

Беляев Вячеслав Анатольевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ  
ДАВЛЕНИЕМ В ПОРОХОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Специальность 05.03.05 - технологии и машины обработки  
давлением

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Бийском технологическом институте (филиале) Алтайского государственного технического университета

Научный руководитель: кандидат технических наук,  
доцент Титов И.А.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Рябинин А.Г.  
Кандидат технических наук, доцент Титов А.В.

Ведущая организация: ФНПЦ "Алтай" (г. Бийск)

Защита состоится " 18 " декабря 2001 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.19 в Санкт-Петербургском государственном техническом университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лабораторно-аудиторный корпус, кафедра "Машины и технологии обработки металлов давлением".

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке СПбГТУ.

Автореферат разослан " 8 " ноября 2001 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор технических наук,  
профессор Востров В.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Особенностью современного машиностроения является возрастающая доля опытного, мелкосерийного и единичного производства деталей машин и приборов. Для такого производства характерно универсальное, легко переналаживаемое оборудование и технологические процессы, позволяющие уменьшить себестоимость изготавливаемых изделий и сократить сроки подготовки производства. В области холодной штамповки к таким процессам относятся импульсные методы обработки давлением. Среди них - штамповка с использованием энергии порохов, которая обладает рядом преимуществ, связанных с широким диапазоном создаваемых давлений, высокой развиваемой энергией, простотой и компактностью конструкций пороховых технологических установок по сравнению с традиционным кузнечно-прессовым оборудованием.

Однако, несмотря на достаточное количество теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованиям процессов импульсной обработки давлением с использованием энергии порохов, предлагаемые методы расчета основных параметров пороховых технологических установок базируются на зависимостях пиростатики и не учитывают связь между работой формоизменения заготовки и баллистическими параметрами (давление пороховых газов, скорость движущихся масс) на протяжении всего процесса деформирования. Создание и использование методик, лишенных данного недостатка, позволит определить более точные значения массы порохового заряда и энергетических параметров процесса, рассчитать оптимальные конструктивные данные технологического устройства, сократить время на отработку режимов штамповки и повысить эксплуатационную безопасность установок.

Цель работы. Диссертационная работа посвящена решению научно-технической задачи, имеющей важное значение для отрасли листовой штамповки – совершенствованию процессов и машин импульсной обработки металлов давлением с использованием энергии порохов, обеспечивающих повышение эффективности работы оборудования, сокращение сроков отработки режимов операций и снижение технологических затрат.

Поставленная цель достигнута путем проведения экспериментально-аналитических исследований с использованием математического моделирования процессов штамповки в пороховых технологических установках.

### Методы исследования:

- построение расчетной модели производилось на основе уравнений внутренней баллистики и теории пластичности с использованием вариационных принципов механики сплошной среды, численные алгоритмы для построения расчетных моделей разрабатывались с привлечением математического процессора Mathcad для ЭВМ;

- измерения давления пороховых газов и скорости рабочих масс проводились с помощью разработанного компьютеризированного стенда, экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния осуществлялось методами делительных сеток и измерения твердости;

- результаты экспериментальных исследований обрабатывались с использованием методов математической статистики.

### Научная новизна:

- разработана обобщенная модель, позволяющая определить основные характеристики различных типов пороховых технологических установок и параметров осуществляемых в них штамповочных операций; модель реализована в термодинамическом приближении на основе системы обыкновенных дифференциальных уравнений внутренней баллистики и учитывает связь работы деформирования и текущего давления пороховых газов;

- получены частные решения обобщенной модели для ствольной и газодинамической пороховых установок применительно к формовке плоских и трубчатых заготовок;

- разработана конструкция универсальной пороховой газодинамической установки, позволяющей повысить эффективность использования заряда за счет регулирования характера нарастания давления пороховых газов в соответствии с типом выполняемой штамповочной операции;

- предложена расчетная зависимость работы формообразования сферического рифта с учетом утонения стенки, втягивания материала в полость матрицы, упрочнения металла.

#### Практическая ценность и промышленная реализация работы:

- разработаны методики проектирования операций штамповки в пороховых технологических установках, в том числе методика определения параметров формовки плоских рифтов эластичной средой в пресс-пушках и методика расчета параметров формообразования сферических рифтов из трубчатых заготовок в газодинамической установке при производстве шаровых пробок запорной арматуры;

- с использованием пороховых установок получены опытные образцы: фрагмент панели теплообменного аппарата и сферическая оболочка шаровой пробки запорной арматуры, изготовленные из легированной стали 12X18H9T, а также узел кулачкового вала топливного насоса высокого давления автомобиля КамАЗ, собранный давлением пороховых газов;

- сформулированы рекомендации по применению различных типов порохов в технологических установках.

- получены положительные результаты по использованию пороховых пресс-пушек в условиях небольших производств для компактирования отходов легированных сталей методом высокоскоростного прессования.

- сконструирована высокоэффективная универсальная пороховая газодинамическая установка для проведения разделительных и формообразующих операций.

- результаты научных исследований используются в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности 171500 (Высокоэнергетические устройства автоматических систем).

Публикация и апробация работы. Основные положения работы отражены в 10-ти работах, а также в 3-х отчетах о НИР. По материалам работы сделаны сообщения на региональной научно-практической конференции "Наука и технологии: реконструкция и конверсия" /г. Бийск, 1999 г./; Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых "Материалы и технологии XXI века" /г. Бийск, 2000 г./; региональной научно-практической конференции аспирантов, студентов и учащихся "Наука и образование: проблемы и перспективы" /г. Бийск, 2000 г./; Всероссийской научно-технической конференции "Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях" /г. Бийск, 2001 г./. Работа доложена на заседании кафедры Автоматических роторных линий в 2001 г.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы в количестве 87 наименований и содержит 113 страниц печатного текста, 49 рисунков, 7 таблиц.

Научным консультантом в данной работе был кандидат технических наук, доцент Верещагин П.В.

#### На защиту выносятся следующие положения:

- обобщенная модель расчета основных характеристик пороховых технологических установок и параметров осуществляемых в них штамповочных операций, реализованная на основе системы обыкновенных дифференциальных уравнений внутренней баллистики и уравнений теории пластичности;

- частные решения обобщенной модели применительно к условиям деформирования изделий в пороховой ствольной и газодинамической установках;

- результаты численных и экспериментальных исследований работы пороховой ствольной установки при различных конструктивных данных и условиях заряжания в ходе формовки плоских рифтов эластичной средой, а также влияние характеристик различных типов пироксилиновых порохов на баллистические параметры установки;

- результаты моделирования и экспериментального исследования процессов формовки сферических рифтов из трубчатых заготовок в газодинамической пороховой

установке.

- конструкция универсальной пороховой газодинамической установки для проведения разделительных и формообразующих операций, позволяющая повысить эффективность использования порохового заряда за счет управления характером нарастания давления;

- методика определения параметров формовки плоских рифтов эластичным инструментом в пресс-пушках и методика расчета параметров формообразования сферических рифтов из трубчатых заготовок в газодинамической установке.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполняемой работы, сформулирована цель исследования, научная новизна, практическая ценность и основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе дан краткий обзор методов импульсной обработки металлов давлением с использованием энергии порохов в условиях современного машиностроения при единичном и мелкосерийном производстве, рассмотрены схемы пороховых технологических установок для выполнения различных типов штамповочных операций. Приведены и проанализированы методики расчета технологических параметров разделительных и формообразующих операций, осуществляемых в пороховых пресс-пушках и газодинамических установках. Отмечена большая роль в развитии теории и технологии импульсной штамповки подвижными средами научными коллективами городов России, Украины и Беларуси: Санкт-Петербурга, Самары, Тулы, Чебоксар, Челябинска, Харькова, Минска и ряда других.

Сформулирована цель работы, для достижения которой поставлены следующие задачи исследования:

- в теоретическом плане: разработать обобщенную модель расчета характеристик пороховых установок, позволяющую определять основные параметры работы пороховой пресс-пушки и газодинамической установки, а также разработать программу для ее численной реализации на ЭВМ; провести численные исследования с целью установления рациональных конструктивных и технологических параметров пресс-пушек и газодинамических установок;

- в экспериментальном плане: разработать методику проведения экспериментов на опытной пресс-пушке и провести эксперименты по оценке корректности расчетной модели, сконструировать и отладить измерительный стенд для определения основных баллистических характеристик - скорости боя и давления пороховых газов; разработать и изготовить опытную установку для формовки сферических рифтов из трубчатых заготовок давлением пороховых газов и провести экспериментальные исследования для подтверждения адекватности расчетной модели экспериментальным результатам;

- в технологическом плане: разработать методику расчета параметров работы пороховой пресс-пушки при формовке плоских рифтов эластичной средой и методику определения технологических параметров при формовке сферических рифтов из трубчатых заготовок давлением пороховых газов в газодинамических установках.

Во второй главе представлены результаты математического моделирования работы двух типов пороховых технологических установок: пресс-пушки и газодинамической установки. Проведенная аналогия между процессами выстрела из ствольного комплекса и штамповки в пороховых технологических установках позволила при моделировании последних в качестве основы использовать модель расчета ствольных комплексов, а сходство газотермодинамических процессов в пресс-пушках и газодинамических установках дало возможность разработать обобщенную расчетную модель, дополнив ее соответствующими положениями и допущениями в зависимости от выполняемой операции и способа передачи давления пороховых газов.

Обобщенная расчетная модель устанавливает связь между конструктивными характеристиками пороховой установки, условиями заряжания и основными баллистическими параметрами устройства. К конструктивным характеристикам относятся начальный объем горения порохового заряда  $W_0$ , площадь поверхности перемещаемого

тела  $S_n$ , на которую воздействует давление пороховых газов и конечное перемещение тела  $l_0$ . В качестве тела соответственно в пресс-пушке выступал разгоняемый газами боек, а в газодинамической установке - деформируемая трубчатая заготовка. Условия заряжания включали в себя следующие характеристики: массу перемещаемого тела  $m_T$ , давление форсирования  $p_0$ , силу пороха  $f$ , коволюм пороховых газов  $\alpha$ , удельный вес пороха  $\delta$ , показатель  $\theta$ , коэффициенты формы пороха  $\chi$  и  $\lambda$ , массу порохового заряда  $\omega$ , плотность заряжания  $\Delta$  и давление воспламенения  $p_в$ .

Процесс функционирования пороховой установки по аналогии с процессом выстрела из ствольного комплекса разделялся на три периода: предварительный, первый и второй периоды. В рамках предварительного периода происходит воспламенение и горение порохового заряда в постоянном объеме. Первый период протекает от момента страгивания бойка пресс-пушки или начала формоизменения трубчатой заготовки до конца горения порохового заряда. Второй период характеризуется адиабатическим расширением образовавшихся пороховых газов до момента контакта бойка с рабочим инструментом или до конца формовки заготовки в случае моделирования процессов в газодинамической установке.

Обобщенная модель расчета параметров процесса функционирования пороховой установки представляет систему обыкновенных дифференциальных уравнений. Система уравнений включает соответственно зависимость изменения давления пороховых газов, учитывающую затраты энергии на разгон бойка или перемещение стенки заготовки в процессе деформирования, уравнение связи пройденного пути со скоростью, уравнение движения бойка, зависимость изменения относительной толщины сгоревшего слоя порохового зерна и закон быстроты газообразования:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= \frac{1}{(l_\psi + l)} \left[ \frac{f\omega\chi u}{S_n e_1} (1 + 2\lambda Z) \left( 1 + \frac{p}{f} \left[ \alpha - \frac{1}{\delta} \right] \right) - \nu p \left( 1 + \theta \left[ 1 + \frac{1}{p S_n} \cdot \frac{dA}{dl} \right] \right) \right], \\ \frac{dl}{dt} &= \nu, \\ \frac{d\nu}{dt} &= \frac{p \cdot S_n}{\phi m_T}, \\ \frac{dZ}{dt} &= \frac{u}{e_1}, \\ \frac{d\psi}{dt} &= \frac{u}{e_1} (1 + 2\lambda Z) \chi. \end{aligned} \right\} (1)$$

Здесь  $l$  - перемещение тела;  $l_\psi$  - приведенная длина свободного объема пороховой камеры;  $\nu$  - скорость перемещения бойка или стенки трубчатой заготовки;  $e_1$  - половина толщины свода порохового элемента,  $u$  - скорость горения пороха.

Решение системы уравнений (1) для первого периода производилось при начальных условиях:

$$p(0) = p_0, \quad l(0) = 0, \quad \nu(0) = 0, \quad Z(0) = Z_0, \quad \psi(0) = \psi_0, \quad (2)$$

где  $Z_0$  - доля сгоревшего пороха по толщине горящего свода,  $\psi_0$  - объемная доля сгоревшего заряда.

Для второго периода  $Z = 1$ ,  $\psi = 1$ , следовательно  $\frac{dZ}{dt} = 0$  и  $\frac{d\psi}{dt} = 0$ .

С помощью расчетной модели для пресс-пушки устанавливались текущие значения давления пороховых газов, скорости и энергии разгоняемого бойка по длине ствола и во времени. При моделировании работы пресс-пушки предполагалось, что энергия газов расходовалась только на разгон бойка и формоизменение осуществлялось за счет накопленной им кинетической энергии. Этому условию соответствует равенство нулю

производной  $\frac{dA}{dl}$  в системе (1). Закон изменения скорости горения пороха для пресс-пушки задавался степенной зависимостью вида  $u = Cp^v$ , так как рассматривались установки, работающие при пиковых давлениях до 40 МПа. Здесь  $C, v$  - определяемые маркой пороха коэффициенты. Площадь поверхности перемещаемого тела  $S_n$  принималась постоянной, давление форсирования  $p_0$  в численных и экспериментальных исследованиях выбиралось в диапазоне 3-5 МПа, а масса бойка  $m_T$  в интервале  $(1 \div 5) \cdot 10^3 \cdot \omega$ . На рис. 1б представлены графики зависимостей давления пороховых газов  $p$  и скорости бойка  $v$  от времени  $t$ , показывающие хорошее согласование расчетных и экспериментальных значений. Экспериментальные значения давления и скорости бойка определялись с использованием измерительного стенда, представленного на рис.2.

Проведены численные и экспериментальные исследования работы установок с пироксилиновыми порохами марок "Сокол", "Сунар", "П-45" и "ВУСТ". Сравнение расчетных и экспериментальных данных (см. рис. 1в, г) подтвердило достоверность предложенной модели. Выявлено преимущество порохов марок "Сунар" и "П-45", состоящее в том, что заданная энергия бойка к моменту деформирования развивается для данных марок при меньшей массе заряда по сравнению с другими порохами.

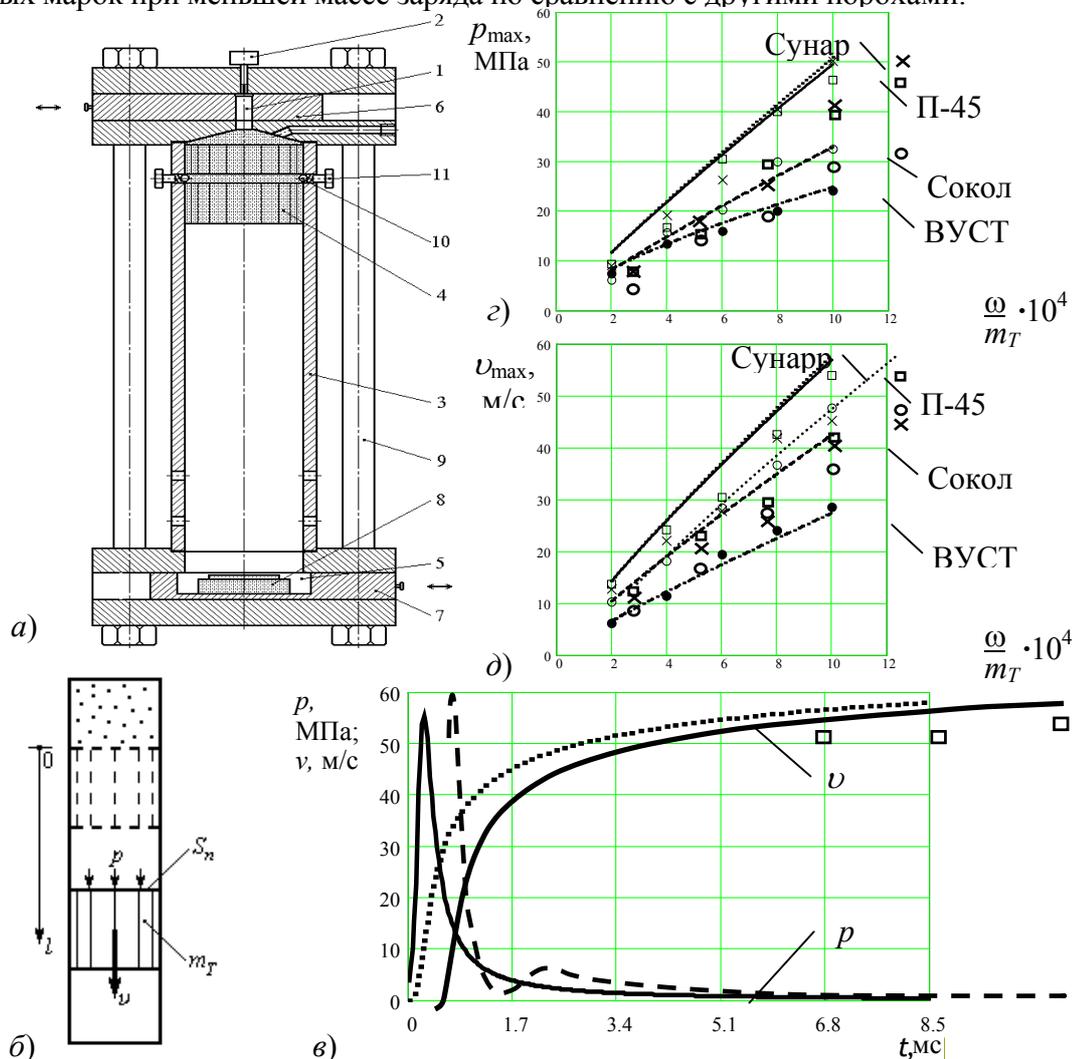


Рис. 1. Схема пресс-пушки и результаты численных и экспериментальных исследований:

а - схема экспериментальной установки: 1 - пороховой заряд, 2 - ударник, 3 - ствол, 4 - боек, 5 - рабочая камера, 6,7 - шибер, 8 - рабочая оснастка, 9 - колонна, 10 - фиксатор, 11 - регулировочный болт;

б - схема к расчету основных параметров работы пресс-пушки;

в - изменение давления пороховых газов и скорости бойка во времени: — - расчет; - - , □ - эксперимент;

г, д - связь максимальных давления пороховых газов и скорости бойка с относительной массой заряда для различных марок порохов: □ - Сунар, x - П-45, ○ - Сокол, ● - ВУСТ

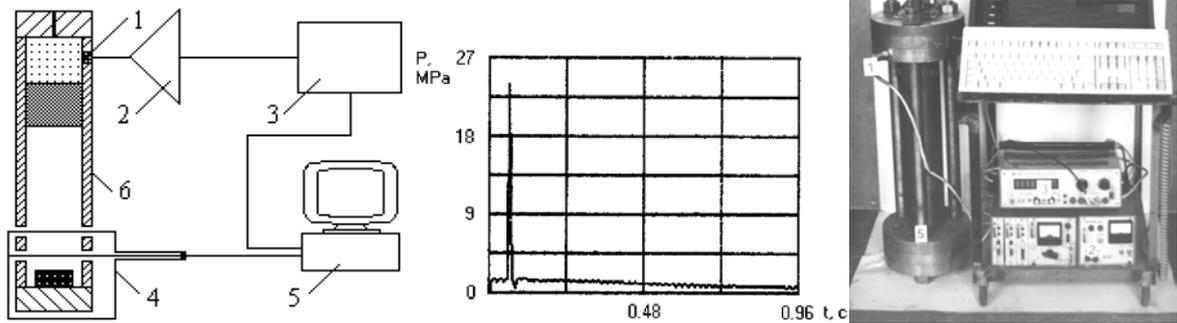


Рис. 2. Измерительный стенд для определения давления пороховых газов и максимальной скорости бойка пресс-пушки:

*a* – схема стенда: 1 - тензометрический датчик давления; 2 - усилитель сигнала; 3 - аналого-цифровой преобразователь; 4 - проволочные контакты для определения максимальной скорости бойка; 5 - ЭВМ; 6 - пресс-пушка;

*б* – пример экспериментального графика давления пороховых газов;

*в* – общий вид стенда

Основные параметры процесса формообразования сферических рифтов в газодинамической установке определялись с использованием обобщенной расчетной модели (1), дополненной следующими допущениями и положениями: в качестве перемещаемого тела выступает стенка трубчатой заготовки, начинающая движение (деформирование) по достижении давления  $p_0$ ; вид образующей рифта  $\rho(z)$  (см. рис. 3в) описывается параболической зависимостью; стенка рифта вследствие втягивания материала в очаг деформирования обладает переменной массой  $m_T$ ; энергия пороха затрачивается как на перемещение стенок заготовки, так и на совершение работы формоизменения  $A$ ; поскольку максимальные давления пороховых газов превышают 60 МПа, то закон изменения скорости горения пороха имеет вид  $u = u_1 p$ , где  $u_1$  - коэффициент скорости горения; в качестве пути перемещения используется прогиб рифта  $R$  в центральной его части; скорость деформируемой стенки принимается усредненной по высоте рифта выражением

$v = \frac{2}{3} v_R$ , где  $v_R$  - скорость движения стенки рифта по прогибу  $R$ ; давление пороховых

газов воздействует на изменяющуюся площадь внутренней поверхности рифта  $S_n$ ; полезная работа системы учитывается кинетической энергией перемещаемой оболочки и полной энергией формообразования сферического рифта  $A$ , значение которой получено методом баланса работ, при этом упрочнение металла учитывалось линейной зависимостью. Указанные параметры определяются следующими выражениями:

$$p_0 = \frac{S_0 \sigma_{s0}}{r}, \quad (3)$$

где  $S_0$  - толщина стенки заготовки,  $\sigma_{s0}$  - предел текучести материала,  $r$  - радиус трубчатой заготовки;

$$\rho(z) = R \left( 1 + \left( \frac{z}{b} \right)^2 \left[ \frac{r}{R} - 1 \right] \right), \quad (4)$$

где  $z$  - текущее значение высоты рифта,  $b$  - высота рифта;

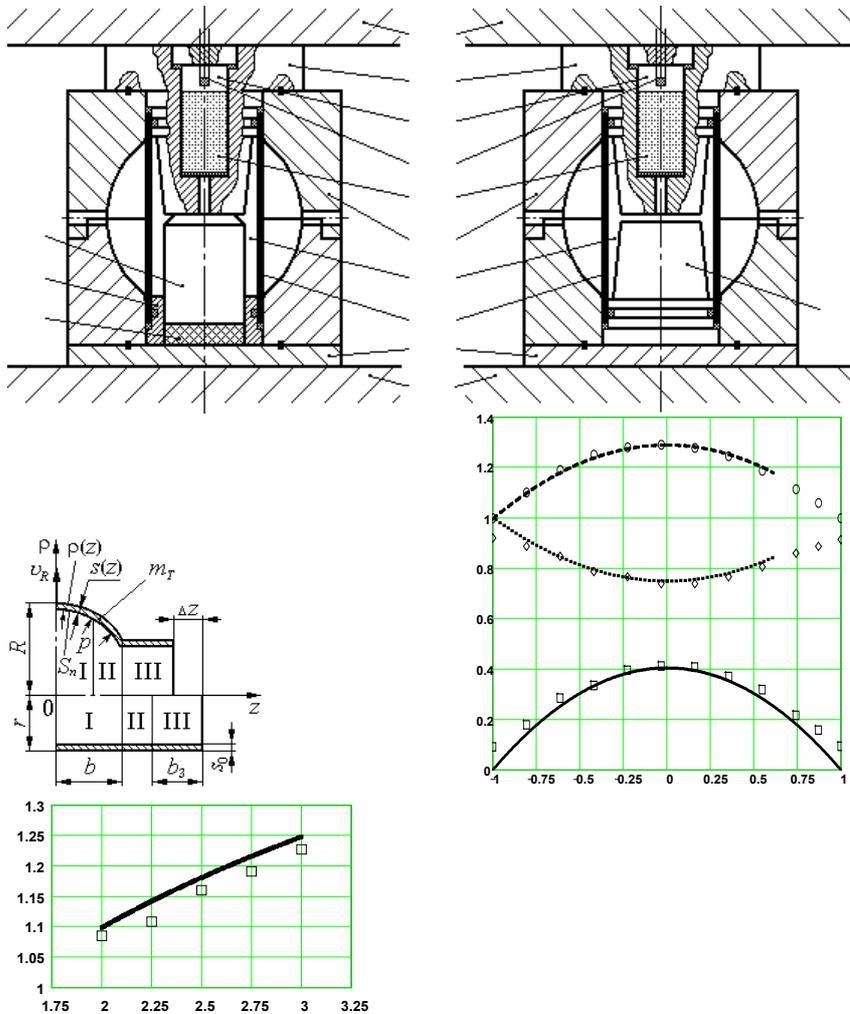


Рис. 3. Определение параметров формовки сферического рифта:

$a, \bar{b}$  – схемы пороховой газодинамической установки с демпфером ( $a$ ) и без демпфера ( $\bar{b}$ ): 1, 10 – плита, 2 – головка, 3 – камера сгорания, 4 – электрозапал, 5 – пороховой заряд, 6 – корпус-полуматрица, 7 – рабочая камера, 8 – заготовка, 9 – дно, 11 – шток, 12 – направляющая втулка, 13 – эластичный блок, 14 – заглушка;

$\bar{v}$  – схема к расчету формовки сферического рифта из трубчатой заготовки;

$z$  – связь относительного радиуса рифта и массы заряда: — – расчет,

□ – эксперимент;

$\delta$  – изменение относительной толщины стенки, форма образующей и степень деформации по высоте рифта: — – расчет; o, □ – эксперимент

$$\begin{aligned}
 A = \pi b \left\{ \frac{s_0 \sigma_s C_4}{945 r^4} \left[ 21 C_2 C_3 (5\sqrt{3}r + C_4) + 3h(aC_3 - C_1 C_2) \right] \times \right. \\
 \times \left. \left( 7\sqrt{3}r + C_4 \right) - ah^2 C_1 (9\sqrt{3}r + C_4) \right] + \\
 + f^* \sigma_{s0} r b \left[ \frac{15 C_2 C_3 + 5h(aC_3 - C_1 C_2) - 3ah^2 C_1 - 1}{15r^2(2r - s_0)} - 1 \right] \times \\
 \times \left. \left[ \frac{15 C_2 C_3 + 5h(aC_3 - C_1 C_2) - 3ah^2 C_1 - 1 + \frac{4b_3}{b}}{15r^2(2r - s_0)} - 1 + \frac{4b_3}{b} \right] \right\}, \quad (5)
 \end{aligned}$$

где  $h = R - r$ ,  $C_1 = 2r + as_0$ ,  $C_2 = r - ah$ ,  $C_3 = 2rR - s_0 C_2$ ,  $C_4 = 8h\sqrt{1 - a + a^2}$ ,  $\sigma_s$  – предел прочности,  $f^*$  – показатель трения,  $a$  – параметр, учитывающий утонение стенки рифта;

$$m_T = \frac{2\pi b \gamma s_0}{15r^2} [15C_2C_3 + 5h(aC_3 - C_1C_2) - 3ah^2C_1], \quad (6)$$

где  $\gamma$  - плотность материала заготовки;

$$S_n = \frac{\pi}{16h^2} \left[ \left( 2hC_5 + b^2 \ln \frac{2h + C_5}{b} \right) C_6 - 4hC_5^3 \right], \quad (7)$$

где  $C_5 = \sqrt{b^2 + 4h^2}$ ,  $C_6 = b^2 + 16Rh$ .

Входящий в уравнения (5) – (7) параметр  $a$  представляет собой соотношение толщинных и окружных деформаций стенки рифта. Его значение устанавливалось из условия минимума энергии, затрачиваемой на формообразование рифта  $\frac{dA}{da} = 0$ . Для этого

была решена вариационная задача и определено экстремальное значение функционала (5). Исследования показали, что на величину  $a$  главным образом влияет геометрия рифта и практически не влияют механические свойства материала заготовки. Для совокупности значений  $a$ , соответствующих минимуму работы формообразования при изготовлении сферических рифтов, получена следующая зависимость:

$$a = 0.47 \left( \frac{R}{r} \right)^{1.21} \left( \frac{s_0}{r} \right)^{-0.06}. \quad (8)$$

Производная  $\frac{dA}{dl}$  системы уравнений (1) обобщенной расчетной модели для условия формовки сферических рифтов имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dl} = \frac{dA}{dR} = \frac{\pi b}{15r} \left\{ \frac{s_0 \sigma_6 C_4}{63hr^3} [21(5\sqrt{3}r + C_4) [(C_1C_2 - aC_3)h + \right. \\ \left. + C_2C_3] + 6h(7\sqrt{3}r + C_4)(ahC_1 + aC_3 - C_1C_2)] - 3ah^2C_1 \times \right. \\ \left. \times (9\sqrt{3}r + C_4) - C_4 [(C_1C_2 - aC_3)3h + ah^2C_1 - 21C_2C_3] \right\} + \quad (9) \\ + f^* \sigma_{s0} b \frac{8ahC_1 + 20(C_1C_2 - aC_3)}{2r - s_0} \times \\ \times \left[ \frac{15C_2C_3 + 5h(C_1C_2 - aC_3) + 3ah^2C_1}{15r^2(2r - s_0)} + \frac{2b_3}{b} - 1 \right] \end{aligned}$$

Расчет основных технологических параметров формообразования сферических рифтов осуществлялся при перемещении стенки заготовки от начального радиуса  $r$  до заданного радиуса рифта  $R$ .

В процессе моделирования устанавливались зависимости давления пороховых газов  $p$  и работы формообразования  $A$  от относительного радиуса рифта  $\frac{R}{r}$ , а также определялось значение массы заряда, необходимое для осуществления формовки. На рис. 3г представлены расчетная и экспериментальная зависимости относительного радиуса рифта  $\frac{R}{r}$  от массы порохового заряда. Отклонение расчетных данных от экспериментальных значений составляет 2%.

Численная реализация расчетной модели осуществлена на ЭВМ с помощью программного пакета MATHCAD. Созданная в среде MATHCAD программа позволяет рассчитать значения  $p$ ,  $v$ ,  $A$ ,  $l$ ,  $Z$  и  $\psi$  в зависимости от времени  $t$ . Использована стандартная процедура численного интегрирования методом Рунге-Кутты системы уравнений (1) при начальных условиях (2). Полученные данные сохраняются в матрице расчетных значений и выводятся в виде графиков зависимостей основных баллистических параметров: давления пороховых газов  $p$ , скорости перемещаемого тела  $v$  и работы  $A$  (в случае формообразования рифта) от пути  $l$  и времени  $t$ .

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований и осуществлена оценка их согласования с расчетными значениями параметров пороховых технологических установок, полученными при моделировании. Представлены разработанные конструкции двух пороховых установок: пресс-пушки и универсальной газодинамической установки для формовки сферических рифтов из трубных заготовок, описаны методики проведения экспериментов. Для определения таких баллистических характеристик пресс-пушки, как давление пороховых газов и максимальная скорость бойка, разработан измерительный стенд состоящий из следующих блоков: тензометрического датчика давления, усилителя сигнала, аналого-цифрового преобразователя, блока измерения скорости и ЭВМ.

Адекватность расчетной модели применительно к пресс-пушке оценивалась сравнением расчетных и экспериментальных значений пикового давления пороховых газов и максимальной скорости бойка. Результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 1в, г в сравнении с результатами теоретического моделирования. Погрешности в определении пикового давления и максимальной скорости бойка соответственно составили 11,2 и 10,8 %. Опытами подтверждена более высокая эффективность использования порохов "Сунар" и "П-45" из ряда исследованных.

В главе представлены результаты экспериментальных исследований формовки сферических рифтов из трубчатых заготовок. Получены опытные образцы рифтов из стали 12Х18Н9Т. Адекватность зависимостей расчетной модели оценивалась по таким параметрам рифта, как форма образующей  $\rho(z)$ , толщина стенки  $s(z)$  и степень накопленной деформации  $\varepsilon_i$  по сечению формируемого рифта. Средние ошибки в определении данных характеристик (см. рис. 3д) соответственно составили 0,5; 11,1 и 3,3 %.

В четвертой главе на основе данных теоретического моделирования и экспериментальных исследований разработаны методики расчета параметров штамповочных операций, осуществляемых в пороховых технологических установках, в том числе методика определения параметров формовки плоских рифтов эластичной средой в пресс-пушках и методика расчета параметров формообразования сферических рифтов в газодинамических пороховых установках, представлены особенности проектирования операций в указанных установках, а также приведены примеры расчетов по данным методикам.

Представлены результаты использования пороховых пресс-пушек в условиях небольших механических производств для компактирования методом высокоскоростного прессования стружки легированных сталей. Получены брикеты из стружки стали 12Х18Н9Т с плотностью  $4000 \div 4700 \text{ кг/м}^3$  и достаточной для транспортировки прочностью.

В данной главе предложена и описана конструкция универсальной пороховой газодинамической установки для выполнения формообразующих и разделительных операций. Устройство выполнено по схеме с отдельным расположением камеры сгорания, благодаря чему порох горит более эффективно, а использование в конструкции демпферного узла позволяет регулировать посредством изменения жесткости эластичного элемента зазор между камерой сгорания и рабочей камерой, где осуществляется штамповка. Это позволяет задавать характер нарастания давления пороховых газов для выполнения либо формообразующих, либо разделительных операций. На конструкцию установки подана заявка на полезную модель.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана обобщенная модель расчета основных характеристик пороховых технологических установок и параметров осуществляемых в них штамповочных операций. Реализованная в термодинамическом приближении на основе системы дифференциальных уравнений внутренней баллистики ствольных комплексов с некоторыми дополнениями расчетная модель позволяет по известным конструктивным данным установки и условиям заряжания определить следующие основные параметры:

давление пороховых газов, скорость перемещаемого тела и их максимальные значения, а также полезную работу, совершаемую пороховыми газами. Расчетная модель реализована в виде программы на ЭВМ.

2. Приведены частные решения обобщенной модели применительно к условиям деформирования изделий в пороховой ствольной и газодинамической установках. Численные исследования позволили установить рациональную область применения установок: ствольные установки с пиковым давлением до 40 МПа следует использовать для технологических процессов с энергией деформирования не более 5 кДж, а газодинамические установки для формовки сферических рифтов - с энергией формоизменения не более 20 кДж.

3. Спроектирован измерительный стенд на базе ЭВМ для регистрации давления пороховых газов и максимальной скорости боя при выполнении штамповочных операций в экспериментальной пресс-пушке, а также разработан комплекс программ для визуализации и хранения числовых значений характеристик, измеряемых с помощью стенда. Экспериментальными исследованиями подтверждена хорошая согласованность опытных данных и результатов моделирования с использованием расчетной модели применительно к пресс-пушке. Средние ошибки в определении максимальной скорости боя и пикового давления пороховых газов составили соответственно 10,8 и 11,2 %.

4. Численными и экспериментальными исследованиями установлено влияние характеристик пироксилиновых порохов марок "Сокол", "Сунар", "П-45" и "ВУСТ" на баллистические параметры ствольной установки. Для исследованных порохов выявлено преимущество марок "Сунар" и "П-45", которые обеспечивают при одинаковой массе заряда наибольшую скорость боя, а при одном и том же пиковом давлении в установке позволяют уменьшить массу порохового заряда.

5. Спроектирована и изготовлена универсальная лабораторная газодинамическая установка для формовки сферических рифтов из трубчатых заготовок. Проведенными опытами установлено соответствие результатов теоретического моделирования и экспериментальных исследований при формовке сферических рифтов по таким параметрам, как форма образующей, степень накопленной деформации и толщина стенки по сечению рифта. Средние погрешности для данных характеристик соответственно составили 0,5; 11,1 и 3,3 %.

7. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований процессов, протекающих в ходе выполнения формоизменяющих операций в пороховых технологических установках, разработаны следующие методики: методика определения параметров формовки плоских рифтов эластичной средой в пресс-пушках и методика расчета параметров формообразования сферических рифтов из трубчатых заготовок в газодинамической установке.

8. В практическом плане получены положительные результаты по использованию пороховых пресс-пушек в условиях небольших производств для компактирования отходов легированных сталей методом высокоскоростного прессования. В ходе опытной работы в экспериментальной ствольной установке получены брикеты отходов легированной стали 12Х18Н9Т, обладающие плотностью  $4000 \div 4700 \text{ кг/м}^3$  и прочностью, достаточной для дальнейшей транспортировки.

9. Разработана универсальная пороховая газодинамическая установка для проведения разделительных и формообразующих операций, позволяющая повысить эффективность использования энергии пороховых газов, конструкция которой защищена свидетельством на полезную модель.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

1. Беляев В.А., Титов И.А., Верещагин П.В. Исследование режимов работы пороховой установки для высокоскоростного деформирования металлов // Компьютерные

технологии в науке, проектировании и производстве: Тез. докл. 1 Всерос. науч.-техн. конф. 3 - 4 февраля 1999 г. В 19 частях. - Нижний Новгород, 1999. - ч. 17. - С. 28.

2. Беляев В.А., Титов И.А. Исследование влияния характеристик порохов на баллистические параметры установок высокоскоростного деформирования // Теория, технология, оборудование и автоматизация обработки металлов давлением и резанием: Сб. научн. тр. - Тула, 1999. - С. 104 - 108.

3. Беляев В.А., Титов И.А. Методы определения работы формообразования при формовке пороховыми газами // Наука и образование: проблемы и перспективы: Тезисы докладов региональной научно-практической конференции аспирантов, студентов и учащихся. - Бийск: НИЦ БиГПИ, 2000. - С. 8 - 9.

4. Беляев В.А., Гриднев А.А. Исследование объемной сжимаемости эластичных сред // Молодежь - науке будущего: Тезисы докладов Международной молодежной научной конференции. - Набережные Челны: Изд-во Камского политехн. ин-та, 2000. - С. 70 - 72.

5. Беляев В.А., Верещагин П.В., Гриднев А.А. Формование заготовок пороховыми газами // Наука и технологии: реконструкция и конверсия: Материалы региональной научно-практической конференции, посвященной 40-летию БТИ АлтГТУ и 290-летию г. Бийска. - Бийск, БТИ АлтГТУ: Изд-во АлтГТУ, 2000. - С. 116 - 119.

6. Беляев В.А., Титов И.А., Верещагин П.В. Импульсные пороховые установки для обработки материалов // Механизмы и машины ударного, периодического и вибрационного действия: Тезисы международного научного симпозиума 22 - 24 ноября 2000 г. - Орел: Изд-во ОрелГТУ, 2000. - С. 341.

7. Беляев В.А., Титов И.А. Компактирование стружки легированных сталей импульсными методами // Материалы и технологии XXI века: Тезисы докладов I Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых 22 - 24 марта 2000 г. ФНПЦ "Алтай". - Бийск: Изд-во - М.: ЦЭИ "Химмаш", 2000. - С. 259 - 261.

8. Беляев В.А., Титов И.А., Верещагин П.В. Выбор параметров установок для высокоскоростного деформирования // Ползуновский альманах. - 2000, №2. - С. 128 - 130.

9. Беляев В.А. Модель расчета технологических параметров пороховых установок для высокоскоростной штамповки // Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением: Сб. научн. тр. В 2-х частях. - Тула, 2001. - ч. 2. - С. 116 - 124.

10. В.А. Беляев, П.В. Верещагин, И.А. Титов. Устройство для импульсной штамповки трубчатых заготовок давлением пороховых газов / Решение о выдаче свидетельства на полезную модель. Заявка №2000-127058, приоритет от 27.10.2000.