

На правах рукописи

**Рещиков Егор Олегович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАДИАЛЬНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ  
ТРУБНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ВЫСТУПОМ В ПОЛОСТИ**

Специальность 2.5.7 – Технологии и машины обработки давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук



Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

**Научный руководитель:**

Воронцов Андрей Львович,  
заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

Сосёнушкин Евгений Николаевич,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры систем  
пластического деформирования  
ФГАОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН"

Логинов Юрий Николаевич,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры обработки  
металлов давлением УрФУ

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
Институт металлургии и  
материаловедения им. А.А. Байкова  
Российской академии наук

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г. в \_\_\_\_ ч. \_\_\_\_ мин. на заседании  
диссертационного совета 24.2.331.01 МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:  
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5  
Телефон для справок: 8-499-263-66-33, доб. 36-28

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью,  
просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на  
сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент



Плохих А.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Анализ современной научно-технической литературы показывает, что трубные изделия с выступом в полости широко используются в различных отраслях промышленности. Подобные изделия применяются в составе систем подачи топлива двигателей внутреннего сгорания (корпуса клапанов, выключателей подачи дизельного топлива), жидкостных ракетных двигателей (форсунки смесительных головок, штуцер пирозапального устройства), гидравлических и пневматических системах (дрессели, корпуса фильтров маслопроводов). Крупносерийным производством указанных изделий занимаются как отечественные, так и зарубежные предприятия.

Анализ литературных источников показал, что основной способ изготовления трубных изделий с выступом в полости в настоящее время – обработка резанием сплошных заготовок. Использование трубных заготовок затруднительно из-за того, что стандартные трубы имеют ограниченную номенклатуру размеров.

Основными недостатками получения таких изделий резанием являются низкий коэффициент использования металла (КИМ), низкие производительность и стойкость инструмента, отсутствие упрочнения.

Снижение затрат при производстве, расхода материала, повышение производительности и качества изготовления трубных изделий с выступом в полости может быть достигнуто при использовании радиального выдавливания заготовок трубной формы.

Однако в существующей литературе недостаточно полно и ограничено представлены результаты исследований процесса внутреннего радиального выдавливания выступа во внутреннюю полость трубной заготовки, а процесс радиального выдавливания внутреннего выступа показан в справочниках в виде принципиальных схем.

Кроме этого, ограничены методики и практические рекомендации по проектированию технологических процессов внутреннего радиального выдавливания трубных изделий с выступом в полости.

В связи с этим исследование и разработка научно обоснованной методики проектирования технологических процессов изготовления трубных изделий с выступом в полости внутренним радиальным выдавливанием, обеспечивающих повышение эффективности производства таких изделий, является актуальной задачей.

**Целью работы** является повышение коэффициента использования материала при изготовлении трубных изделий с выступом в полости методом внутреннего радиального выдавливания.

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

1. Провести анализ существующих методов изготовления трубных изделий с выступом в полости и рассмотреть существующие исследования внутреннего радиального выдавливания.

2. Выполнить теоретическое исследование процесса внутреннего радиального выдавливания, кинематического, напряжённого и деформированного состояния заготовки для определения силы деформирования, максимального давления на стенку матрицы и силы прижима.

3. Разработать методику и провести экспериментальные исследования процесса внутреннего радиального выдавливания трубных изделий с выступом в полости для проверки полученных теоретических результатов.

4. Разработать научно обоснованную методику расчета технологических параметров внутреннего радиального выдавливания трубных изделий с выступом в полости.

5. Разработать технологический процесс изготовления штампованной заготовки «Корпус клапана» методом внутреннего радиального выдавливания.

6. Разработать конструкцию промышленного штампа для изготовления трубных изделий с выступом в полости методом внутреннего радиального выдавливания.

**Объект исследования:** холодная объёмная штамповка.

**Предмет исследования:** изготовление трубных изделий с внутренним выступом методом радиального выдавливания

**Научная новизна.**

1. Определено напряженно-деформированное состояние штампованной заготовки, анализ которого позволил определить область рационального применения внутреннего радиального выдавливания для изготовления трубных изделий с выступом в полости

2. Получены формулы для определения деформирующей силы, максимального давления на стенку матрицы, величины хода пуансона, силы прижима при внутреннем радиальном выдавливании трубных изделий с выступом в полости в зависимости от механических свойств и размеров трубной заготовки.

**Практическая значимость работы заключается в:**

- разработанной методике расчета технологических параметров внутреннего радиального выдавливания трубных изделий с выступом в полости, обеспечивающей повышение КИМ по сравнению с обработкой резанием;

- в разработанном технологическом процессе изготовления штампованной заготовки Корпуса клапана внутренним радиальным выдавливанием, который позволяет повысить КИМ в 2,5 раза по сравнению с обработкой резанием.

- в разработанной конструкции промышленного штампа для изготовления трубных изделий с выступом в полости;

### **Методы исследования.**

Теоретическое исследование кинематического, напряжённого и деформированного состояний заготовки производили при помощи решения системы уравнений теории пластического течения, в которую включены кинематические уравнения, уравнения Леви–Мизеса и уравнения равновесия, составленные для осесимметричной задачи.

Экспериментальные исследования для определения силы деформирования проводились на гидравлических прессах ИПЭ-1000 (с номинальной силой 1000 кН) и ДБ2432 (с номинальной силой 1600 кН), оборудованных датчиком линейного перемещения ползуна пресса и силоизмерителем, определяющим силу выдавливания по давлению гидроцилиндра, с выводом данных на компьютер.

### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса внутреннего радиального выдавливания трубных изделий с выступом в полости, в соответствии с которыми определено напряженно-деформированное состояние заготовки и технологические параметры процесса.

2. Методика расчета технологических параметров внутреннего радиального выдавливания трубных изделий с выступом в полости, обеспечивающая повышение коэффициента использования материала по сравнению с обработкой резанием.

3. Технологический процесс изготовления штампованной заготовки детали «Корпус клапана» внутренним радиальным выдавливанием.

4. Конструкция промышленного штампа для изготовления трубных изделий с выступом в полости.

**Достоверность** полученных теоретических результатов подтверждается сходимостью рассчитанной деформирующей силой с полученной экспериментально с расхождением в пределах 7%.

**Личный вклад автора** состоит в проведении анализа существующих методов изготовления трубных изделий с выступом в полости исследований внутреннего радиального выдавливания, получении формул для определении технологических параметров внутреннего радиального выдавливания на основании теоретического исследования кинематического, напряженного и деформированного состоянии заготовки, проведении и обработке результатов экспериментальных исследований, формулировке выводов по проведённым исследованиям, разработке технологического процесса изготовления детали «Корпус клапана» методом внутреннего радиального выдавливания и разработке

конструкции промышленного штампа для изготовления трубных изделий с выступом в полости.

### **Апробация результатов работы.**

Основные положения диссертации докладывались на международной научно-технической конференции «Инновационные технологии реновации в машиностроении», посвящённой 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н. Э. Баумана, (Москва, 2019), международной конференции «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», посвященной 80-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, (Москва, 2018), XII международной научно-технической конференции «Трибология машиностроению», посвященная 80-летию ИМАШ РАН, (Москва, 2018), международной научно – технической конференции «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем», (Севастополь, 2018), VI международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», (Москва, 2019).

### **Публикации.**

Основные результаты диссертации отражены в 9 научных статьях, из них 8 научных статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ и 1 статья индексируемая SCOPUS.

### **Структура и объём работы.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 69 наименований, изложенных на 133 страницах машинописного текста. Работа включает 71 рисунок и 18 таблиц.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована её цель, раскрыты научная новизна и практическая ценность, а также перечислены основные положения, выносимые автором на защиту.

**В первой главе** рассмотрены существующие промышленные способы изготовления трубных изделий с внутренним выступом и исследования процесса внутреннего радиального выдавливания.

Под рассматриваемыми в работе изделиями понимаются полые цилиндрические детали с выступом внутрь полости. Толщина стенки таких изделий как правило меньше радиуса полости (отверстия), а форма выступа может быть различной.

Наиболее распространенным способом изготовления таких деталей является обработка резанием, основной недостаток которого – низкий коэффициент использования материала (КИМ), который может быть

существенно повышен при помощи внутреннего радиального выдавливания.

Внутреннее радиальное выдавливание приведено в справочниках в виде принципиальных схем, однако методика расчета или формулы для определения технологических параметров процесса отсутствуют. Исследования напряженно-деформированного состояния заготовки при внутреннем радиальном выдавливании проводили А.В. Черняев, В.А. Гладков, В.Н. Чудин, А.В. Чарин, Л. И. Алиева, С. В. Мартынов, и другие исследователи.

Однако в работах указанных авторов проведены теоретические исследования для идеально пластичного материала, и не учитывается упрочнение в условиях холодной деформации, которое оказывает значительное влияние на технологические параметры процесса, отсутствуют формулы для определения силы выдавливания, давления на стенку матрицы, силы прижима. В рассмотренной литературе отсутствует полное описание экспериментальных исследований, в ряде работ авторы ограничивались численным экспериментом при помощи программ расчета методом конечных элементов.

На основании проведенного литературного обзора в соответствии с поставленной целью сформулированы основные задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена теоретическому исследованию внутреннего радиального выдавливания. В основе используемого метода теоретического анализа – полуобратный метод, основанный на совместном использовании кинематических уравнений теории пластического течения, системы физических уравнений Леви – Мизеса и уравнений равновесия.

В качестве основного допущения принимается жесткопластическая модель деформируемого материала, позволяющая разбить заготовку на пластически деформируемые и пластически недеформируемые (жесткие) области. Сначала решается задача идеальной пластичности для неупрочняющегося материала, затем из деформированного состояния заготовки определяется среднее по очагу пластической деформации напряжение текучести. Очаг пластической деформации разбивается на области, в которых удобно задать подходящие поля скоростей течения. Подходящее поле скоростей течения удовлетворяет условиям несжимаемости, постоянства расхода и граничным условиям на контактных поверхностях заготовки, инструмента и жестких областей. На границах подходящих полей скоростей течения нормальные составляющие скоростей и напряжений имеют разрыв. Используется приближенное условие пластичности.

Для определения кинематического и напряжённого состояний выдавливаемой заготовки использована расчётная схема, показанная на Рисунке 1. На которой отмечены пластически деформируемые области 1 и 2 с различным напряженным состоянием и жесткие, пластически не деформируемые области 3 и 4.

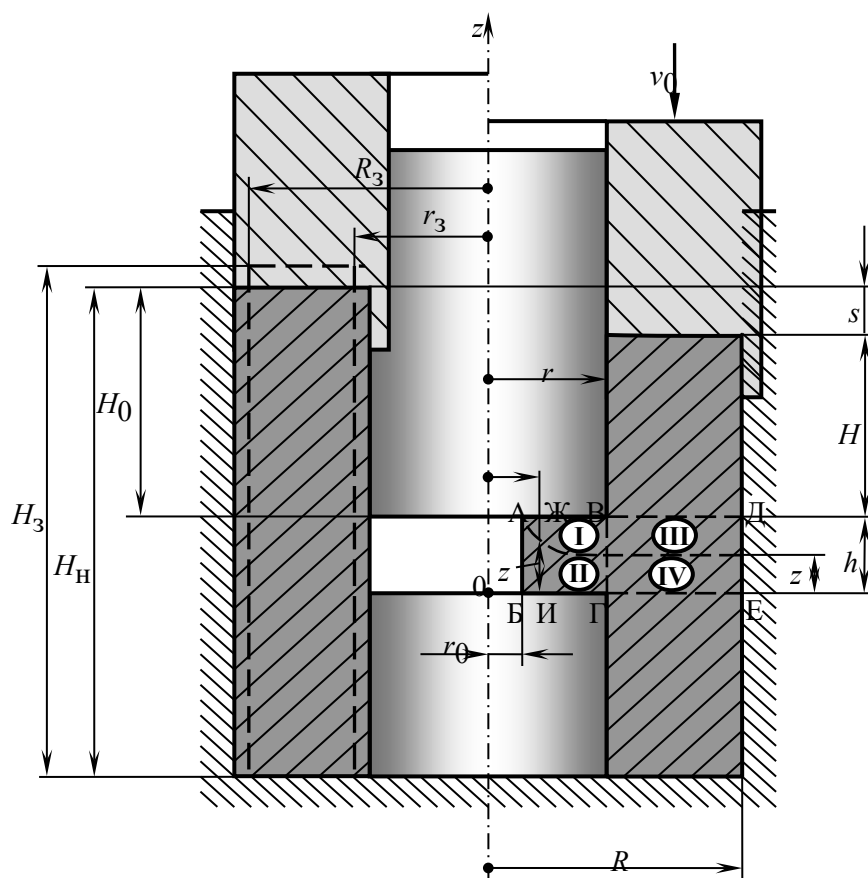


Рисунок 1. Расчётная схема радиального выдавливания:  $\mu$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – коэффициенты трения по напряжению текучести;  $R$ ,  $r$ ,  $r_0$ ,  $h$ ,  $H$  – размеры изделия, мм;  $R_3$ ,  $r_3$ ,  $H_3$ ,  $H_n$ ,  $H_0$  – размеры заготовки, мм, мм;  $v_0$  – скорость деформирования, мм/с;  $\rho$ ,  $z$  – координаты; I-IV – деформационные зоны

Согласно расчетной схеме, для осесимметричной задачи идеальной пластичности составлены 12 уравнений, в которые входит 12 неизвестных величин: напряжения  $\sigma_\rho$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{\rho z}$ , среднее нормальное напряжение (гидростатическое давление)  $\sigma$ , скорости деформаций  $\xi_\rho$ ,  $\xi_\theta$ ,  $\xi_z$ ,  $\eta_{\rho z}$ , интенсивность скоростей деформаций  $\xi_i$ , скорости перемещения материальных точек среды (скорости течения)  $v_\rho$ ,  $v_z$  – найдены все перечисленные неизвестные в каждой области очага пластической деформации.

Определение напряженного состояния проводили следующим образом.

1. Разбиение очага пластической деформации заготовки на области, удобные для задания в них поля подходящих скоростей течения. В области 1 осевая скорость равна нулю, в области 2 – радиальная:

$$v_{\rho 1} = \varphi(\rho) \quad (1)$$

$$v_{z 2} = -\varphi_1(z) \quad (2)$$

2. Нахождение компонентов скорости деформации по скоростям течения в области 1 (3) и в области 2 (4):



$$\begin{cases} \xi_\rho = \frac{\partial \varphi(\rho)}{\partial \rho}, \\ \xi_\theta = \frac{\varphi(\rho)}{\rho}, \\ \xi_z = -\left(\frac{\partial \varphi(\rho)}{\partial \rho} + \frac{\varphi(\rho)}{\rho}\right), \\ \eta_{\rho z} = \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\varphi(\rho) \rho) \right) z, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \xi_\rho = \frac{1}{2} \frac{\partial \varphi_1(z)}{\partial z} \left( 1 + \frac{R^2}{\rho^2} \right), \\ \xi_\theta = \frac{1}{2} \frac{\partial \varphi_1(z)}{\partial z} \left( 1 - \frac{R^2}{\rho^2} \right), \\ \xi_z = \frac{\partial \varphi_1(z)}{\partial z}, \\ \eta_{\rho z} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \varphi_1(z)}{\partial z^2} \left( \rho - \frac{R^2}{\rho} \right). \end{cases} \quad (4)$$

3. Определение интенсивности скоростей деформации в каждой области:

$$\xi_{i1} = \beta |\xi|_{\max} = \beta |\xi_z| = \beta \quad (5)$$

$$\xi_{i2} = \beta |\xi|_{\max} = \beta |\xi_z| = \beta \left( \frac{\partial \varphi_1(z)}{\partial z} \right). \quad (6)$$

4. При помощи упрощенного условия пластичности (7) расчет напряжений (8)–(9) из совместного решения уравнения связи между напряжениями и скоростями деформации, системы уравнений равновесия:

$$|\sigma_1 - \sigma_3| = \beta \sigma_s, \quad (7)$$

$$\sigma_{z1} = -\beta \sigma_s \left( 1 + \left( \mu_1 \frac{r_0}{h} + 1 \right) \right) \ln \frac{\rho}{r_0}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\rho 2} = -\beta \sigma_s \left( \frac{r}{h(R^2 - r^2)} \left( z(h - z) - \frac{1}{2}(\rho^2 - r^2) + R^2 \ln \frac{\rho}{r} \right) + \frac{R^2}{3\beta^2} \left( \frac{1}{r^2} - \frac{1}{\rho^2} \right) \right. \\ \left. + \left( \mu_1 \frac{r_0}{h} + 1 \right) \ln \frac{r}{r_0} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

В результате определения напряженного состояния заготовки получены формулы силы выдавливания (10), максимального давления на стенку матрицы (11) и силы прижима (12) необходимого для удержания верхней оправки с целью получения заданной высоты выступа. Формула силы радиального выдавливания имеет вид:

$$P = 3,456 \sigma_s (R^2 - r^2) 1 + \left( 1 + \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} p = 1,1 \sigma_s \left( \frac{r}{h(R^2 - r^2)} \left( 0,25h^2 - 0,5(R^2 - r^2) + R^2 \ln \frac{R}{r} \right) + 0,275 \left( \frac{R^2}{r^2} - 1 \right) \right. \\ \left. + \left( \mu_1 \frac{r_0}{h} + 1 \right) \ln \frac{r}{r_0} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

$$P_{\Pi} = 3,46\sigma_s \left( \frac{1}{2} \left( 1 - \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) (r^2 - r_0^2) + \left( 1 + \mu_1 \frac{r_0}{h} \right) r^2 \ln \frac{r}{r_0} - 2rH\mu_2 \right), \quad (12)$$

где  $\sigma_s$  – напряжение текучести,  $\sigma_{s0}$  – начальное напряжение текучести.

Затем определяем деформированное состояние, для чего использована расчетная схема (Рисунок 1). На расчетной схеме показаны 4 зоны с различным деформированным состоянием.

Частицы материала, поступающие из жесткой области в зону **III** через верхнюю границу очага пластической деформации с одинаковой начальной координатой  $\rho_0$  проходят по одной и той же траектории до выхода из зоны в область выступа с начальной координатой  $z_0=h$ . Проходя стационарное поле деформаций зоны **III**, частицы попадают в зону **I**, поле деформаций в которой тоже стационарное. Поле деформаций зоны **IV** нестационарное, вследствие чего поле деформаций зоны **II** также является нестационарным.

5. Определение конкретного вида функций скоростей, заданных в начале решения в общем виде, по найденным напряжениям на основе уравнений связи и кинематических граничных условий.

$$v_{\rho 1} = \frac{-v_0 R^2 - r^2}{2h} \frac{1}{\rho} \quad (13)$$

$$v_{z1} = 0 \quad (14)$$

$$v_{\rho 2} = \frac{v_0}{2h} \frac{\rho^2 - R^2}{\rho} \quad (15)$$

$$v_{z2} = -v_0 \frac{z}{h}, \quad (16)$$

6. По найденным скоростям течения определяем скорости деформаций и затем при помощи формулы Ильюшина

$$e_i = \int \xi_i dt, \quad (17)$$

связывающей скорость деформации с накопленной деформацией вычисляем накопленную деформацию в каждой области:

$$e_{i1} = 1,155 \ln \frac{r}{\rho}. \quad (18)$$

$$e_{i2} = 0,55 \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \ln \frac{z_0}{z}, \quad (19)$$

7. Находим зависимости исходных координат (координат Лагранжа) от текущих координат частицы металла (координат Эйлера) и времени (хода пуансона  $s$ , мм):

$$\frac{dz}{dt} v_z, \quad (20)$$

$$z_{02a} = z e^{\frac{s}{h}} \quad (21)$$

$$z_{026} = h \quad (22)$$

8. Определение размеров деформационных зон, в которых материальные

точки в процессе деформирования проходят один и тот же путь, поле деформаций в таких областях стационарно – зоны **I** и **III**:

$$z_1 = he^{\frac{(R^2-r^2)}{(\rho^2-r_0^2)}}, \quad (23)$$

$$z_2 = he^{\frac{-s}{h}}. \quad (24)$$

Тогда можно определить накопленные деформации в каждой зоне в соответствии с расчетной схемой:

$$e_{i1a} = 1,16 \ln \frac{r}{\rho} + 0,55 \left( \frac{R^2}{r^2} + 1 \right) \frac{\rho^2 - r_0^2}{R^2 - r^2}, \quad (25)$$

$$e_{i1b} = 1,16 \ln \frac{r}{\rho} + 0,55 \left( \frac{R^2}{r^2} + 1 \right) \ln \frac{h}{z}, \quad (26)$$

$$e_{i2a} = 0,55 \left( \frac{R^2}{r^2} + 1 \right) \frac{s}{h}, \quad (27)$$

$$e_{i2b} = 0,55 \left( \frac{R^2}{r^2} + 1 \right) \ln \frac{h}{z}. \quad (28)$$

И тогда средняя по объему очага пластической деформации накопленная деформация определяется выражением:

$$e_{icp} = \frac{e_{r0}(r^2 + rr_0 - 2r_0^2)}{3(R^2 - r_0^2)} + \frac{0,275 \frac{s}{h} \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \left( e^{\frac{-s}{h}} + 1 \right) (3R^2 - r^2 - rr_0 - r_0^2)}{3(R^2 - r_0^2)}. \quad (29)$$

В результате теоретического исследования внутреннего радиального выдавливания определено кинематическое, напряжённое и деформированное состояния заготовки, получены аналитические формулы для определения основных технологических параметров процесса: силы деформирования, давления на стенку матрицы, силы прижима с учетом упрочнения материала в условиях холодной деформации.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальной проверки полученных теоретических зависимостей. Для моделирования процесса горячего выдавливания, без упрочнения использовался свинец С00, С1, холодного выдавливания с упрочнением использовались материалы, распространенные в машиностроении: алюминиевый сплав АВ, латунь Л63, сталь 10, коррозионностойкая и жаропрочная сталь 12Х18Н9Т.

Эксперименты выполнялись на прессе ДБ2432 с номинальным усилием 1600 кН и силой нижнего выталкивателя 315 кН. Величина перемещения ползуна прессы и сила выдавливания выводились на компьютер.

Образцы для исследований – трубные заготовки из соответствующих материалов получали сверлением и резанием на токарном станке. Размеры исходных заготовок: наружный радиус  $R$  – 15 мм, внутренний  $r$  – 9 мм, высота  $H_3$  – 60 мм. В экспериментах получали внутренним радиальным выдавливанием штампованные заготовки с радиусом выступа  $r_0$  – 3 мм и высотой  $h$  – 3 мм ( $r_0 = 6$

мм и  $h = 5$  мм для стали 12Х18Н9Т).

Максимальное значение деформирующей силы  $P_3$ , полученное для штампованной заготовки: из сплава АВ составило 495 кН (величина расхождения  $\delta$  по сравнению с теоретическим значением – 1,6 %), из стали 10 – 1125 кН ( $\delta = 2,7\%$ ), из латуни Л63 – 1245 кН ( $\delta = 2,4\%$ ), из стали 12Х18Н9Т – 1070 кН ( $\delta = 3,5\%$ )

Расхождение  $\delta$  теоретического значения деформирующей силы  $P$  с экспериментальным составило не более 4%, при этом теоретическое значение было всегда выше экспериментального.

На Рисунке 2 показаны образцы из стали 10 с разной высотой выступа.



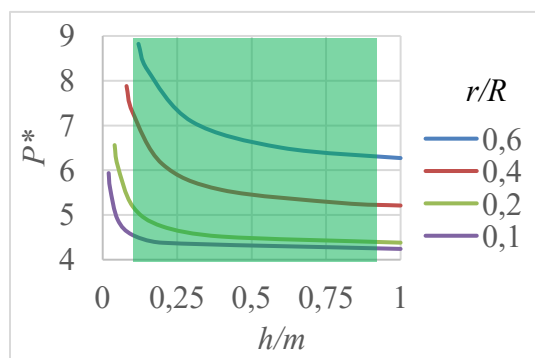
Рисунок 2. Выдавленные образцы из стали 10  $R=15$  мм,  
 $r=11$  мм,  $r_0=5$  мм,  $h=5, 4, 3$  мм

**В четвертой главе** изложена методика расчета технологических параметров внутреннего радиального выдавливания трубных изделий с выступом в полости в условиях горячей деформации без упрочнения, в условиях холодной деформации упрочняющегося материала, для выступов сложной формы: конической, с различными диаметрами отверстий.

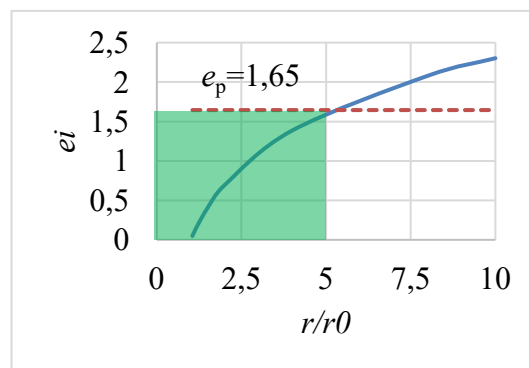
Анализ формул для определения технологических параметров радиального выдавливания позволил определить область рационального использования внутреннего радиального выдавливания (Рисунок 3).

Зависимость приведенной силы радиального выдавливания изделия единичного радиуса  $P^*$  от относительной высоты выступа  $h/m$  (Рисунок 3, а) показывает, что при значении высоты выступа, равной 20% толщины стенки заготовки происходит резкий рост силы выдавливания, после которого применение разрабатываемой технологии не рационально.

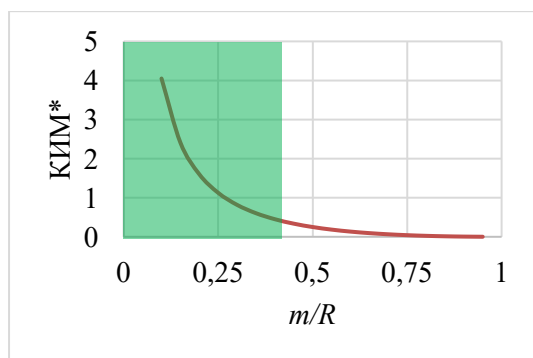
Анализ зависимости накопленной деформации наиболее опасной точки на поверхности выступа  $e_i$  от соотношения радиуса выступа  $r_0$  к радиусу полости  $r$  (Рисунок 3, б) позволяет установить, что при отношении  $r/r_0 > 5$  наступит разрушение.



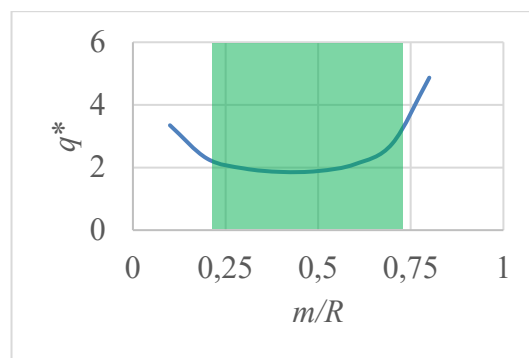
а



б



в



г

Рисунок 3. Область рационального применения радиального выдавливания:  $P^*$  – приведенная сила радиального выдавливания изделия единичного радиуса;  $m$  – толщина стенки, мм; КИМ\* – приведенный КИМ;  $q^*$  – приведенная удельная сила радиального выдавливания изделия единичного радиуса;

Если толщина стенки изделия составляет более 60% от наружного радиуса детали, повышение КИМ будет незначительным, что видно из зависимости приведенного КИМ (Рисунок 3, в).

Наибольшее влияние на величину удельной силы выдавливания оказывает толщина стенки. При выдавливании заготовок с толщиной стенки менее  $0,15R$  и более  $0,7R$  удельная сила радиального выдавливания превысит допустимые напряжения для материала пуансона (Рисунок 3, г).

Для расчета технологических параметров внутреннего радиального выдавливания необходимо выполнить следующее.

1. По геометрическим размерам выдавливаемого изделия определяем величину рабочего хода пуансона, необходимого для выдавливания выступа и вспомогательные геометрические параметры.

2. Вычисляем накопленную деформацию заготовки при заполнении технологических зазоров штампа, необходимых для свободной установки заготовки в штамп:

$$e_{i0} = \ln \frac{(R^2 - r^2)}{(R_3^2 - r_3^2)}. \quad (30)$$

3. По аппроксимации кривой упрочнения в зависимости от величины накопленной деформации при осадке  $e_{i0}$  определяем начальное напряжение текучести при радиальном выдавливании  $\sigma_{сн}$ .

4. Вычисляем среднюю по объему очага пластической деформации накопленную деформацию в соответствии с выражением (29) и с учетом деформации, накопленной при заполнении технологических зазоров (30)

$$e_i = e_{icp} + e_{i0}. \quad (31)$$

По указанной величине деформации и кривым упрочнения определяем напряжение текучести  $\sigma_s$ , которое будем использовать для определения силовых параметров выдавливания.

5. Определяем силу радиального выдавливания по формуле (10), подставляя вычисленное для данной степени накопленной деформации значение напряжения текучести  $\sigma_s$ .

6. Вычисляем удельную деформирующую силу, которая необходима для оценки прочности полого пуансона для выдавливания и подбора его материала.

7. Находим давление на стенку матрицы (11), с помощью которого будем подбирать материал матрицы, устанавливать толщину стенки матрицы и при необходимости применять бандажирование.

8. Определяем силу прижима по формуле (12).

Таким образом нами разработана методика определения основных технологических параметров, необходимых для проектирования процесса внутреннего радиального выдавливания.

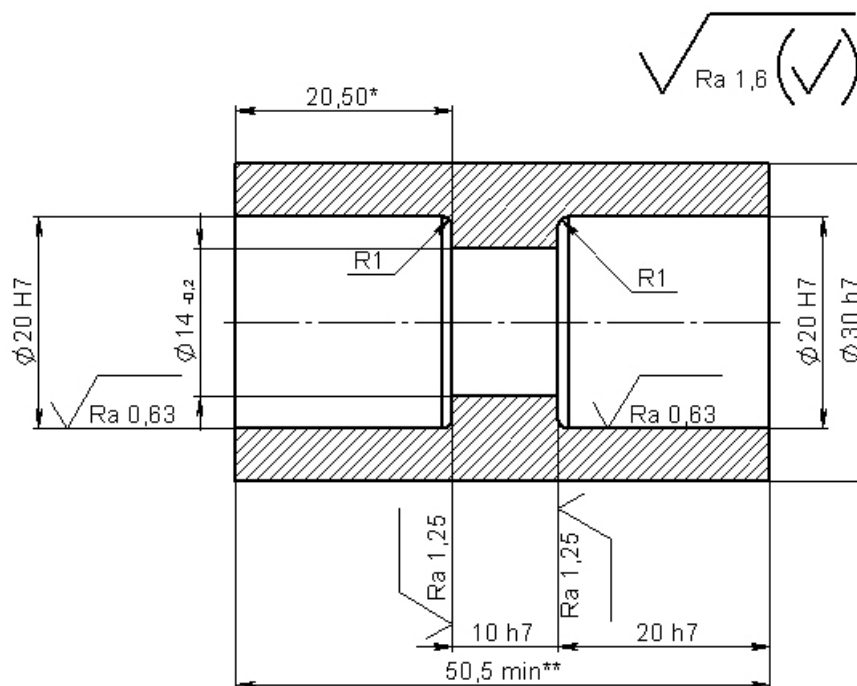
В условиях горячей деформации вычисление накопленных деформаций не проводится, а в формулах  $\sigma_s = \sigma_{s0}$ .

**В пятой главе** разработан технологический процесс изготовления штампованной заготовки детали «Корпус клапана» (Рисунок 4) из стали 10 внутренним радиальным выдавливанием.

Разработку технологического процесса проводили в следующем порядке:

1. Оценка рациональности использования радиального выдавливания для изготовления штампованной заготовки.

2. Выбор исходной заготовки. С учетом допусков на имеющиеся заготовки по равенству объемов определяют минимальную длину трубы. Для достижения требуемой точности предусматривают припуск на подрезку торца у выдавленной поковки или напуск на длину поковки для установки в патроне токарного станка.



1. \*Размеры для справок.
2. \*\* При необходимости предусматривают напуск 8-10 мм для закрепления в патрон токарного станка.
3. Материал – сталь 10 ГОСТ 1050-2013

Рисунок 4. Чертеж штампованной заготовки детали Корпус клапана

а) Труба  $\frac{28 \times 3,5 \text{ ГОСТ } 9567-75}{\text{Б10 ГОСТ } 8733-75}$  холоднодеформированная наружным диаметром 28 мм повышенной точности, с толщиной стенки 3,5 мм повышенной точности, немерной длины из стали 10 с поставкой по химическому составу и механическим свойствам по ГОСТ 8733 группа Б. С учетом допусков на диаметр и толщину стенки заготовки, припуска на подрезку торца 0,5 мм минимальная длина заготовки составит 86,4 мм;

б) Труба  $\frac{32 \times 7 \text{ ГОСТ } 9567-75}{\text{Б10 ГОСТ } 8731-74}$  горячекатаная немерной длины, наружным диаметром 32 мм повышенной точности, с толщиной стенки 7 мм повышенной точности из стали 10 с поставкой по химическому составу и механическим свойствам по ГОСТ 8731, группа Б. Горячекатаные заготовки подвергают механической обработке в соответствии чертежом, предусматривают припуск на подрезку торца поковки 0,5 мм, минимальная длина заготовки составит 56 мм.

3. Расчет параметров радиального выдавливания по методике, описанной в главе 3.

Рабочий ход пуансона  $s$ , мм; сила выдавливания  $P$ , кН; удельная сила выдавливания  $q$ , МПа; давление на стенку матрицы  $p$ , МПа; сила прижима  $P_{\text{п}}$ , кН.

а)  $s = 35,9$  мм,  $P = 930$  кН,  $q = 2370$  МПа,  $p = 850$  МПа,  $P_{\text{п}} = 100$  кН;

б)  $s = 5,5$  мм,  $P = 770$  кН,  $q = 1900$  МПа,  $p = 780$  МПа,  $P_{\text{п}} = 90$  кН.

4. Выбор оборудования по рассчитанным параметрам  $s$  и  $P$ : гидравлический пресс ДБ2432 с номинальным усилием 1600 кН и величиной

рабочего хода 630 мм.

6. Выбор материала матрицы и пуансона сталь X12Ф1 ( $\sigma_{сж} = 2500-3000$  МПа,  $\sigma_T = 1400-1600$  МПа) по условиям  $\sigma_{сж} > q$  и  $2\sigma_T > p$ .

8. Выбор пружины 1086-1418 по ГОСТ 22201-83, обеспечивающей усилие прижима не менее  $P_{п}$ .

9. Способ обработки поверхности и смазочный материал для заготовки из углеродистой стали – фосфатирование и смазочный материал ВНИИНП-232.

Разработанная технология изготовления штампованной заготовки детали «Корпус клапана» внутренним радиальным выдавливанием позволяет обеспечить КИМ при использовании холоднодеформированной трубы 88%, горячекатаной – 66%. При обработке резанием в виду отсутствия трубы с необходимым соотношением наружного диаметра и толщины стенки используют круглую заготовку сплошного сечения, тогда КИМ составит менее 48%, что в 1,4 раза меньше по сравнению с радиальным выдавливанием горячекатаной заготовки и в 1,8 раза меньше холоднодеформированной.

Разработана конструкция (Рисунок 5) и техническая документация промышленного штампа для изготовления трубных изделий с выступом в полости методом внутреннего радиального выдавливания.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации разработана научно обоснованная методика проектирования технологического процесса внутреннего радиального выдавливания трубных изделий с выступом в полости, позволяющие повысить коэффициент использования материала и снизить затраты в условиях серийного производства.

1. В результате анализа существующих способов изготовления трубных изделий с выступом в полости выявлено, что подобные изделия изготавливаются обработкой резанием, а основной недостаток этого способа – низкий коэффициент использования материала (КИМ). Существенно повысить КИМ по сравнению с обработкой резанием в условиях серийного производства можно внутренним радиальным выдавливанием.

Существующие исследования внутреннего радиального выдавливания являются недостаточными, не позволяют разработать методику проектирования технологического процесса, что ограничивает изготовление рассматриваемых изделий холодной объемной штамповкой.

2. Проведенное теоретическое исследование позволило определить напряженно-деформированное состояние заготовки, получить формулы для расчета технологических параметров: силы деформирования, максимального давления на стенку матрицы и силы прижима.



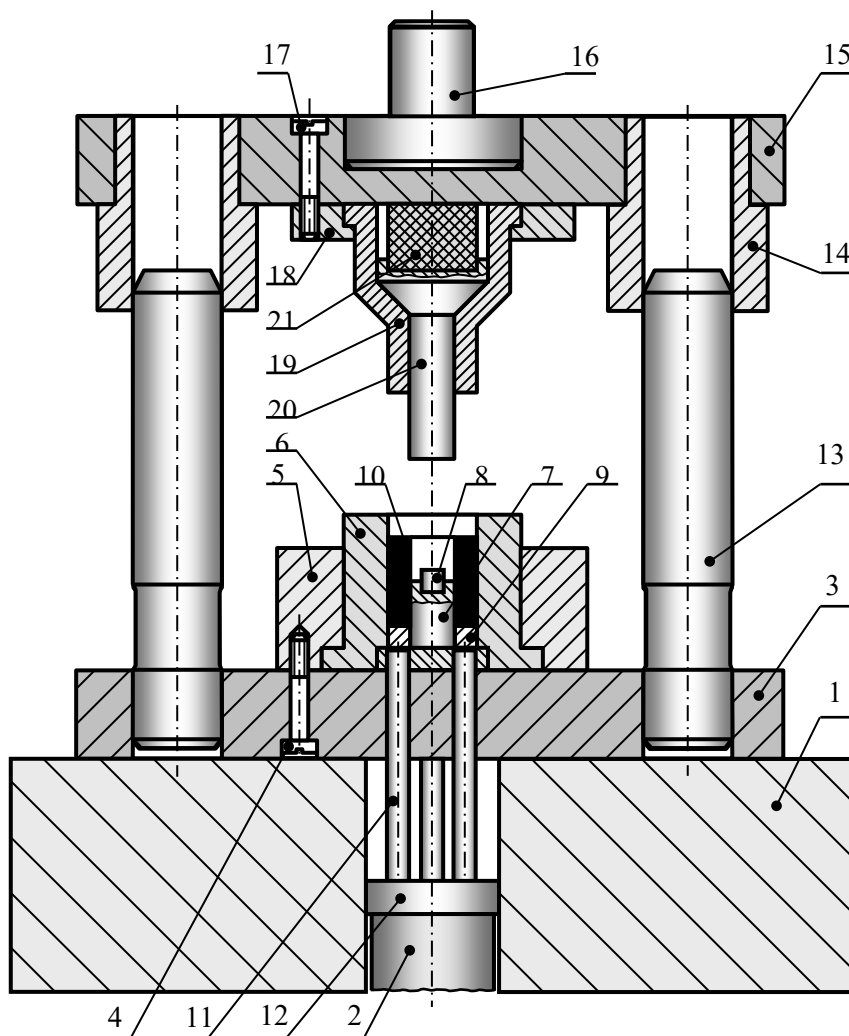


Рисунок 5. Принципиальная схема штампа для внутреннего радиального выдавливания: 1 – стол прессы; 2 – выталкиватель; 3 – нижняя плита; 4 – винт; 5 – держатель матрицы; 6 – матрица; 7 – нижняя оправка; 8 – ограничитель; 9 – выталкивающее кольцо; 10 – заготовка; 11 – стержневой толкатель; 12 – опорный диск; 13 – направляющая; 14 – втулка; 15 – верхняя плита; 16 – хвостовик; 17 – винт; 18 – держатель пуансона; 19 – пуансон; 20 – верхняя оправка; 21 – полиуретановая пружина

Накопленные деформации распределяются неравномерно по объему получаемого внутреннего выступа. В верхней части выступа поле деформаций стационарно, поэтому при холодной пластической деформации, сопровождаемой упрочнением, прочность и твердость материала на поверхности нижней части выступа будет на 20-30% выше, чем на поверхности верху образованного выступа.

3. Разработана методика экспериментальных исследований процесса внутреннего радиального выдавливания трубных изделий с выступом в полости. Экспериментальная проверка показала высокую точность выведенных расчетных формул.

Расхождение теоретического и экспериментального значения силы

выдавливания  $P$  для всех исследуемых в работе материалов (С00, С1, АВ, Л63, сталь 10, сталь 12Х18Н9Т) не превышает 7%. При этом теоретическое значение  $P$  всегда выше экспериментального.

4. Разработана методика расчета технологических параметров внутреннего радиального выдавливания трубных изделий с выступом в полости, обеспечивающая повышение коэффициента использования материала, которая включает в себя расчет параметров в условиях горячей и холодной деформации, для выступов сложной формы: конической, с различными диаметрами отверстий.

Получена область рационального применения радиального выдавливания для изготовления деталей с выступом в полости, которая ограничивает размеры заготовок:

- высота выступа  $h$  должна составлять не менее 20% от толщины стенки  $m$  трубной заготовки, поскольку меньшее значение приведет к резкому росту силы выдавливания  $P$ ;

- слишком большая (более чем в 2 раза превышающая толщину стенки  $m$ ) высота выступа  $h$  приведет к потере устойчивости заготовки;

- радиус выступа  $r_0$  не должен быть более чем в 3-5 раз (в зависимости от материала) меньше внутреннего радиуса  $r$  трубной заготовки, в противном случае накопленные деформации превысят допустимую степень деформации, и произойдет разрушение заготовки на цилиндрической поверхности образующегося выступа;

- выдавливание тонкостенных заготовок (менее 20% от наружного радиуса  $R$ ) приводит к резкому увеличению удельной деформирующей силы  $q$ , что затрудняет выбор материала полого пуансона для выдавливания;

- если толщина стенки превышает 60% от наружного радиуса  $R$ , то повышение КИМ незначительно, и в таком случае предпочтительнее получить выступ обработкой резанием.

5. Разработан технологический процесс изготовления методом внутреннего радиального выдавливания штампованной заготовки «Корпус клапана» из стали 10, который позволил повысить КИМ в 2,5 раза по сравнению с обработкой резанием.

6. Разработана конструкция промышленного штампа для изготовления трубных изделий с выступом в полости методом внутреннего радиального выдавливания.

Результаты работы могут быть использованы для изготовления деталей типа корпус клапана на машиностроительных предприятиях АО НПП «Темп им. Ф. Короткова, АО «Елецгидроагрегат», АО "Пневматика", НПО "ПНЕВМАШ.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ**

1. Воронцов А.Л., Решиков Е.О. Исследование внутреннего радиального выдавливания трубной заготовки. Часть 1. Актуальность и постановка задачи // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2018. № 8. С. 3-12. (1,25 п.л./0,6 п.л.).
2. Воронцов А.Л., Решиков Е.О. Исследование внутреннего радиального выдавливания трубной заготовки. Часть 2. Определение кинематического и напряжённого состояний // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2019. № 1. С. 3-9. (0,9 п.л./0,45 п.л.).
3. Воронцов А.Л., Решиков Е.О. Исследование внутреннего радиального выдавливания трубной заготовки. Часть 3. Определение деформированного состояния // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2019. № 3. С. 3-7. (0,8 п.л./0,4 п.л.).
4. Воронцов А.Л., Решиков Е.О. Исследование внутреннего радиального выдавливания трубной заготовки. Часть 4. Границы деформационных зон // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2019. № 4. С. 3-9. (0,9 п.л./0,45 п.л.).
5. Воронцов А.Л., Решиков Е.О. Исследование внутреннего радиального выдавливания трубной заготовки. Часть 5. Методики расчёта технологических параметров выдавливания изделий с одинаковыми радиусами верхней и нижней частей // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2019. № 5. С. 3-8. (0,75 п.л./0,3 п.л.).
6. Воронцов А.Л., Решиков Е.О. Исследование внутреннего радиального выдавливания трубной заготовки. Часть 6. Методики расчёта технологических параметров выдавливания изделий с разными радиусами верхней и нижней частей // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2019. № 6. С. 3-9. (0,9 п.л./0,45 п.л.).
7. Решиков Е.О. Радиальное выдавливание полой цилиндрической заготовки с внутренним выступом // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 4-2 (342). С. 78-84. (0,9 п.л./0,45 п.л.).
8. Воронцов А.Л., Решиков Е.О. Исследование внутреннего радиального выдавливания трубной заготовки. Часть 7. Начальная экспериментальная проверка теоретических формул // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2022. № 9. С. 3-11. (1,1 п.л./0,5 п.л.).
9. Vorontsov A., Reschikov E., Tuzhilin S. Cylindrical billet with inner rim radial extrusion // AIP Conference Proceedings 2697, 030015 (2023) (0,75 п.л./0,4 п.л.).