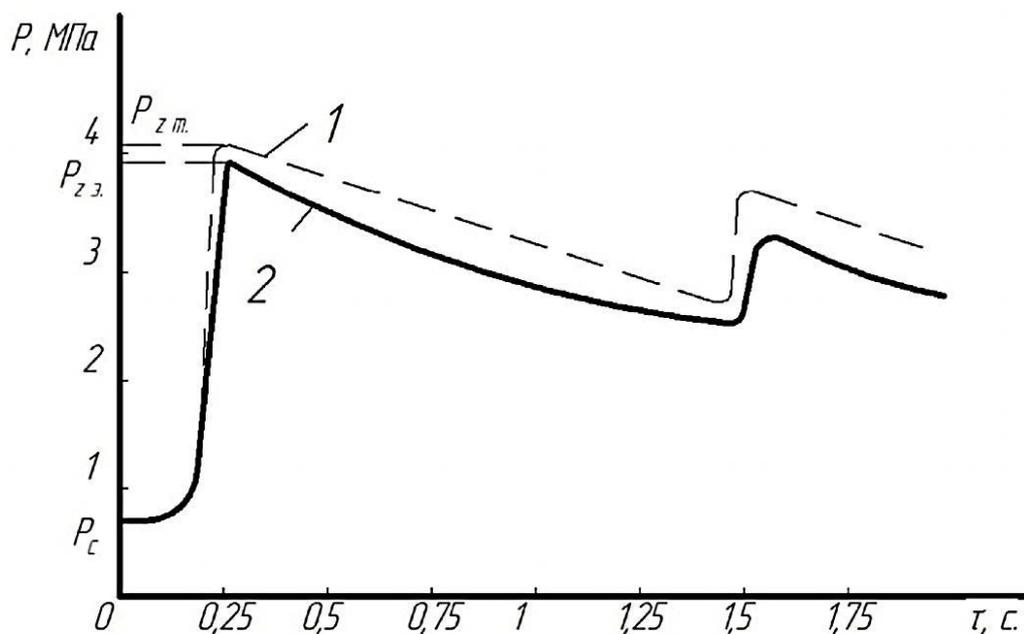
экспериментальных исследований сравнивая результаты можно сделать вывод о том, что с увеличением времени между подачей искры на свечу зажигания рабочего цилиндра и на свечу камеры сгорания повышается степень сжатия продуктов сгорания в рабочем цилиндре.

Сопоставление теоретических и экспериментальных графиков изменения давления в рабочем цилиндре при давлении топливной смеси 0,6 МПа представлен на рисунке 5.9. Расхождение теоретических и экспериментальных значений максимального давления продуктов сгорания определялось по следующей зависимости:

$$\Delta P_z = \frac{P_{z \text{ теор.}} - P_{z \text{ эксп.}}}{P_{z \text{ теор.}}} 100\% \quad (5.1)$$

где  $P_{z \text{ т}}$  – теоретическое значение давления продуктов сгорания при сгорании в постоянном объеме, Па;

$P_{z \text{ э}}$  – экспериментальное значение давления продуктов сгорания при сгорании в постоянном объеме, Па;



1 – теоретические значения; 2 – экспериментальные значения

Рисунок 5.9 – Сравнение теоретических и экспериментальных результатов при давлении топливной смеси 0,6 МПа.

Расчет по зависимости (5.1) показал, что расхождение теоретических и экспериментальных значений давления продуктов сгорания составляет около  $\Delta P_z \approx 10\%$ , и  $\Delta P_z \approx 12\%$  при давлении 0,7 МПа.

Пятая серия экспериментов была посвящена отработке технологических режимов процесса штамповки. Штамповке подвергали листовые заготовки толщиной 1 мм из стали 3 ГОСТ 380-2005, используя цилиндрическую матрицу диаметром 160 мм. При этом получали сферообразные днища различной глубины. Выбор такой формы штампуемых изделий обусловлен тем, что такая форма изделия наиболее приемлема для оценки достоверности полученных при теоретическом анализе зависимостей для определения необходимой величины давления топливной смеси. Кроме того, на такие изделия имеется спрос со стороны малых предприятий, производящих металлические изделия. В ходе экспериментов варьировали давление топливной смеси, время нагрева заготовки, определяемое промежутком времени между зажиганием топливной смеси в рабочем цилиндре и камере сгорания, а также время начала выпуска продуктов сгорания из матрицы. Зажигание топливной смеси в камере сгорания производили при помощи свечи, т.е. применяли искровое зажигание.

На рисунке 5.10 представлено сферообразное днище, отштампованное при давлении топливной смеси в рабочем цилиндре равном 0,4 МПа и 0,2 МПа в матрице. Зажигание топливных смесей в рабочем цилиндре матрице производили одновременно, затем через 0,6 с производили зажигание топливной смеси в камере сгорания, после чего через 0,3 с осуществляли выпуск продуктов сгорания из полости матрицы, а затем через 0,5 с – выпуск продуктов сгорания из рабочего цилиндра и камеры сгорания.



Рисунок 5.10 – Сферообразное днище глубиной 19 мм

Этот эксперимент повторяли три раза. При этом средняя величина глубины днища составила 19 мм. Согласно графикам на рисунке 3.18 при давлении топливной смеси 0,4 МПа температура заготовки не превышает 250-270 °С. При такой температуре для стали 3 предел текучести составляет около 200 МПа [78].

Определим потребную величину давления топливной смеси по зависимости (3.15)

$$P_c = \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{V_c}{V_{ц}}\right)^k \frac{2,4\sigma_s h_c \delta}{(1-\alpha)(R_M^2 + 0,36h_M^2)}$$

В данном случае

$$\lambda=7; V_{ц}=0,0046 \text{ м}^3; h_M=0,019 \text{ м}; \delta=0,001 \text{ м}; \sigma_s=200 \text{ МПа}; R_M= 0,08 \text{ м}; \alpha=0,5$$

Объём сферы образного днища определим по зависимости (3.17)

$$V_c = 0,1\pi h_M (3R_M^2 + 0,36h_M^2) = 0,1 * 3,14 * 0,019(3 * 0,08^2 + 0,36 * 0,019^2) = 0,00012 \text{ м}^3$$

Подставляя эти данные вышепроизведенную зависимость, получим  $P_c=0,44$  МПа.

Следовательно, расчётная величина давления топливной смеси всего на 10% отличается от его экспериментального значения.

На рисунке 5.11 представлено сферообразное днище, полученное при давлении топливной смеси в рабочем цилиндре равном 0,5 МПа, а в матрице – 0,25 МПа. Остальные параметры процесса такие же, как и в предыдущем случае.

Средняя величина глубины 3-х днищ, отштампованных при указанных параметрах процесса, составляет 25 мм.



Рисунок 5.11 – Сферообразное днище глубиной 25 мм

На рисунке 5.12 представлено днище, отштампованное при давлении в рабочем цилиндре равном 0,6 МПа, а в матрице – 0,3 МПа. Зажигание топливной смеси в камере сгорания производили через 0,6 с после зажигания топливной смеси в рабочем цилиндре, после чего через 0,4 с производили выпуск продуктов сгорания из матрицы. Средняя глубина днища составляет 38 мм.



Рисунок 5.12 – Сферообразное днище глубиной 38 мм

На рисунке 5.13 представлено сферообразное днище, полученное при давлении топливной смеси в рабочем цилиндре равном 0,7 МПа, а в матрице – 0,35 МПа. Зажигание топливной смеси в камере сгорания производили через 0,8 с после подачи искры в рабочий цилиндр и матрицу, после чего через 0,4 с осуществляли выпуск продуктов сгорания из матрицы, а затем через 1 с производили выпуск продуктов сгорания из рабочего цилиндра и камеры

сгорания. При этих параметрах процесса средняя величина глубины отштампованных днищ составил 45 мм.



а)



б)

а) – вид с боку; б) – вид сверху

Рисунок 5.13 – Сферообразное днище глубиной 45 мм:

При давлении топливной смеси 0,7 МПа температура заготовки достигает 450 °С (рисунок 3.18). При такой температуре для стали 3 предел текучести составляет около 160 МПа. Расчет потребной величины давления топливной смеси для получения днища глубиной 45 мм, проведённой по зависимости (3.15) аналогично выше приведённому расчёту, показал, что  $P_c=0,76$  МПа.

Следовательно, расчётная величина давления топливной смеси отличаются от экспериментального его значения всего на 8,5%.

Таким образом, на основании результатов сопоставление расчетных и экспериментальных значений давления топливной смеси можно считать, что полученная зависимость (3.15) вполне приемлема для расчёта потребной величины давления топливной смеси.

Технологические режимы, использованные при штамповке днища, представленного на рисунке 5.13, были признанными наиболее рациональными. Поэтому на этих режимах была отштампована опытная партия днищ, представленная на рисунке 5.14.



Рисунок 5.14 – Опытная партия штампованных изделий

Требуемое качество полученных изделий позволило внедрить данную технологию в промышленное производство для изготовления штампованных изделий, часть их которых представлена на рисунке 5.15 (Приложение 7). Результаты работы внедрены также в учебный процесс подготовки бакалавров по направлениям подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое

обеспечение машиностроительных производств» и 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» (Приложение 7).



Рисунок 5.15– Декоративные элементы железных конструкций

#### **5.4 Разработка технологии штамповки на устройстве газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления.**

Разрабатываемая технология штамповки включает в себя операции, связанные с подготовкой штампуемых заготовок; определение технологических режимов процесса штамповки; установку заготовки в рабочую зону устройства газовой штамповки; проведение процесса штамповки и извлечение полученного изделия из рабочей зоны устройства.

##### *Подготовка штампуемой заготовки.*

Определяется размер исходной плоской заготовки для штамповки детали, используя известную методику расчёта [87]. В частности, в случае штамповки сферообразного днища с фланцем диаметр исходной заготовки определяется по следующей зависимости

$$D_3 = \sqrt{d_\phi^2 - d_c^2 + 4\left(\frac{d_c^2}{4} + h_c^2\right)} \quad (5.2)$$

где  $d_\phi$  – диаметр фланца днища, м;

$d_c$  – диаметр сферической части, м;

$h_c$  – глубина днища, м.

После определения диаметра заготовки осуществляется вырезка из листа заготовки нужного диаметра. При изготовлении небольшого количества деталей вырезка заготовок производится вручную при помощи ножниц. В случае производства партии деталей в количестве около 100 и более единиц резка заготовок может производиться на устройстве газовой штамповки, используя вырубной штамп. При этом вырубной штамп устанавливается на торец кольцевого поршня, а сверху листовой заготовки устанавливается эластичный диск из полиуретана или из твердой резины. Схема вырубки заготовки представлена на рисунке 5.16. Расчетное усилие, необходимое для осуществления вырубки, определяется следующей зависимостью [87]:

$$\mathcal{P}_в = (1,0 \dots 1,3)u\delta\tau_0 \quad (5.3)$$

где  $u$  – длина (периметр) вырубаемой заготовки, м;

$\delta$  – толщина заготовки, м;

$\tau_0$  – сопротивление срезу (вырубке) заготовки, для малоуглеродистых сталей  $\tau_0 = 300 \dots 400$  МПа.

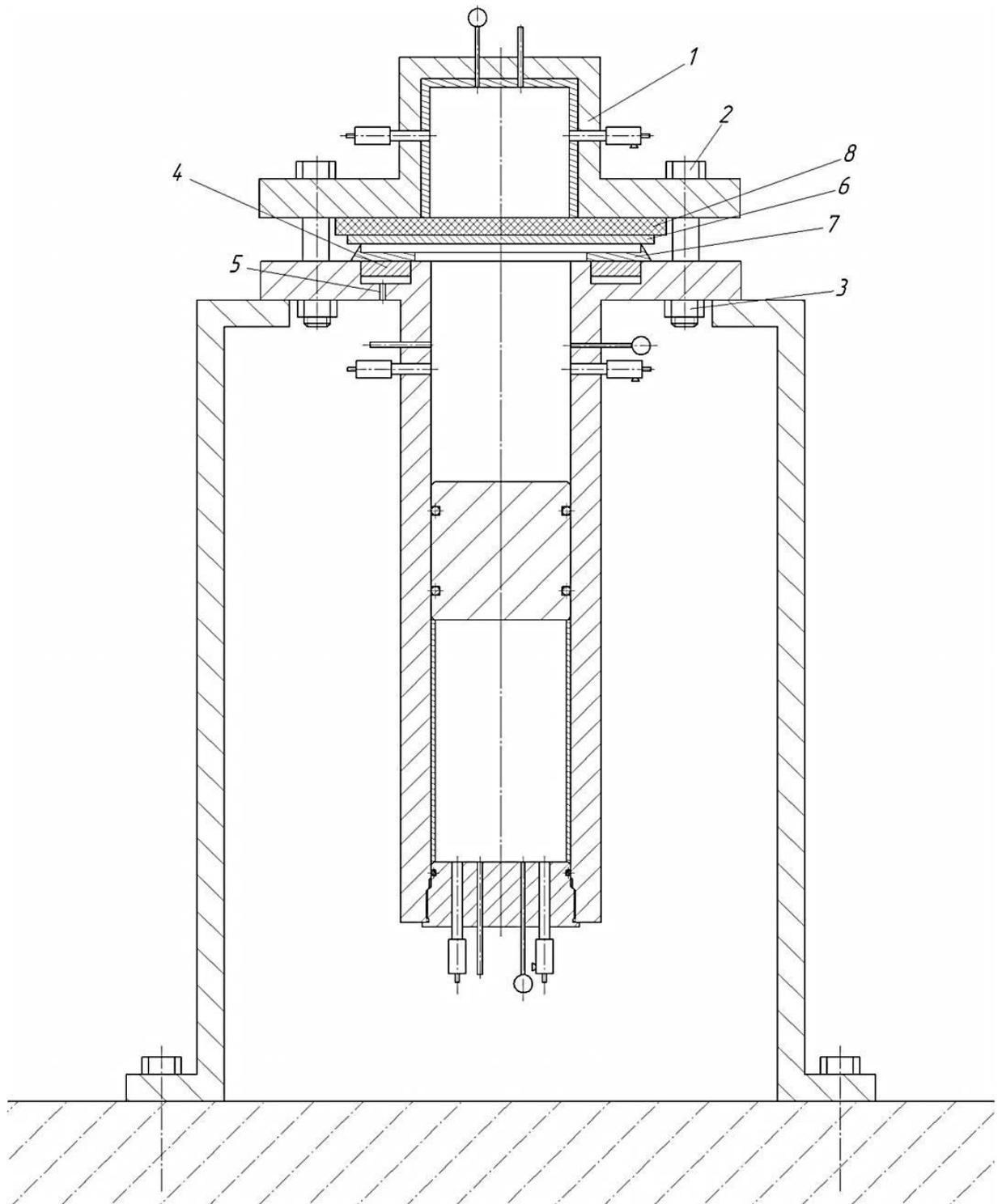
Это усилие обеспечивается давлением жидкости на кольцевой поршень, то есть

$$\mathcal{P}_в = P_ж f_{пр} \quad (5.4)$$

где  $f_{пр}$  — площадь поверхности кольцевого поршня .

В случае вырубки круглой заготовки диаметром  $D_3$   $u = \pi D_3$ . Тогда давление жидкости, необходимое для осуществления вырубки, может быть определено по следующей зависимости:

$$P_ж = \frac{1,3\pi D_3 \delta \tau_0}{f_{пр}} \quad (5.5)$$



1 – матрицедержатель; 2 – болт; 3 – гайка;

4 – кольцевой поршень; 5 – кольцевой канал;

6 – заготовка; 7 – вырубной штамп; 8 – эластичный диск.

Рисунок 5.16 – Схема вырубki листовой заготовки на устройстве газовой

штамповки

*Определение технологических режимов процесса штамповки.*

Технологические режимы включают в себя давление прижима фланцев заготовки, давление топливной смеси, время нагрева заготовки на 1 и 2 этапах процесса штамповки, длительность заключительной стадии процесса штамповки. Правильное назначение перечисленных параметров обеспечивает управление процессами нагрева и деформирования обрабатываемой заготовки, что гарантирует получение штампованного изделия требуемого качества.

Время нагрева заготовки на первом этапе определяется промежутком времени между подачей искры в рабочий цилиндр и камеру сгорания, а время нагрева и на втором этапе — промежутком времени между подачи искры в камеру сгорания и начала выпуска газа из матрицы. Оптимальная величина времени выпуска в зависимости от толщины заготовки составляет 0,5 ... 0,8 с для первого этапа и 0,3 ... 0,4 с для второго этапа процесса штамповки.

Длительность заключительной стадии процесса штамповки определяется промежутком времени между началом выпуска газа из матрицы и началом выпуска газа из рабочего цилиндра. В этот период завершается окончательная формовка нагретой заготовки. Оптимальная величина этого времени составляет 0,3 ... 0,5 с.

Давление прижима заготовки должно быть таким, чтобы предотвратить образование гофров на заготовке в процессе ее деформации. Наряду с этим давление прижима не должно препятствовать течению металла с фланцевой части заготовки в полость матрицы. Для стальной заготовки толщиной более 0,6 мм рекомендуемые значения давления прижима составляют 2,0...2,5 МПа [87]. Проведенные исследования показали, что при газовой штамповке давление прижима должно быть значительно выше, то есть должно составлять 3,0...3,5 МПа. Это связано с тем, что часть опорной поверхности прижима подвержена воздействию газа.

Важнейшим фактором для осуществления газовой штамповки является давление топливной смеси. Необходимая величина давления топливной смеси

существенно зависит от геометрических размеров штампуемой детали и механических характеристик материала детали, а также теплотворной способности топливной смеси. В случае штамповки сферобразных днищ зависимость давления топливной смеси от указанных параметров выражается следующей функцией:

$$P_c = f(R, h, \delta, \sigma_s, \lambda) \quad (5.6)$$

где  $R, h$  – радиус и глубина днища;  $m$ .

Конкретный вид этой функции определен при теоретическом анализе газовой штамповки в форме зависимостей (3.14), (3.15), которые подтверждены экспериментальными исследованиями. Поэтому давление топливной смеси определяется по этим зависимостям.

*Установка заготовки в рабочую зону устройства и извлечение из неё готового изделия.*

Для осуществления этих операций матрица отсоединяется от корпуса, открутив для этого гайки болтов, соединяющих их между собой. Штампованное изделие при остывании легко извлекается из матрицы, поэтому не требуется выталкиватель. Для уменьшения трения между заготовкой и кольцевым поршнем и матрицей торцевые поверхности кольцевого поршня и матрицы смазываются графитовой смазкой. После этого на торец кольцевого поршня устанавливается листовая заготовка и на неё устанавливается матрица. Затем матрица присоединяется к корпусу болтами.

Операции, связанные с установкой заготовки на поверхность кольцевого поршня и снятием отштампованного изделия с матрицы наиболее длительны и занимают 4...6 минут. Для их ускорения могут быть использованы специальные гайковерты.

### **Заключение по разделу**

В результате проведенных экспериментальных исследований определены основные закономерности рабочего процесса, протекающего в рабочем цилиндре устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления.

Установлено, что степень повышения давления при сгорании топливной смеси в рабочем цилиндре составляет 6,2...6,5. Расхождение теоретических и экспериментальных значений максимального давления продуктов сгорания не превышает 12%. После окончания процесса сгорания топливной смеси в период нагрева заготовки давление в рабочем цилиндре монотонно снижается. При этом закон изменения давления может быть без большой погрешности описан линейной зависимостью, принятой при теоретическом анализе.

Определена степень мультипликации давления в рабочем цилиндре за счет энергии продуктов сгорания, образующихся в камере сгорания. При искровом зажигании топливной смеси в камере сгорания степень мультипликации составила 1,4...1,5, что всего на 12...15% ниже теоретического значения, а при форкамерно-факельном зажигании она составила около 2,1...2,2, что на 16...18% ниже ее теоретического значения. В целом экспериментальные исследования подтвердили приемлемость основных результатов теоретического анализа и математической модели рабочего процесса, совершающегося в рабочем цилиндре устройства газовой штамповки.

Осуществлена практическая апробация разработанного устройства газовой штамповки. Установлены рациональные технологические режимы рабочего процесса для штамповки деталей типа днищ. Получена опытная партия сферообразных днищ требуемого качества.

## **6. ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВА ГАЗОВОЙ ШТАМПОВКИ С ПОРШНЕВЫМ МУЛЬТИПЛИКАТОРОМ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ШТАМПОВКИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

### **6.1 Разработка новых способов получения биметаллических изделий.**

Во многих отраслях промышленности используются биметаллические изделия. Это в частности емкости для хранения агрессивных жидкостей, топливные баки, посуда и другие аналогичные изделия. Эти изделия также могут производиться газовой штамповкой.

В настоящее время биметаллические изделия производятся различными методами [88–119]. Обзор и анализ существующих методов производства биметаллических изделий проведён в работе [120]. Для производства полых биметаллических изделий чаще всего используют диффузионную сварку либо электрическую контактную сварку. Проведенный анализ показал, что большинство существующих методов производства биметаллических изделий имеют малую производительность и высокую стоимость. В частности при диффузионной сварке процессы нагрева соединяемых деталей и их сварка осуществляется в вакууме [121], что существенно повышает стоимость оборудования. При этом процесс сварки длится от десятков минут до нескольких часов. Это в целом обуславливает высокую стоимость производимых биметаллических изделий. Для обеспечения широкого использования биметаллических изделий необходимо значительно снизить себестоимость их производства. Одним из путей решения этой задачи может быть использование газовой штамповки.

Для этого нами разработан новый способ изготовления двухслойных изделий [122]. Сущность этого способа заключается в том, что две уложенные друг на друга листовые заготовки нагревают в камере и осуществляют их диффузионную сварку за счёт приложения давления газа на внешние поверхности с обеих сторон заготовок, причём в качестве упомянутого газа используют продукты сгорания топливной смеси, которую подают под давлением в камеру с

заготовками и зажигают, при этом состав топливной смеси выбирают из условия получения температуры продуктов сгорания выше температуры плавления одной из заготовок. Кроме того, нагрев одной из заготовок может быть осуществлён до температуры выше температуры плавления другой заготовки. Причём, в процессе нагрева заготовок производят совместную их вытяжку за счет получения разности давлений топливной смеси с одной и другой стороны свариваемых заготовок. Таким образом, в данном способе процесс в диффузионной сварки листовых заготовок осуществляется нагревом заготовок, прижатием их друг другу и совместной их вытяжкой под двухсторонним воздействием продуктов сгорания топливной смеси. Длительность процесса составляет всего несколько секунд. Для пояснения сущности данного способа рассмотрим следующий пример. Изготовление двухслойного варочного котла из алюминиевого листа толщиной 2 мм (наружный слой) и листа толщиной 1 мм, из пищевой нержавеющей стали. В рабочую зону устройства листы устанавливают таким образом, чтобы алюминиевый лист был снизу, т.е. со стороны матрицы. В качестве топливной смеси используется смесь пропан-бутана со сжатым воздухом стехиометрического состава. Давление топливной смеси со стороны алюминиевого листа устанавливают в пределах 0,9...1,0 МПа, а со стороны стального листа - 1,4...1,5 МПа. При сгорании топливных смесей давление продуктов сгорания со стороны алюминиевого листа составляет 7,5...8,0 МПа, а со стороны стального листа - 11...12 МПа. Температура продуктов сгорания составляет 2000...2200 °С. Заготовки в течение 0,5...0,6 с нагреваются до 450...500 °С, что составляет 0,70...0,75 от температуры плавления алюминия. При этой температуре заготовки выдерживают в течение 0,4...0,5 с. Затем продукты сгорания со стороны алюминиевого листа выпускают. При этом под действием давления газа на стальной лист происходит окончательное формование изделия в полости матрицы. После этого изделие выдерживают под давлением в течение 4...6 с, затем газ со стороны стального листа выпускают. Полученный двухслойный котел по сравнению с котлом, изготовленным из пищевой

нержавеющей стали или чугуна, имеет значительно меньшее термическое сопротивление, что обеспечивает экономию тепловой энергии при варке. В работе [123] приводится пример разработки экспериментального устройства по данному способу получения двухслойных изделий.

Для уменьшения необходимой величины давления топливной смеси нами разработан другой способ [124]. Существенным его отличием от предыдущего способа является использование промежуточной прокладки, устанавливаемой между соединяемыми заготовками и имеющий значительно меньшую температуру плавления, чем температура плавления заготовок. Данный способ позволяет осуществлять диффузионную сварку не только листовых заготовок, но и деталей сложной формы. Для пояснения сущности этого способа диффузионной сварки рассмотрим следующий пример. Сварка панелей отопительного радиатора из алюминия. Радиатор состоит из двух профилированных панелей. Для осуществления сварки используют прокладку из олова, температура плавления которой составляет  $231,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Панели в сборе с прокладкой помещают в камеру и зажимают по внешнему контуру. Затем в камеру сгорания подают горючий газ и сжатый воздух, в результате чего образуются топливные смеси стехиометрического состава. Давление смеси устанавливается в зависимости от толщины панелей, в частности при толщине  $1\text{ мм}$  оно составляет  $0,3\dots 0,4\text{ МПа}$ . При помощи свечи производят зажигание топливной смеси. При сгорании топливных смесей давление и температура многократно увеличиваются. Под воздействием продуктов сгорания панели интенсивно нагреваются до  $300\dots 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Время нагрева составляет  $0,4\dots 0,6\text{ с}$ , после чего рост температуры панелей прекращается, т.е. наступает тепловое равновесие между газом и панелями. Теплота от панелей передается к прокладке, и она расплавляется. Затем панели выдерживают под давлением  $3\dots 6\text{ с}$ . Время выдержки зависит от толщины панелей. В течение этого периода температура панелей снижается и становится ниже температуры плавления прокладки, и происходит диффузионная сварка

между прокладкой и панелями. После этого продукты сгорания выпускаются из камеры, затем полученное изделие извлекается.

Оба рассмотренных способа получения биметаллических изделий могут быть осуществлены при помощи устройств газовой штамповки.

## **6.2 Экспериментальные исследования процесса штамповки биметаллических изделий.**

Биметаллические изделия могут быть получены при помощи устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления. Для практической апробации этой возможности были проведены экспериментальные исследования на устройстве газовой листовой штамповки с поршневым мультипликатором давления (рисунок 4.8).

Для проведения экспериментальных исследований были использованы следующие листовые материалы:

Сталь листовая – Лист Х/К	<u>Б - ПН - О – 0,5x1250x2500 ГОСТ 19904- 90</u> Ст3 – Ш – Г – ГОСТ 16523-89
Лист оцинкованный ОЦ	<u>Б - ПН - НО – 0,5x1000x2000 ГОСТ 19904- 90</u> 0,8ОН – КР – 1 – ГОСТ 14918-90

лист жестиной покрытый оловом (жесть пищевая) ЭЖК-0,28x836x716-Т6-НО-Е1,4-М ГОСТ Р 52204-2004, лист медный М1-0,5x600x1500 ГОСТ 495-92, фольга ФО – 0,07-130-130 ГОСТ 18394-73, припой оловянно-свинцовый ПОС 61. Исходя из источника [125], для повышения качества сварного шва, нарезанные на части заготовки были предварительно зачищены от загрязнений, масел, оксидных пленок и т.д. По этой причине для очистки поверхностей заготовок были проведены следующие операции:

1. Легкая очистка заготовок (тряпкой и т.п.)
2. Механическая очистка от ржавчин и разнородных включений на поверхности заготовок.
3. Химическая очистка заготовок от окисных пленок и жиров.

Эксперимент был проведен используя жестиновую заготовку в паре с оцинкованной, а между ними установили оловянную фольгу. Эксперименты

проводились при следующих технологических режимах; давление топливной смеси в рабочем цилиндре и камере сгорания – 0,6 МПа, а давление в полости матрицы – 0,3 МПа. При этом после зажигания топливной смеси в рабочем цилиндре и матрице через 0,6 с производили зажигание топливной смеси в камере сгорания. Время выпуска продуктов сгорания из полости матрицы после подачи искры в камеру сгорания было установлено 1 с, а затем через 0,7 с производили выпуск из рабочего цилиндра и камеры сгорания. Жестяная заготовка была расположена со стороны рабочего цилиндра, а оцинкованная со стороны матрицы. После проведения эксперимента результат показал, что заготовки спаялись по площади контактирования оловянной фольги с заготовками (рисунок 6.1), глубина составила 20...23 мм.



Рисунок 6.1 – Биметаллическое спаянное сферообразное днище (оцинкованная сталь + жесть пищевая).

Далее был проведен эксперимент, используя стальную заготовку и оцинкованную. Для припоя был использован припой оловянно-свинцовый ПОС 61. Оцинкованная заготовка была установлена со стороны камеры сгорания, а стальная со стороны полости матрицы. Технологические режимы не были изменены. После проведения эксперимента результат показал, что заготовки спаялись в местах контакта припоя с заготовками (рисунок 6.2). Глубина вытяжки составила 10..13 мм.

Последний эксперимент проводился, используя оцинкованную заготовку в паре с медной.



Рисунок 6.2 – Биметаллическое спаянное сферообразное днище  
(сталь+оцинкованная сталь)

Со стороны камеры сгорания была установлена оцинкованная заготовка, а со стороны полости матрицы была установлена медная. Между заготовками была установлена оловянная фольга. Технологические режимы не были изменены. После проведения эксперимента результат показал, что заготовки схватились по месту контакта с оловянной фольгой (рисунок 6.3). Глубина вытяжки составила 12..15 мм.



Рисунок 6.3 – Биметаллическое спаянное сферообразное днище  
(медь+оцинкованная сталь)

### Заключение по разделу

Проведенные экспериментальные исследования в целом подтвердили возможность получения биметаллических изделий методом газовой штамповки. При этом установлено, что изделия диаметром 160 мм и толщиной до 1 мм могут быть получены при давлении топливной смеси 0,6...0,7 МПа с использованием

расплавляющихся промежуточных прокладок, в частности оловянной фольги. Если не использовать проплавляемую прокладку, то давление топливной смеси 0,6... 0,7 МПа не обеспечивает соединения. В связи с этим для обеспечения соединения заготовок по всей поверхности и получения полноценного биметаллического изделия без применения промежуточных прокладок требуется большее давление топливной смеси, обеспечивающее нагрев заготовок до интервала горячей обработки и их сваривание между собой. Исходя из проведенных теоретических исследований (рисунок 3.18) можно предположить, что для штамповки биметаллических полых изделий без использования промежуточных прокладок на данном устройстве давление топливной смеси должно быть равным 1,7 МПа.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе выполнения диссертационной работы были получены следующие результаты:

- выполнен обзор существующих методов листовой газовой штамповки;
- выполнен анализ путей расширения технологических возможностей газовой штамповки и конструктивных решений для их реализации, в ходе которого были разработаны новые конструктивные схемы устройства газовой штамповки, обеспечивающие расширение технологических возможностей газовой штамповки за счет увеличения давления и температуры газа на поверхности обрабатываемой заготовки;
- выполнена разработка конструктивной схемы устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления, осуществляющая штамповку листовых деталей из стали и цветных сплавов с нагревом заготовки до интервала температур теплой или горячей обработки;
- проведены теоретические исследования рабочего процесса газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления, что позволило установить основные закономерности этого процесса, которые подтверждены результатами экспериментальных исследований, так же разработана математическая модель рабочего процесса в ходе которой были определены оптимальные соотношения параметров процесса,  $\vartheta_k = 1 \dots 2$ ,  $\Pi = 2 \dots 3$ ,  $\tau_n = 0,5 \dots 0,8$  с;
- разработано и создано экспериментальное устройство газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления;
- выполнена разработка технологии производства штамповки сферообразных днищ на устройстве газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления;
- проведены экспериментальные исследования рабочего процесса устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления, в ходе которых были определены закономерность изменения давления в рабочем

цилиндре устройства и степень мультипликации давления, что подтвердило адекватность разработанной математической модели этого процесса;

– произведена практическая апробация устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления, а так же произведена оценка его технологических возможностей. Определен оптимальный технологический процесс и получена опытная партия сферообразных днищ;

– экспериментально подтверждена возможность использования устройства газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления для штамповки биметаллических изделий, защищенные патентами на изобретение.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чачин, В. Н. Листовая штамповка на электрогидравлических установках / Чачин В. Н. и др. // Промышленность Белоруссии. - 1975. №7. С.92-93.
2. Чачин, В. Н. Электрогидравлическая обработка машиностроительных материалов / В. Н. Чачин. - Минск: Наука и техника. 1978. - 184 с.
3. Чачин В. Н. Электрогидроимпульсное формообразование с использованием замкнутых камер / В. Н. Чачин и др. - Минск: Наука и техника. 1985. - 199 с.
4. Чачин, В.Н. Листовая штамповка с использованием импульсных нагрузок / В.Н. Чачин, Ю.Е. Шамарин, А.Ю.Журавский и др. - К.:УМК ВО, 1989. - 108 с.
5. Altan T. Metal forming. Fundamental and applications/ T. Altan, S. Oh, H. Gegel. - American Society for Metals, Metals Park, OH 1983 - 353 p.
6. Bariani P.F. Evaluating of press stiffnes in realistic operation condition / P.F. Bariani. A. Ghiotti. - 8-th ESAFORM Conference. Iuj-Napoca, 2005. - 390 p.
7. K. Siegert, M. Haussermann, D. Haller, S. Wagner, and M. Ziegler, Tendencies in Presses and Dies for Sheet Metal Forming Process / Siegert K., Haussermann M., Haller D., Wagner S., Ziegler M., // Journal of Materials Processing Technolou, Vol 98, 2000, p 259-264.
8. Konnerth, U. A Hydraulic High-speed Tryout Press for the Simulation of Mechanical Forming Processes,/ U. Konnerth // Journal of Materials Processing Echnologj Vol 111, 2001, p 159-163.
9. Lange K. Umformtechnik. Handbuch fur Industrie und Wissenschaft. - Band 1 : Grunldlagen / K. Lange. - Springer ; Verlag; Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo, 1984. - 535p.
10. Trostmann, E. Water Hydraulics Control Echnologj Marcel Dekker. E. Trostmann, 1996.
11. Tschatsch, H. Metal Forming Practise: Processes-Machines- Tools. H. Tschatsch ,Springer 2006.
12. Брагин, А. П. Гидродинамическая штамповка на пресс-пушках, как одно из направлений импульсной обработки материалов давлением / А. П. Брагин //

- Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – №11 (47). – С. 296-304.
13. Астапов, В. Ю. Экспериментальное определение формообразования профиля окантовок из листового материала воздействием импульсного магнитного поля / В. Ю. Астапов, М. С. Джоздани, А. П. Попов, С. П. Королева // Кузнечно-штамповочное производство. – 2011. – № 8. – С. 8-11.
14. Алексеев, П. А. Моделирование процесса формообразования осесимметричной оболочки в режиме сверхпластичности / П. А. Алексеев, Е. В. Панченко // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Вып. 3. – С. 181-185.
15. Алексеев, Ю. Н. Вопросы пластичного течения металлов / Ю. Н. Алексеев. – Харьков: изд-во ХГУ, 1958. – 184 с.
16. Борисевич, В. К. Влияние передающей среды на деформирование и точность детали при импульсной штамповке / В. К. Борисевич, А. Г. Нарыжный, С. И. Молодых // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. - № 11 (47). – С. 173-181.
17. Борисевич, В. К. Проблемы многофакторного моделирования импульсных процессов при изготовлении оболочек двойной кривизны / В. К. Борисевич, С. И. Молодых, В. В. Третьяк // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. - № 1 (48). – С. 44-49.
18. Борисевич, В. К. Разработка научных основ оптимального проектирования технологических процессов листовой штамповки взрывом деталей летательных аппаратов и двигателей / В. К. Борисевич. – Дис. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук. – Харьков, 1980.
19. Зимин, А. И. Машины и технология обработки металлов давлением / А. И. Зимин. – М.: Машгиз, 1960.
20. Зорик, В. Я. Проблемы совершенствования технологического проектирования импульсной штамповки за счет использования специальных приемов / В. Я.

- Зорик, В. В. Третьяк, А. Ю. Комаров // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008.- №9 (56).-С. 8-14.
21. Зорик, В. Я. Расчет импульсного нагружения объектов технологической системы / В. Я. Зорик, В. В. Третьяк, А. Ю. Комаров // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. - № 7 (43). - С. 8-11.
22. Комаров, А. Ю. Результаты классификационной обработки данных для выбора специальных приемов при изготовлении деталей импульсной штамповкой / А. Ю. Комаров, В. В. Третьяк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. - № 9 (76). – С. 22-24.
23. Кононенко, В. Г. *Высокоскоростное формоизменение и разрушение металлов* / В. Г. Кононенко - Харьков: Изд.: ХГУ, 1980. 232 с.
24. Кононенко, В. Г. Решение плоской задачи высокоскоростной обработки металлов давлением / В. Г. Кононенко // *импульсная обработка металлов давлением*. – Харьков: ХАИ, 1970.- Вып. 2.- С. 3-13.
25. Кривцов, В. С. О выборе моделей упруго-пластического деформирования листовых заготовок в авиа- и автомобилестроении / В. С. Кривцов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. - №1 (37). – С. 13-16.
26. Кривцов, В. С. Состояние и перспективы применения импульсных источников энергии для технологических процессов обработки материалов / В. С. Кривцов, В. К. Борисевич // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 11 (47). – С. 10-17.
27. Нарыжный, А. Г. Факторы и этапы, определяющие точность импульсной штамповки осесимметричных деталей / А. Г. Нарыжный // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – №11 (47). – С. 125-131.
28. Пихтовников, Р.В. *Штамповка листового металла взрывом* / Р. В. Пихтовников, В. И. Завьялова. – М.: Машиностроение, 1964. – 175 с.
29. Стадник, С. А. Особенности использования импульсных технологий для изготовления деталей авиационных двигателей / С. А. Стадник, В. В. Третьяк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. - №10 (57). – С. 8-11.

30. Третьяк, В. В. Алгоритм и его реализация в расчетах параметров технологических процессов импульсной штамповки / В. В. Третьяк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 8 (75). – С. 11-14.
31. Третьяк, В. В. Вопросы синтеза и оптимизации технологических процессов импульсной обработки / В. В. Третьяк, А. Ю. Комаров, С. А. Стадник // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – №4(61). – С. 9-13.
32. Третьяк, В. В. Возможности использования технологии ударной импульсной штамповки для изготовления листовых деталей сложной конфигурации / В. В. Третьяк, В. С. Иванов, А. Я. Мовшович // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 2 (59). – С. 36-40.
33. Третьяк, В. В. Математическая модель классификационной обработки данных для принятия технологических решений при изготовлении деталей импульсными способами из плоской заготовки / В. В. Третьяк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 6 (63). – С. 30-36.
34. Третьяк, В. В. Особенности импульсной штамповки объемных деталей авиационной техники / В. В. Третьяк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 2 (79). – С. 42-46.
35. Бочаров Ю.А. Кузнечно-штамповочное оборудование: учебник для студ. высш. заведений / Ю.А. Бочаров. -М.: Издательский центр “Академия”, 2008. - 480 с.
36. Ларин, С. Н. Пневмоформовка ячеистых панелей из анизотропного материала / С.Н. Ларин // *Известия ТулГУ. Технические науки*. Вып. 3. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – С. 51-61.
37. Оборудование для изотермической пневмоформовки высокопрочных материалов в режиме кратковременной ползучести / В. Н. Чудин, С. Н. Ларин, С. С. Яковлев, Я. А. Соболев // *Известия ТулГУ. Технические науки*. Вып. 3. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – С. 46-50.
38. Грязев, М. В. Изотермическое деформирование полусферических деталей из листового материала с плоскостной анизотропией в режиме ползучести / М. В.

- Грязев, С. С. Яковлев, С. Н. Ларин // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – Вып.1. – С. 173-184.
39. Грязев, М. В. К вопросу о предельных возможностях формоизменения при медленном горячем деформировании анизотропного листового материала / М. В. Грязев, С. С. Яковлев, С. Н. Ларин // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – Вып.4. – С. 3-8.
40. Грязев, М. В. Математическая модель изотермического деформирования полусферических деталей из трансверсально-изотропных материалов в режиме ползучести / М. В. Грязев, С. С. Яковлев, С. Н. Ларин // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – Вып.1. – С. 27-36.
41. Ларин, С. Н. Технологические параметры процесса формообразования куполообразных изделий из анизотропного материала в режиме ползучести / С. Н. Ларин // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – Вып.3. – С. 469-476.
42. Экспериментальные исследования изотермического формоизменения вафельных конструкций / С. Н. Ларин, С. С. Яковлев, В. Н. Чудин, Е. В. Леонова // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – Вып.1. – С. 245-252.
43. Яковлев, С. П. Проектирование технологических процессов изотермической глубокой вытяжки цилиндрических деталей / С. П. Яковлев, А. В. Черняев, О. В. Пилипенко // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2008. – Вып.1. – С. 103-110.
44. Яковлев, С. С. Влияние анизотропии механических свойств на напряженное и деформированное состояния заготовки при изотермическом деформировании полусферических деталей / С. С. Яковлев, С. Н. Ларин, А. В. Чарин // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – Вып.2. – С. 202-208.
45. Яковлев, С. С. Потеря устойчивости фланца анизотропной заготовки при вытяжке осесимметричных деталей / С. С. Яковлев, К. С. Ремнев, А. Е. Калашников // Обработка материалов давлением. – 2012. – №1(30).

46. Яковлев, С. С. Технологические параметры процесса реверсивной вытяжки осесимметричных деталей с фланцем из анизотропного материала / С. С. Яковлев, Е. Ю. Поликарпов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. № 4. – С. 25-30.
47. Яковлев, С. С. Характер формоизменения при изотермическом стесненном деформировании анизотропной листовой заготовки в прямоугольную матрицу / С. С. Яковлев, С. Н. Ларин // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – Вып.1. – С. 50-62.
48. Поликарпов, Е. Ю. Штамповка полусферических тонкостенных днищ / Е. Ю. Поликарпов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. № 11. – С. 15-18.
49. Проектирование импульсных технологий с использованием специальных приемов / А. Ю. Комаров, В. В. Третьяк, В. Я. Зорик, И. В. Клыгина // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – №11 (47).- С. 168-172.
50. Особенности электрогидроимпульсной штамповки деталей с локальными элементами большой кривизны / А. И. Долматов, Я. С. Жовноватюк, М. К. Князев, О. В. Мананков // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. - № 10 (67). – С. 31-35.
51. Ларин, С. Н. Изотермическое свободное деформирование узкой прямоугольной мембраны из анизотропного листового материала при кратковременной ползучести / С. Н. Ларин, А. В. Бессмертный // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – Вып.1. – С. 44-51.
52. Ларин, С. Н. Изотермическое формоизменение куполообразных оболочек / С. Н. Ларин // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011.- Вып.4. – С. 77-81.
53. Степанов, В. Г. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов / В. Г. Степанов, И. А. Шавров – Л.: Машиностроение, 1975, 280 с.

54. Пат. 2049580 Российская Федерация, RU 2049580 МПК В21D 26/06. Способ газовой детонационной штамповки листового материала, патент на изобретение / Ю. В. Ольховский. Оpubл. 10.12.1995.
55. Пат. 2042458 Российская Федерация, RU 2042458 МПК В21D 26/08. Способ газовой детонационной штамповки, патент на изобретение / А.Л. Гладченко, Ю. В. Ольховский. Оpubл. 27.08.1995.
56. Пат. 2106218 Российская Федерация, RU 2106218 МПК В21D 26/08. Способ газовой детонационной штамповки и устройство для его реализации, патент на изобретение / Ю.В. Ольховский. Оpubл. 10.03.1998.
57. Боташев, А. Ю., Исследование процесса газоимпульсной штамповки / А. Ю. Боташев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999.- №11. – С. 20-22.
58. Ковалевич, М. В. Расчет режимов пневмотермической формовки деталей коробчатой формы в режиме сверхпластичности / М. В. Ковалевич // Кузнечно-штамповочное производство. – 2006. - №9. - С. 35-39.
59. Малсугенов Р.С. Разработка технологии и оборудования для газовой формовки с противодавлением тонколистовых деталей: дис. канд. техн. наук: 05.02.09/ Р.С. Малсугенов – Москва, 2016. – 143 с.
60. Пат. 169410 Российская Федерация, RU 169410 МПК В21D 26/08. Устройство для листовой штамповки взрывом газовых смесей, патент на полезную модель / А. Ю . Боташев, Р. А. Байрамуков, Н. У. Бисилов, Р. С. Малсугенов, . Оpubл. 16.03.2017 Бюл. № 8.
61. Теплотехника / А. П. Баскаков, Б. В. Берг, О. К. Витт и др. – М.: Энергоиздат, 1982. – 264 с.
62. Двигатели внутреннего сгорания / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.- М.: Машиностроение, 1983.- 372 с.
63. Байрамуков, Р.А. Устройство для листовой штамповки взрывом газовых смесей/ Актуальные проблемы современной науки: состояние, тенденции развития: сборник материалов I Всероссийской научно-практической

- конференции. / СевКавГГТА. – Черкесск: БИЦ СевКавГГТА, 2017. – С. 172-176.
64. Пат. 172758 Российская Федерация, RU 172758 МПК В21D 26/08. Устройство для листовой штамповки взрывом газовых смесей, патент на полезную модель / А. Ю. Боташев, Р. А. Байрамуков, Н. У. Бисилов, Р. С. Малсугенов, Х. Ю. Боташева. Оpubл. 21.07.2017 Бюл. № 21.
65. Живов, Л. И. Кузнечно-штамповочное оборудование: учебник для вузов / Л. И. Живов, А. Г. Овчинников, Е. Н. Складчиков; под ред. Л. И. Живова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 560 с.: ил.
66. Боташев, А.Ю., Разработка конструктивной схемы устройства газовой штамповки со ступенчатой камерой сгорания/ А.Ю.Боташев, Р.А. Байрамуков//Известия Северо-Кавказской государственной гуманитарно-технологической академии. -2018. С. 14-20.
67. Пат. 178276 Российская Федерация, RU 178256 МПК В21 D 26/08. Устройство для листовой газовой штамповки, патент на полезную модель / А. Ю. Боташев, Р. А. Байрамуков, Н. У. Бисилов, Р. С. Малсугенов опубл. 28.03.2018 Бюл. № 10.
68. Боташев, А.Ю., Разработка устройства для штамповки биметаллических изделий воздействием высокотемпературного газа/ А.Ю. Боташев, Р.А. Байрамуков//Известия Северо-Кавказской государственной гуманитарно-технологической академии. -2017. №3. -С. 8-12.
69. Коликов, А.П. Теория обработки металлов давлением: учеб./ А.П. Коликов, Б.А. Романцев. М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. -451 с.
70. Обработка металлов давлением: учеб. / Б.А. Романцев, А. В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. М.: МИСиС, 2008. 960 с.
71. Бисилов, Н. У. Исследование приемов расширения технологических возможностей высокоскоростной листовой штамповки: дис. канд. техн. наук: 05.02.09/ Н. У. Бисилов. – Черкесск, 2014. – 119 с.

72. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей / И.И. Вибе.–М.: Наука, 1962.– 365 с.
73. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. / М. В. Сторожев, Е. А. Попов – М., «Машиностроение», 1977. – 423с. с илл.
74. Схиртладзе, А.Г. Сопротивление материалов: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования/ А.Г. Схиртладзе, Б.В. Романовский, В.В. Волков, А.Н.Потемкин. – М: Издательский центр «Академия», 2012. - 416 с.
75. Боташев, А. Ю. Исследование процесса нагрева заготовки при газовой листовой штамповке / А. Ю. Боташев, Н. У. Бисилов, Р. С. Малсугенов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2014. - №5. – С. 20-24.
76. Чечета, И. А. Технологические процессы в машиностроении. Исходные параметры и определения: учеб.пособие / И. А. Чечета. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГТУ», 2012. – 200 с.
77. Боташев, А. Ю. Исследование процесса нагрева заготовки при газовой формовке с противодавлением / А. Ю Боташев, Н. У. Бисилов, Р. С. Малсугенов, Р. А. Байрамуков. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. -2016. -№8. -С. 51-59.
78. Журавлев, В. Н. Машиностроительные стали: Справочник / В. Н. Журавлев, О. И. Николаева. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение , 1992. – 480 с.
79. Дьяченко В.Г. Теория двигателей внутреннего сгорания. Учебник/ В.Г. Дьяченко – Перевод с украинского языка. – Харьков: ХНАДУ, 2009. - 500 с.
80. Ковылов, Ю.Л. Теория рабочих процессов и моделирование процессов ДВС: учеб. / Ю.Л. Ковылов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2013. -416 с.: ил.
81. Ерофеев В.Л., Теплотехника: Учебник для вузов. / В.Л. Ерофеев, П.Д. Семенов, А.С. Пряхин. Под ред. д-ра техн. наук, проф. В.Л. Ерофеева. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2008. – 488 с.

82. Заусаев, А. Ф. Разностные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений: Учеб. пособ. А. Ф. Заусаев. Самара: Самарский гос. Техн. ун-т, 2010. 100 с.
83. Боташев, А. Ю., Исследование газовой листовой штамповки с двусторонним нагревом заготовки / А. Ю. Боташев, Н. У. Бисилов// Заготовительные производства в машиностроении. - 2013. - №3. -С. 25-28.
84. Боташев, А.Ю., Разработка и исследование устройства для газовой листовой штамповки с поршневым мультипликатором давления/А.Ю.Боташев, Р.А. Байрамуков//Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. -2018 Т. 17-№2. -С. 132-144.
85. Михайлов, А.М. Сопротивление материалов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / А.М. Михайлов. -М.: Издательский центр “Академия”, 2009. -448 с.
86. Шелофаст, В.В. Основы проектирования машин/ В.В.Шелофаст. -М.:Изд-во АПМ. 2004. -472 с.
87. Зубцов, М. Е. Листовая Штамповка / М. Е. Зубцов.ми – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд., 1980. – 432с., ил.
88. Каракозов, Э. С. Соединение металлов в твердой фазе./ Э. С. Каракозов. –М., “Металлургия”, 1976. –264 с.
89. Антонов, В. П. Диффузионная сварка материалов: Справочник/ В. П. Антонов и др.; Под ред. Н. Ф. Казакова. -М.: Машиностроение, 1981. -271 с., ил.
90. Бокштейн, Б.С. Диффузия в металлах./ Б.С. Бокштейн. -Москва.: “Металлургия”, 1978. -246 с.
91. Казаков, Н. Ф. Оборудование Диффузионной сварки. Сборник №7./ Н. Ф. Казаков, В. В. Жуков.; Под ред. Н. Ф. Казакова. Москва. 1973. -231 с.
92. Мусин, Р. А. Диффузионная сварка жаропрочных сплавов./ Р. А. Мусин, В. Н. Анциферов, В. Ф. Квасницкий. -М., “Металлургия”, 1979. - 208 с.
93. Каракозов, Э. С. Сварка металлов давлением / Э. С. Каракозов. - Москва : Машиностроение, 1986. - 276 с. : ил.,.

94. Конон, Ю. А. Сварка взрывом/ Ю. А. Конон, Л. Б. Первухин, А. Д. Чудновский; Под ред. В. М. Кудинова. -М.,Машиностроение, 1987. -216 с.: ил.
95. Захаренко, И. Д. Сварка металлов взрывом/ И .Д. Захаренко. -Мн.:Наукова і тэхніка, 1990. -205 с.
96. Кудинов, В. М. Сварка взрывом в металлургии/ В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев. -М.: “Металлургия”, 1978. -168 с.
97. Банов, М. Д. Технология и оборудование контактной сварки:учебник для студ учреждений сред. проф. образования / М. Д. Банов. -3-е изд., стер. - М.: Издательский центр “Академия”, 2008. -224 с.
98. Кочергин, К. К. Контактная сварка./ К. К. Кочергин. -Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. 1987. -240 с.: ил.
99. Орлов, Б. Д. Технология и оборудование контактной сварки: Учебник для машиностроительных вузов/Б. Д. Орлов, А. А. Чакалев, Ю. В. Дмитриев, А. Л. Марченко и др.; Под общ. ред. Б. Д. Орлова. -2-е изд., перераб. и доп. -М.: Машиностроение, 1986. -352 с., ил.
100. Романов, Д. И. Электроконтактный нагрев металлов./ Д. И. Романов. -2-е изд., перераб. и доп. -М.: Машиностроение, 1981. -168 с., ил.
101. Саликов, В. А. Оборудование для контактной сварки: справочное пособие / В. А.Саликов ; СПб.: Энергоатомиздат, 2000. - 848 с.
102. Технология и оборудование контактной сварки. Учебное пособие для машиностроительных и политехнических вузов по специальности “Оборудование и технология сварочного производства”/ Б.Д.Орлов Б.Д. [и др.]; под ред. Б.Д.Орлова, М., “Машиностроение”, 1975. - 536 с., с ил.
103. Чулошников, П. Л. Контактная сварка. В помощь рабочему-сварщику./ П. Л. Чулошников. М., "Машиностроение", 1977. -144 с. с ил.
104. Глебов, Л. В. Расчет и конструирование машин контактной сварки/ Л. В. Глебов, Н. А. Пескарев, Д. С. Файгенбаум. -2-е изд., перераб. и доп. - Л.:Энергоиздат. Леннигр. отд-ние, 1981. -421 с., ил.

105. Дудин, А. А. Магнитно-импульсная сварка металлов./А. А. Дудин. М., “Металлургия”, 1979. -128 с.
106. Стрижаков, Н. А. Автоматизированная установка для магнитно-импульсной сварки : справочное пособие / Н. А. Стрижаков, И.С. Хахин, Бацемакин М.Ю. – 2-е изд. – М. : Стройиздат, 2007. – 416с.
107. Библиотечка электротехнолога. Выпуск 4. Ультразвуковая обработка материалов./ В. Ю. Вероман, А. Б. Аренков. -Л., “Машиностроение”, 1971. -168 с. илл.
108. Волков, С. С., Сварка пластмасс ультразвуком./ С. С. Волков, Б. Я. Черняк. 2-е изд., перераб. и доп. -М., Химия, 1986. -256 с.
109. Применение ультразвука в промышленности./ Г. С. Ангелов, И. Н. Ермолова, А. И. Марков и др., под ред. д-ра техн. наук проф А. И. Маркова. - М., “Машиностроение”, 1975. -240 с.
110. Физика и техника мощного ультразвука, том III. Физические основы ультразвуковой технологии./Под ред. проф. Л. Д. Розенберга. -М., “Наука”, 1970. -686 с. ил.
111. Холопов, Ю. В. Оборудование для ультразвуковой сварки./ Ю. В. Холопов . -Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. -168 с, ил.
112. Холопов, Ю. В. ультразвуковая сварка пластмасс и металлов/ Ю. В. Холопов . -Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1988. -224 с, ил.
113. Хорбенко, И. Г. Ультразвук в машиностроении./ И. Г. Хорбенко. -Изд. 2-е, перераб. и доп. М., “Машиностроение”, 1974, -280 с.
114. Кратыш, Г. С. Ультразвуковая сварка - “Технология и аппаратура для промышленного применения ультразвука”/ Г. С. Кратыш. ЛДНТП, 1970, 24 с.
115. Мицкевич, А. М. Ультразвуковая сварка металлов - “Физические основы ультразвуковой технологии”/ А. М. Мицкевич. М., “Наука”, 1970, -71 с.
116. Голованенко, С. А. Производство биметаллов./ С. А. Голованенко, Л. В. Меандров. -М., “Металлургия”, 1986. -303 с. ил.

117. Голованенко, С. А. Сварка прокаткой биметаллов./С. А. Голованенко – М., "Металлургия", 1977. –160с.
118. Байрамуков, Р. А. Исследование процесса получения биметаллических полых изделий методом высокотемпературной вытяжки. / Р. А. Байрамуков //Иновационные технологии нового тысячелетия: сборник статей Международной научно-практической конференции, (25 сентября 2016 г., г. Пермь). В 2 ч. Ч.1 / - Уфа: АЭТЕРНА, 2016. -С. 11-16.
119. Головачев, В. А. Высокопрочные биметаллические соединения / В. А. Головачев, Н. А. Комаров. – Машиностроение, 1974. – 192 с.
120. Байрамуков, Р. А. Анализ методов получения биметаллов обработкой давлением / Р. А. Байрамуков // Новая наука теоретический и практический взгляд: Международное научное периодическое издание по итогам Международной научно-практической конференции (14 февраля 2016 г., г. Нижний Новгород). / в 3 ч. Ч.2 - Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2016. – С. 125-132.
121. Казаков, Н. Ф. Диффузионная сварка в вакууме / Н. Ф. Казаков. – Машиностроение, 1968. – 332 с.
122. Пат. 2643293 Российская Федерация, RU 2643293 МПК В23К 20/14. Способ изготовления двухслойных изделий, патент на изобретение / А. Ю. Боташев, Р. А. Байрамуков, Н. У. Бисилов, Х. Ю. Боташева, Р. С. Малсугенов, . Оpubл. 31.01.2018 Бюл. № 4.
123. Байрамуков, Р. А. Разработка схемы экспериментального устройства для проведения исследований получения биметаллических изделий методом высокотемпературной вытяжки/ Р. А. Байрамуков, Э. Х. Джуманазаров.// Интеграция науки, общества, производства и промышленности: сборник статей Международной научно - практической конференции (13 января 2017 г., г. Казань). - Уфа: АЭТЕРНА, 2016. -С. 23-25 .
124. Пат. 2643294 Российская Федерация, RU 2643294 МПК В23К 20/16. Способ диффузионной сварки, патент на изобретение / А. Ю . Боташев, Р. А.

Байрамуков, Н. У. Бисилов, Х. Ю. Боташева, Р. С. Малсугенов, . Оpubл.  
31.01.2018 Бюл. № 4.

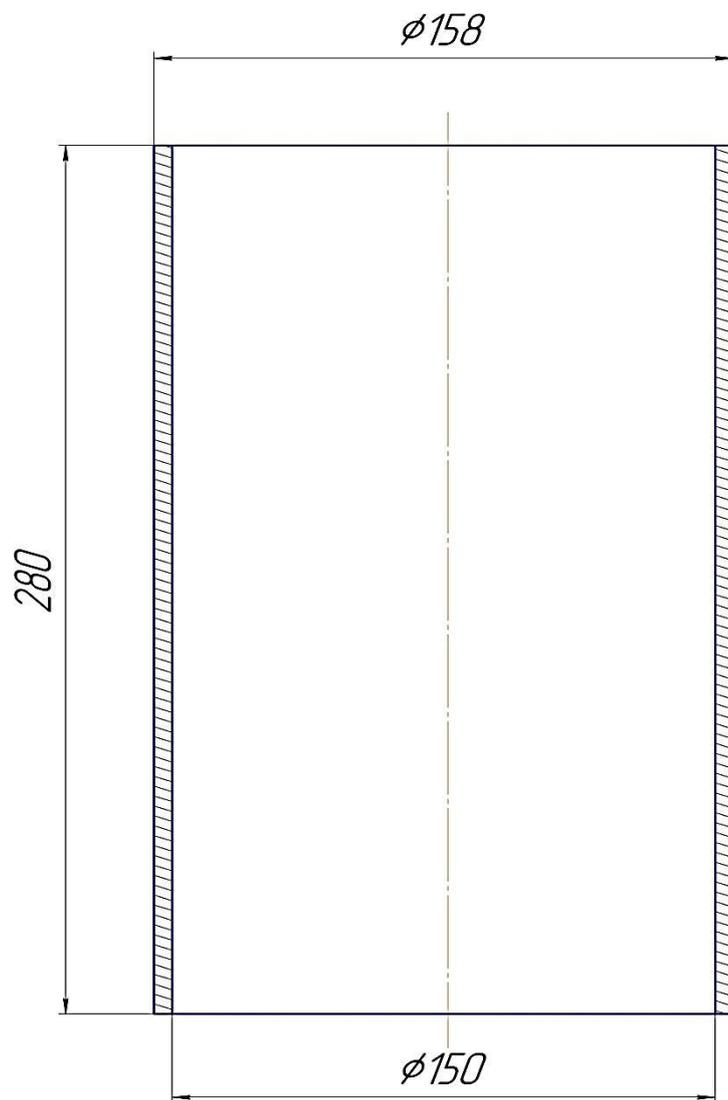
125. Казаков, Н. Ф. Диффузионная сварка материалов./ Н. Ф. Казаков. -Изд. 2-е,  
перераб. и доп. -М.: "Машиностроение", 1976. - 312 с.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**



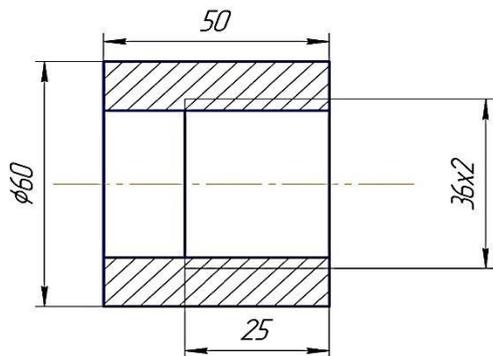
Приложение 2

Гильза

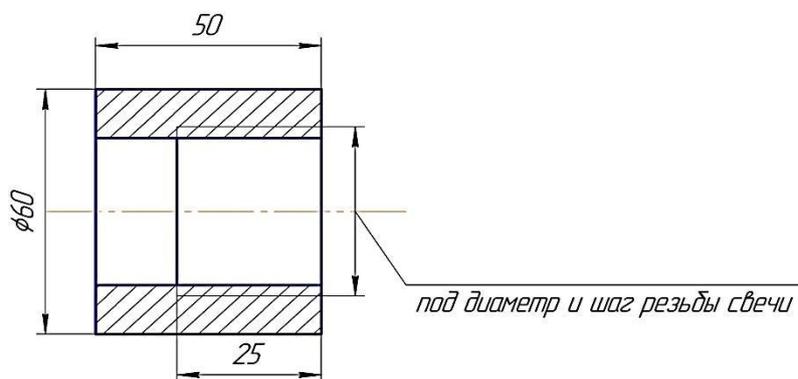


Приложение 3

Бобышки



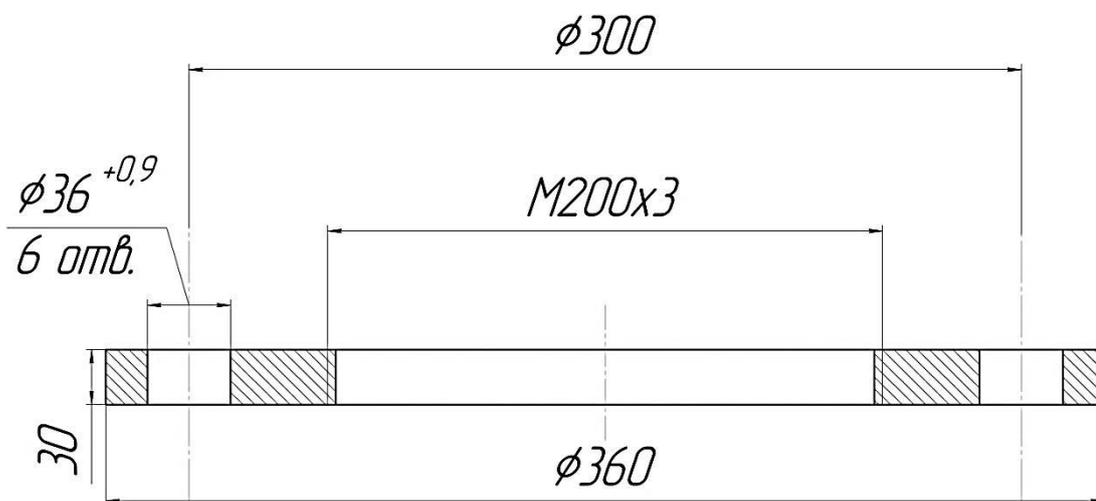
*изготовить бобышки с внутренним диаметром  $\phi 36 \times 2$  в количестве 6 штук*



*изготовить бобышки с внутренним диаметром и шагом свечи в количестве 2 штук*

Приложение 4

Фланец



*Острые кромки притупить*

Паспорт пропан-бутанового газа



**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
ООО "РН-БУЗУЛУКСКОЕ ГАЗОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЕ ПРЕДПРИЯТИЕ"**

Юридический адрес: 461040, Россия, Оренбургская обл., г. Бузулук, ул. Техническая, 10,  
Тел. (35342) 39-601, факс 39-602, электронный адрес BGPP\_Rnetaiava@rosneft.ru  
Адрес изготовителя: Россия, Оренбургская обл., Первомайский район, Зайкинский ГПП  
Декларация о соответствии ЕАЭС № RU.L-RU.AD82.V.00058, действительна до 24.04.2021г.

ПАСПОРТ КАЧЕСТВА № 917

**Газ углеводородный сжиженный ГОСТ Р 52087-2003  
Пропан-бутан технический (ПБТ)**

ОКП Д2 19.20.31 ТН ВЭД ЕАЭС 2711129700

Партия № 917  
Цистерна № 57520884

Дата изготовления 13.06.2018  
Масса нетто, т 24,4  
Объем нетто\*, л 45920

Отбор проб и испытания проведены ЦЗЛ ООО «РН-БГПП», аттестат аккредитации № RA.RU.21NB22 от 06.03.2018г.

Наименование показателя	Метод испытания	Норма		Фактическое значение
		ТР ЕАЭС 036/2016	ГОСТ Р 52087-2003	
1. Октановое число	Приложение В ГОСТ EN 589	не нормируется		93,70
2. Массовая доля компонентов, % сумма метана, этана и этилена	ГОСТ 10679	не нормируется		0,53
сумма пропана и пропилена		не нормируется		62,48
в том числе пропана		не нормируется		62,48
сумма бутанов и бутиленов, не более в том числе:		не нормируется	60	36,91
изобутана		не нормируется		11,65
н-бутана		не нормируется		25,23
бутилена		не нормируется		0,03
сумма непредельных углеводородов		не нормируется		менее 0,1
3. Объемная доля жидкого остатка при плюс 20° С, %, не более	ГОСТ 52087 п.8.2	1,8	1,6	0,1
4. Давление насыщенных паров, избыточное, МПа, при температуре: плюс 45 °С, не более	ГОСТ 28656 п.2	1,6	1,6	1,19
минус 20° С		не нормируется		0,14
5. Массовая доля сероводорода и меркаптановой серы, %, не более	ГОСТ 50802	0,013	0,013	0,004
в том числе сероводорода, %, не более		0,003	0,003	0,0002
6. Содержание свободной воды и щелочи	ГОСТ 52087 п.8.2	отсутствие	отсутствие	отсутствие
7. Интенсивность запаха, баллы, не менее	ГОСТ 22387.5	3	3	3
8. Плотность сжиженного газа при 15°С, кг/м³	ГОСТ 28656 п.1	не нормируется		531,36

\*Объем нетто(литры) продукта рассчитан исходя из плотности при 15°С

Продукт соответствует требованиям ТР ЕАЭС 036/2016 "Требования к сжиженным углеводородным газам для использования их в качестве топлива" в качестве топлива для коммунально-бытового и производственного потребления.

Продукт соответствует требованиям ГОСТ Р 52087-2003 для марки ПБТ

Газ одорирован

Дата выдачи паспорта № 917

13.06.2018

Старший лаборант ЦЗЛ

О.А.Телина

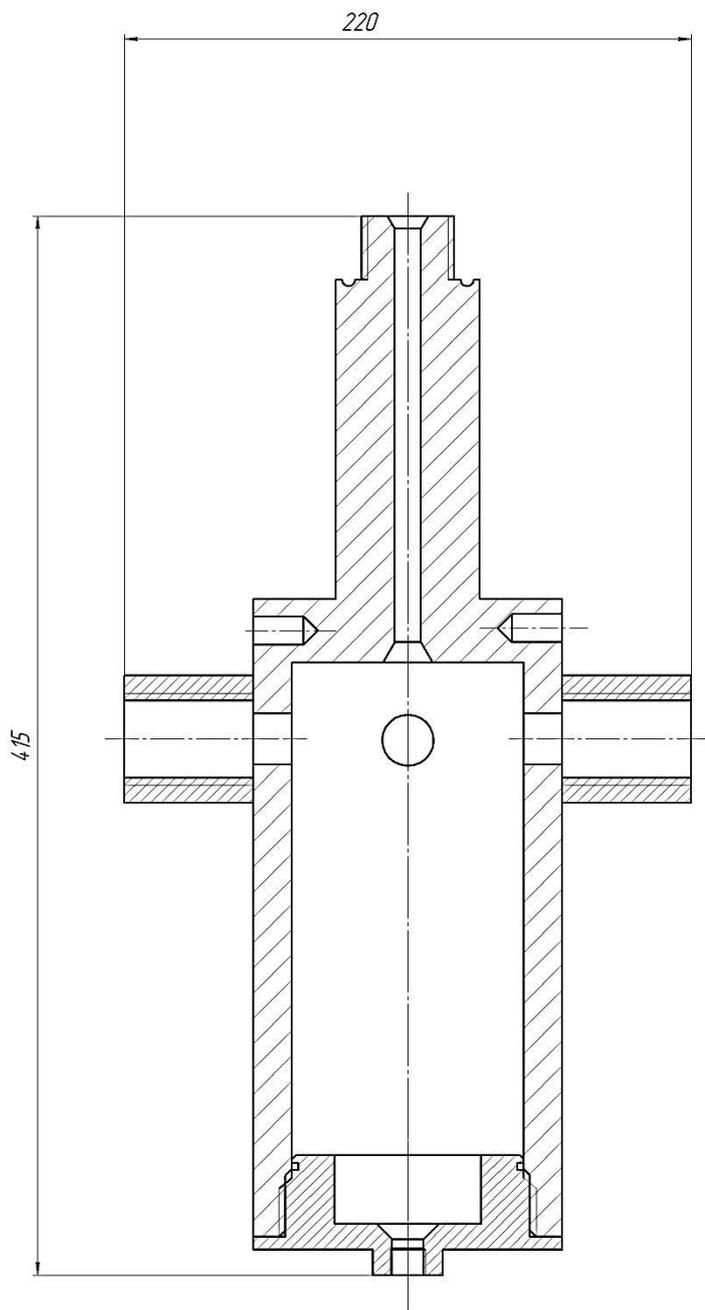
Начальник смены

Н.С.Иванов

*Изготовитель гарантирует соответствие продукта требованиям стандарта и технического регламента в течение 6 месяцев со дня изготовления при соблюдении правил транспортирования и хранения*

*Перепечатка и копирование данного паспорта без разрешения ООО "РН-Бузулукского ГПП" запрещены*

Приложение 6  
Форкамера





Индивидуальный предприниматель

Батчаев Руслан Абрек-Заурович

Адрес: Россия, КЧР, п/и 369000, г. Черкесск,

ул. Фурманова 157

телефон: +7 (928) 925-57-11

ИНН 090107245064

Акт внедрения

устройства для газовой штамповки с поршневым мультипликатором  
давления

Устройство для листовой газовой штамповки по патенту РФ на полезную модель №178276, разработанное учеными Северо-Кавказской государственной гуманитарно-технологической академии, внедрены в производство для изготовления штампованных деталей из листового материала. Устройство обеспечивает штамповку деталей сложной формы из стального листа толщиной до 2 мм и цветных сплавов толщиной до 3 мм. Экономический эффект от внедрения устройства в 2017- 2018 г.г. составил 250 тысяч руб.

Индивидуальный предприниматель



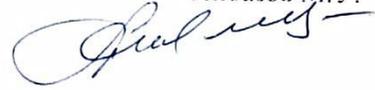
Батчаев Р. А-З.

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ОАО «Холодмаш»

Айбазов М.У.



Акт внедрения

устройства для газовой штамповки с поршневым мультипликатором  
давления

Мы нижеподписавшиеся, главный технолог завода Дорохин И.И. и директор по производству Мамойов Л.А. составили настоящий акт о том, что учеными Северо-Кавказской государственной гуманитарно-технологической академии предложено устройство для листовой газовой штамповки. Испытание устройства показало, что оно обеспечивает штамповку листовых деталей сложной формы из стали и цветных сплавов за одну технологическую операцию, что значительно снижает себестоимость производимых деталей. На устройство получен патент РФ на полезную модель №178276, МПК В21Д 26/08.

В 2018 г. устройство внедрено в производство для изготовления листовых деталей компрессоров и холодильного оборудования. Ожидаемый экономический эффект от внедрения устройства составляет 300... 350 рублей в год.

Главный технолог

Директор по производс



Дорохин И.И.

Мамойов Л.А.

