

181 312727
Министерство высшего и среднего специального образования
СССР

Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного
Знамени высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Семёнов Иван Евгеньевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ
ИЗДЕЛИЙ КОРЕБЧАТОЙ ФОРМЫ

Специальность 05.03.05. Процессы и машины
обработки давлением.

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва - 1979

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище
имени Н.Э.Баумана на кафедре "Машины и технология
обработки металлов давлением".

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Овчинников А.Г.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Ганаго О.А.

кандидат технических наук,
доцент Головин А.А.

Ведущая организация - НИИТРАКТОРОСЕЛЬХОЗМАШ

Защита состоится " _____ " _____ 1979 г. _____ ча-
сов на заседании специализированного совета КО 53.15.13.
Москот- ского
Зна- баумана
по

печатью

про
С. д.
МВТ

Авт

да

Уче
спе
кан

Овчинников О.А.

Л-7

В 100 экз.

01352787



1352787

Семенов И. Е. Исследование

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. XXV съезд КПСС поставил задачи повышения производительности, качества выпускаемой продукции и экономии металла. Перспективной разновидностью объемной штамповки является обратное выдавливание, в том числе и происходящее при температурах холодной деформации и отличающееся следующими преимуществами:

высокой точностью получаемых деталей и шероховатостью поверхности, соответствующей $\sqrt[1.25]{...}$ $\sqrt[1.32]{...}$, что позволяет существенно снизить затраты на последующую механическую обработку;

отсутствием необходимости применения нагревательных устройств;

существенным снижением расхода металла, что обеспечивается близостью формы и размеров заготовки к форме и размерам готовой детали;

снижением затрат на металл ввиду возможности применять более дешевые материалы вследствие наличия упрочняющих процессов, обеспечивающих повышенную прочность и твердость материала детали; высокой производительностью.

Недостатками процесса являются большие удельные усилия деформирования, действующие на рабочий инструмент и пониженная его стойкость.

Исследованием процесса обратного выдавливания занимались многие авторы. В основном эти исследования были посвящены выдавливанию цилиндрических пустотелых изделий. Поэтому попытки разработки и внедрения технологии выдавливания коробчатых деталей встречают значительные трудности, так как применение данных, полученных для цилиндрических деталей, не дает желаемого результата в связи с тем, что процесс выдавливания изделий коробчатой формы зависит от ряда других факторов и в отличие от выдавливания осесимметричных изделий характеризуется сложным течением металла и большой неравномерностью деформаций. Это приводит к резкому фестонообразованию (неравномерность по высоте стенки детали) и в конечном итоге к увеличенным отходам металла. Накопленные экспериментальные и производственные данные о процессе обратного выдавливания коробчатых деталей являются недостаточными для правильного проектирования процесса. Поэтому необходимо бы-

до провести работу по теоретическому и экспериментальному исследованию напряженно-деформированного состояния, установить влияние степени деформации, геометрии инструмента, смазки, активных сил трения и других факторов при обратном выдавливании коробчатых деталей.

Целью настоящей работы является разработка нового технологического процесса изготовления коробчатых изделий и создание научно-обоснованной методики расчета и проектирования технологии, а также разработка новых конструкций штампов для процесса обратного выдавливания коробчатых изделий.

Задачами исследования являются:

1. Экспериментальное определение влияния технологических параметров на деформированное состояние, предельное формоизменение, очаги пластической деформации.

2. Экспериментальное определение влияния технологических параметров на распределение напряжений на контактных поверхностях рабочего инструмента и на усилие деформирования.

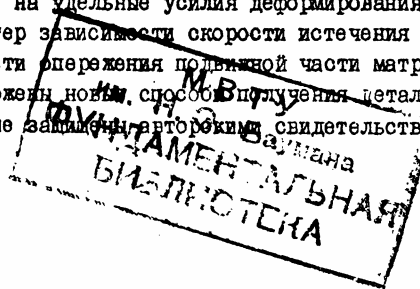
3. Теоретическое решение задачи о распределении напряжений и определение усилий деформирования для коробчатых деталей.

4. Установление влияния активных сил трения на уменьшение неравномерности течения металла (фестонообразование) и снижение усилия деформирования.

5. Разработка рекомендаций по расчету технологических процессов, создание новых конструкций штампов и их промышленное опробование.

Научная новизна. Установлен характер течения металла и выявлены очаги пластической деформации при выдавливании изделий коробчатой формы.

На основании предположения о существовании в очаге пластической деформации нескольких зон получено решение для конечной стадии деформирования и предложены формулы для определения распределения напряжений и усилия деформирования для выдавливания коробчатых деталей. Установлен характер влияния активных сил трения, действующих по коротким сторонам коробчатой заготовки, на удельные усилия деформирования, а также установлен характер зависимости скорости истечения металла в стенках от скорости опережения подвижной части матрицы. Разработаны и предложены новые способы получения деталей коробчатой формы, которые защищены авторскими свидетельствами.



Предметом защиты являются установленные характер течения и очаги деформации при выдавливании изделий коробчатой формы, полученные методом совместного решения уравнений равновесия и условия пластичности новые формулы для распределения напряжений и оп-ределения усилий выдавливания, а также новые способы выдавливания коробчатых деталей с активным действием сил трения, рекомендации по расчету технологических процессов и новые конструкции штам-тов.

Практическая полезность. Разработаны научно-обоснованные ре-комендации для расчета технологических параметров процессов об-ратного выдавливания изделий коробчатой формы.

Полученные результаты исследований позволяют проектировать новые и улучшить существующие технологические процессы изготовле-ния коробчатых деталей в условиях их интенсификации с активным действием сил трения.

Реализация результатов работы в промышленности. Полученные результаты положены в основу разработанного технологического процесса холодного обратного выдавливания удлиненных и квадрат-ных в плане коробчатых деталей из алюминиевых сплавов типа "Эк-ран" на головном предприятии ПО "Электрон" с годовым экономи-ческим эффектом на 1979 г. - 5100 рублей и ожидаемым экономичес-ким эффектом на 1980 г. - 36000 рублей.

Апробация работ. Основные положения диссертации были доло-жены и обсуждены на Всесоюзной конференции по повышению качест-ва и эффективности изготовления технологической оснастки метода-ми пластического деформирования в г. Таллине в 1977 году и на научных семинарах кафедры "Машины и автоматизация обработки дав-лением" МВТУ им.Баумана в 1977, 1978 и 1979 г.г.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубли-ковано 6 печатных работ.

Объем работы. Диссертация содержит 120 страниц машинописно-го текста, 11 таблиц, 109 рисунков, список использованной ли-тературы (167 наименований).

I. Обзор литературы по обратному выдавливанию. Цель и зада-чи исследования.

В этой главе рассмотрены технологические процессы, их тео-ретический анализ, материалы, оборудование для процесса обратно-го выдавливания, а также проведен анализ тенденций развития хо-лодного обратного выдавливания за рубежом и в нашей стране.

Уделено внимание теоретическим решениям, посвященным обратному выдавливанию цилиндрических деталей, среди которых можно выделить решения, полученные методами: инженерным, линейного скольжения, баланса работ, функции тока, дифференциально-разностным и другие решения. Проведенное сопоставление различных решений и построенные зависимости удельного усилия от различных факторов по формулам разных авторов показывают значительное расхождение в определяемых величинах.

Экспериментальные исследования показывают, что на процесс обратного выдавливания оказывает значительное влияние степень деформации, геометрия рабочего инструмента, скорость деформации, сила трения, форма исходной заготовки и другие факторы.

Снижение удельного усилия деформирования может быть достигнуто: выбором рациональной формы инструмента и схемы деформирования; использованием активных сил трения; применением циклического нагружения; выдавливанием с наложением ультразвуковых колебаний; введением в деформируемый металл энергии (тепловой, акустической и других).

Рассмотрены работы, посвященные обратному выдавливанию несимметричных в плане изделий коробчатой формы, на основании которых показаны особенности выдавливания таких изделий, сложность процесса и нецелесообразность формул и рекомендаций, полученных для осесимметричного выдавливания.

Анализ технической литературы по рассматриваемым технологическим процессам свидетельствует, что в настоящее время отсутствуют рекомендации и научно-обоснованные методы расчета и проектирования технологических процессов выдавливания коробчатых деталей, а существующие процессы выдавливания являются недостаточно экономичными, требуют значительных трудозатрат, характеризуются неравномерным течением металла и необходимостью высоких удельных усилий деформации. Это позволило сформулировать цель и задачи исследований.

2. Теоретические исследования процесса обратного выдавливания изделий коробчатой формы.

В главе рассмотрены два варианта исполнения донной части коробчатых изделий: дно цилиндрическое и представляет собой пластину, изогнутую по радиусу r_g и дно, состоящее из плоского участка с шириной a и зоны перехода плоского участка к стенке с радиусом на плунсоне r_g , а на матрице $R = r_g + H$

(где H — толщина дна, равная толщине стенок коробочки).

Первый вариант коробочки — дно цилиндрическое и длина этой цилиндрической части L (без учета двух скругленных с радиусом $r_0 \sin \theta_0$ торцевых частей коробочки, причем θ_0 — угол между вертикальной осью симметрии и радиусом — вектором r_0 , проведенным из точки пересечения донной части коробочки с ее вертикальной стенкой). Для цилиндрической пластины с длиной $L > 5r_0$ можно предложить плоскодеформированное состояние, т.е. предположить, что деформация в направлении длины L отсутствует.

На последней стадии выдавливания радиус пуансона r_0 и матрицы $r_0 + H$ концентричны. Рассмотрим малый элемент пластины и имеем уравнения равновесия и пластичности для его напряженного состояния в полярной системе координат.

Примем, что на контактной поверхности касательные выражения постоянны и равны $\tau = G_z/2$ и τ зависит только от r т.е. $\tau = f(r)$. Подставив в первое уравнение равновесия значение $G_r = G_\theta$ из уравнения пластичности и интегрируя второе уравнение равновесия, получим:

$$G_r = -2 \int \sqrt{k^2 - \tau^2} \frac{dr}{r} + f_1(\theta) \quad \text{и} \quad G_\theta = -(r\tau' + 2\tau)\theta + f_2(r)$$

где $f_2(r)$ и $f_1(\theta)$ произвольные функции от r и θ . Подставляя значения для G_r и G_θ в уравнение пластичности, получим:

$$f_1(\theta) + (r\tau' + 2\tau)\theta = 2 \sqrt{k^2 - \tau^2} + 2 \int \sqrt{k^2 - \tau^2} \frac{dr}{r} + f_2(r)$$

правая часть в этом уравнении зависит только от r , тогда в левой части надо положить $r\tau' + 2\tau = 2C$ и $f_1(\theta) = -2C\theta$, где C — некоторая постоянная.

Интегрируя последнее уравнение, получим: $\tau = \frac{a}{r^2} + C$ произвольные постоянные a и C определяются из условия:

$$\tau = 0 \quad \text{при} \quad r = r_0 + \frac{H}{2} \quad \text{и} \quad \tau = k \quad \text{при} \quad r = r_0$$

После интегрирования и преобразования получим окончательное решение в области $\theta \in [0, \theta_0]$, которое имеет следующий вид:

$$G_r = -2C\theta - \sqrt{k^2 - \left(\frac{a}{r^2} + C\right)^2} - C \arcsin \frac{\frac{a}{r^2} + C}{k} + \sqrt{C^2 - k^2} \arcsin \frac{(C^2 - k^2)r^2 + aC}{ak}, M(1)$$

$$G_\theta = -2C\theta - 3 \sqrt{k^2 - \left(\frac{a}{r^2} + C\right)^2} - C \arcsin \frac{\frac{a}{r^2} + C}{k} + \sqrt{C^2 - k^2} \arcsin \frac{(C^2 - k^2)r^2 + aC}{ak}, N(2)$$

$$\tau = \frac{k r_0^2 \left[\left(r_0 + \frac{H}{2} \right)^2 - r^2 \right]}{r^2 \left[\left(r_0 + \frac{H}{2} \right)^2 - r_0^2 \right]} \quad (3)$$

где M — постоянная, определяемая из условия: $\epsilon_r = \epsilon_z$, при $r = r_g$ и $\theta = \theta_0$, причем $\theta_0 \neq 0$.

Торец пуансона контактирует с цилиндрической зоной длиной L и двумя сферическими зонами с радиусами r_g и углом θ_0 .

Силы выдавливания $P = P_z + P_H$, где

$$P_z = 2L \int \epsilon_r \cos \theta r_g d\theta + 2L \int_{\theta_0}^{\pi/2} r \sin \theta r_g d\theta$$

Первое слагаемое — усилие от действия радиальных напряжений ϵ_r , а второе — от касательных напряжений τ .

Предположив, что на сферическом участке справедливо распределение напряжений, полученное для цилиндрического участка (считая, что толщина H мала по сравнению с другими размерами), получим:

$$2P_H = 2\pi \int \epsilon_r \cos \theta r dr \quad (\text{где } r = r_g \sin \theta).$$

Принтегрировав и сложив полученные значения, имеем:

$$P = 2G_s^* r_g \left\{ L \left[\frac{r_g^2}{r_g^2 - (r_g + \frac{H}{2})^2} (1 - \cos \theta_0) - \sin \theta_0 - 0.5 (1 - \cos \theta_0) \right] + \right. \\ \left. + \frac{2}{3} \pi r_g \left[\frac{r_g^2}{r_g^2 - (r_g + \frac{H}{2})^2} \left(\frac{3\theta_0}{2} - \frac{\sin \theta_0}{2} + \frac{\sin^3 \theta_0}{6} \right) + \cos^3 \theta_0 - 1 \right] \right\} \quad (4).$$

Задавая τ в виде $\tau = \mu G_s^*$, получим:

$$P = 2G_s^* r_g \left\{ L \left[\mu (1 - \cos \theta_0) \left(\frac{2r_g^2}{r_g^2 - (r_g + \frac{H}{2})^2} - 1 \right) - \sin \theta_0 \right] + \right. \\ \left. + \frac{2}{3} \pi r_g \left[\frac{\mu r_g^2}{r_g^2 - (r_g + \frac{H}{2})^2} \left(\theta_0 - \sin \theta_0 + \frac{\sin^3 \theta_0}{3} \right) + \cos^3 \theta_0 - 1 \right] \right\} \quad (5)$$

Для случая второго варианта дна коробки очаг деформации подразделяем на две зоны: зону плоской деформации с шириной a и длиной L и зону перехода от плоского участка к вертикальной стенке. Распределение напряжений на плоском участке гетем согласно Прандтлю $\epsilon_z = \left(\frac{G_s^*}{H} \right) x + C$, а на переходных радиусных участках согласно формуле (I). На границе зон имеем $\epsilon_z = \epsilon_{z \max}$, откуда определяем C , и подставляем в выражение для ϵ_z : $\epsilon_z = G_s^* \left[\frac{x}{2} - \frac{r_g^2}{r_g^2 - (r_g + \frac{H}{2})^2} - 1 - \left(\frac{a}{H} - x \right) \right]$

Разбивая плоскую зону на два треугольника (равнобедренных с углом при вершине $\alpha = 90^\circ$), примыкающих к коротким сторонам, и две трапеции (по длинным сторонам), учитывая, что гипотенуза треугольника равна a , а основание трапеции f , получим для трапеций и треугольников выражения для ϵ_z , а усилие опре-

делим по формуле: $P_2 = 2 \int_{F_1} G_{21} dF_1 + 2 \int_{F_2} G_{12} dF_2$,

где элементарные площади равны:

$$dF_1 = [(f-a) + 2x] dx; \quad dF_2 = [2y - (f-a)] dy$$

Принтегрировав и сложив полученные значения с учетом от радиусных участков и учитывая четыре сферических участка в угловых зонах, и принимая $\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon} G_s^*$, получим для квадратных коробок с $f=a$

$$P = G_s^* \left\{ 4a \tau_0 \left[M \left(\frac{2\tau_0^2}{\tau_0^2 - (\tau_0 + \frac{H}{2})^2} - 1 \right) - 1 \right] + a^2 \left[\frac{2M\tau_0^2}{\tau_0^2 - (\tau_0 + \frac{H}{2})^2} \frac{\pi}{2} - \right. \right. \\ \left. \left. - M \frac{a}{2H} + M \frac{a}{3H} - 1 \right] + \frac{4}{3} \pi \tau_0^2 \left[\frac{2M\tau_0^2}{\tau_0^2 - (\tau_0 + \frac{H}{2})^2} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) - 1 \right] \right\} \quad (6)$$

а для прямоугольных коробок с $f \geq a$ (без учета четырех сферических угловых участков) получим:

$$P = G_s^* \left\{ 2(f+a) \tau_0 \left[M \left(\frac{2\tau_0^2}{\tau_0^2 - (\tau_0 + \frac{H}{2})^2} - 1 \right) - 1 \right] + \right. \\ \left. + fa \left[\frac{2M\tau_0^2}{\tau_0^2 - (\tau_0 + \frac{H}{2})^2} \frac{\pi}{2} - \frac{Ma}{2H} + \frac{Ma^2}{3fH} - 1 \right] \right\} \quad (7)$$

Учитывая, что на пуансоне всегда выполняется рабочий пояс с высотой ℓ , на который действуют касательные напряжения τ_k и приравнивая радиальные напряжения на свободных поверхностях $G_{22} = G_{11} = G_s^* + 2M_1 G_s^* \frac{\ell}{H}$, получим при $f \geq a$

$$P = G_s^* \left\{ 2(f+a) \tau_0 \left[M \left(\frac{2\tau_0^2}{\tau_0^2 - (\tau_0 + \frac{H}{2})^2} - 1 \right) - (1 + 2M_1 \frac{\ell}{H}) \right] + \right. \\ \left. + fa \left[\frac{2M\tau_0^2}{\tau_0^2 - (\tau_0 + \frac{H}{2})^2} \frac{\pi}{2} - \frac{Ma}{2H} + \frac{Ma^2}{3fH} - (1 + 2M_1 \frac{\ell}{H}) \right] - 2(a+f+\pi\tau) M_1 \ell \right\} \quad (8)$$

Формулы получены для горячей деформации, но могут быть использованы и при холодном выдавливании, если брать напряжение G_s^* в виде $G_s = f(\epsilon_s)$, где ϵ_s - средняя по сечению коробочки степень деформации.

3. Методика проведения экспериментов.

Планирование лабораторных экспериментов заключалось в выборе зависимой переменной, факторов и их уровней, в среднемении и анализе размерностей, составлении уравнения регрессии в виде: $y = f(x_1, x_2, \dots, x_i)$; т.е. в виде математической модели процесса, связывающей параметр оптимизации с факторами. Матрицу планирования составили для факторного эксперимента, что позволило сократить количество опытов на 50-75%. Были определены коэффициенты регрессии и вычислены дисперсии адекватности S_{ad}^2 и воспроизводимости S_{y}^2 . Определен критерий Фишера $F = S_{ad}^2 / S_{y}^2$ 7

и его значение сравнивали с табличным. При $F \leq F_c$ модель считалась адекватной и далее проводили проверку значимости коэффициентов регрессии и определяли доверительный интервал. При определении порядка проведения экспериментов производили выбор образцов и конструкций измерительных устройств. Образцы были изготовлены из свинца С-1, алюминия АД-1 и меди - М-1. Эксперименты проводили на гидравлическом прессе с усилием 160 тс и скоростью рабочего хода 3 мм/с в три этапа. На первом этапе проводили исследования напряженного и деформированного состояния осадки пластины, изогнутой по радиусу R . На втором этапе - исследования напряженного и деформированного состояния при обратном выдавливании изделий коробчатой формы, а на третьем этапе проводилось исследование влияния активного действия сил трения на процесс. Матрицы штампов осадки пластины и штампы выдавливания коробок имели встроенные контактные мессдозы, измеряющие удельные усилия на поверхности образца, а также мессдозы, измеряющие полное усилие. Сигналы от датчиков поступали на два усилителя ТА-5 и фиксировались осциллографом К-115. Штамп для выдавливания с активным действием сил трения имел составную матрицу, состоящую из неподвижной части (контактирующей с донной частью заготовки и ее длинными стенками) и подвижной части, контактирующей с короткими стенками коробочки и имеющей привод в виде двуплечих рычагов, качающихся вокруг оси и контактирующими одним концом с упорами, установленными на верхней плите штампа, а другим - с подвижной частью матрицы. Изменением соотношения плеч рычагов получали различную скорость подъема подвижной матрицы.

5. Экспериментальные исследования.

В главе приводятся результаты экспериментального исследования напряженного и деформированного состояния осадки цилиндрической пластины и обратного выдавливания коробочек, в том числе с активным действием сил трения.

Исследование деформированного состояния осадки пластины проводилось с целью получения картины течения металла и определения характера деформаций $\epsilon_{\text{эк}}$ для разных степеней деформации, условий трения при осадке образцов из свинца С-1 и алюминия АД-1. Экспериментальный штамп имел матрицу с радиусом $R = 32$ мм и набор пуансонов с радиусами от $R_c = 20$ до $R_c = 32$ (мм). Образцы прямоугольной формы имели ширину $B = 40$ мм, и длину

$L = 120$ мм при разной высоте $H_0 = 21,5; 18; 14; 10$ (мм). На одну часть образца (предварительно задавленного пуансоном γ_{d-1}), составленного из двух одинаковых половинок: длиной $L/2$ наносилась радиальная координатная сетка, а затем проводилось окончательное деформирование образца пуансоном γ_{d-1} . По искаженной координатной сетке были построены распределения сдвиговых деформаций, которые подтвердили наше теоретическое положение о независимости касательных напряжений τ от угла β и хорошо согласовались с теоретически полученными значениями τ_0 , а расхождение между ними не превышало 15%.

При исследовании напряженного состояния получили картину распределения напряжений σ_z на поверхности рабочего инструмента для различных условий трения, степеней деформации, геометрии рабочих частей пуансонов и матриц (матрицы имели различные радиусы перехода от дна к стенке от 0 до 10 мм, а пуансоны имели радиусы скругления r_f от 0,3 до 8 мм), измеряя контактными мессдозами удельное усилие на поверхности матрицы в различных ее точках, получили экспериментальные эпюры распределения напряжений, которые хорошо совпадали с эпюрами, построенными по теоретическим формулам, а расхождение между их значениями не превышало 15%.

На основании экспериментальных данных были построены кривые зависимости относительного удельного усилия q/σ_s^* от относительной толщины пластины $r_f/L + \frac{H}{2}$ для разных условий трения. На этих же графиках были построены теоретические кривые, рассчитанные на ЭВМ.

Исследование деформированного состояния при обратном выдавливании коробчатых деталей проводили на составных образцах с нарезанной на плоскость развеса координатной сеткой — с квадратными ячейками в центральной плоской подпуансонной зоной и с радиальной сеткой в зоне перехода от плоской донной части к вертикальной стенке. Это позволило выявить картины течения металла и очаги пластической деформации для различных радиусов перехода матрицы при размерах коробочек 40×100 мм (ширина на длину) и разной степени деформации (от $\varepsilon = 0,5$ до $\varepsilon = 0,85$). Оказалось, что при выдавливании толстостенных коробочек в меридиональном сечении в подпуансонной зоне имеют место две застойные зоны в местах радиусов перехода от дна к стенке и картина деформированной радиусной зоны перехода несколько отличается от осадки

пластины с соответствующей толщиной, но уже при $\varepsilon > 0,6$ застойные зоны исчезают, а картина течения в подпуансоновой плоской зоне соответствует осадке полосы, а в радиусной переходной зоне — осадке цилиндрической пластины. Это положение распространяется и на коробки без радиуса перехода на матрице, так как здесь получаем подробную картину вследствие замедления течения металла непосредственно в углах матрицы и образования здесь застойных зон.

При поэтапном исследовании деформированного состояния получены картины искаженной координатной сетки на начальной стадии выдавливания, когда $\varepsilon_n = 10-15\%$ (деформация по высоте дна) и на промежуточной стадии выдавливания, когда $\varepsilon_n = 80\%$. Эти стадии характеризуются (в особенности первая стадия) ярко выраженными застойными зонами по торцам пуансона, а в начальной стадии первоначально деформируются угловые участки образцов (происходит смятие углов) до соприкосновения заготовки с плоской донной частью матрицы, а затем уже начинается вытекание металла в стенки коробки.

Для определения характера течения металла в плоской подпуансоновой области нами были продеформированы слоистые образцы, состоящие из двух и трех слоев с нанесенной на места контакта слоев координатной сеткой. При выдавливании слоистых образцов получается картина течения металла по всей высоте образца, причем в верхнем подпуансоновом слое имеет место заторможенная зона, а деформация происходит только в местах радиуса перехода от плоской донной части к стенке, в срединном слое наибольшие деформации наблюдаются уже непосредственно в центральной части образца. Картина течения металла подтвердила принятое теоретическое предположение о течении металла в очаге деформации.

При исследовании напряженного состояния выдавливания коробчатых деталей получили эпюры распределения напряжений по всей поверхности матрицы для разных степеней деформации, геометрии рабочих частей инструмента и условий трения, причем расхождение между экспериментальными значениями напряжений в различных точках поверхности и значениями, полученными по теоретическим зависимостям, не превышает 15%.

На основании экспериментальных данных для разных степеней деформации и условий трения были построены кривые зависимости относительного удельного усилия η/σ_s от относительной величины $\frac{2\tau_f}{\sigma_s}$, характеризующей величину радиуса скругления r_f , относительно

плоской зоны шириной a , и установлено, что при увеличении радиусной зоны наблюдается рост удельных усилий. Были построены также полученные при выдавливании в матрицах с различным радиусом скругления R в условиях трения кривые изменения относительного удельного усилия q/σ_s^* в зависимости от относительной толщины H/B . Установлено, что при уменьшении величины H/B удельное усилие возрастает интенсивнее в случае выдавливания с большими радиусами скругления рабочего инструмента и может достигать значений $7\sigma_s^*$. При сравнении экспериментальных данных с результатами, полученными расчетом на ЭВМ по теоретическим формулам, оказалось, что практически для всех значений степеней деформации $\varepsilon > 0,6$ теоретические кривые не выйдут из области доверительного интервала эксперимента, что согласуется с полученными при исследовании деформированного состояния данными о приемлемости теоретических зависимостей для величин $\varepsilon > 0,6$.

Исследование влияния активного действия сил трения на процесс было проведено на образцах с размерами 20×50 ($B \times L$) и толщиной стенок от 1 до 4 мм для разных материалов (свинец С-1, алюминий АД-1 и медь М-1), условий трения и геометрии рабочего инструмента. Образцы выдавливались в закрепленной матрице (скорость опережения $V_{оп} = V_m / V_{мет}$; где V_m — скорость подъема матрицы, а $V_{мет}$ — скорость истечения металла в стенку), в свободной матрице ($V_{оп} = 0,5$) и с активным действием сил трения ($V_{оп}$ до 2). Исследование проводили по двум направлениям: 1 — исследовалось влияние активного действия сил трения на снижение удельного деформирующего усилия; 2 — исследовалось влияние различных факторов (в том числе активных сил трения) на величину неравномерности стенок по высоте $\gamma = \frac{y_k - y_c}{y_k} \cdot 100\%$ (где y_k — средняя высота стенок по длинным сторонам, а y_c — соответственно по коротким сторонам коробочки). Были построены зависимости удельного усилия q от рабочего хода H_p для различных условий выдавливания и скорости опережения $V_{оп}$, а также получены зависимости изменения удельного усилия выдавливания от скорости опережения матрицы $V_{оп}$. Наибольший эффект снижения удельного усилия получается при максимальных степенях деформации и скорости опережения $V_{оп} = 1,9$ (увеличение скорости $V_{оп} > 2$ приводит к образованию надрывов и утяжин на поверхности заготовок), а снижение усилия составляет в этом случае $(22+34)\%$. При свободной матрице снижение удельного усилия составляет $\sim 12\%$.

Для исследования формоизменения было проведено планирование экспериментов, составлена математическая модель и получено уравнение регрессии для неупрочняющегося металла:

$$Y = -9,2 + 5,9x_1 - 17,88x_2 + 5,025x_3 - 7,3x_4 + 9,6x_1x_2 + 4,3x_2x_3 - 5,2x_2x_4$$

(где x_1, x_2, x_3, x_4 - соответственно кодированные значения степени деформации, скорости опережения матрицы, рабочего хода, коэффициента трения) для холодного выдавливания ряда цветных металлов и сплавов от алюминия АД-1 до меди М-1:

$$Y = 2,21 + 0,14x_1 + 0,54x_2 - 5,5x_3 - 1,2x_4 - 1,67x_5$$

(где x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 - соответственно кодированные значения предела текучести, степени деформации, скорости опережения матрицы, рабочего хода, коэффициента трения). По полученным функциям был проведен расчет. Проведены дополнительные поверочные эксперименты с целью получения коробочек с ровным верхним торцом в результате чего были получены свинцовые и алюминиевые коробочки с практически ровным верхним торцом. Таким образом путем применения активного действия сил трения по коротким сторонам коробочек было получено не только снижение удельного деформирующего усилия, но и выявлена возможность регулирования скоростью подъема матрицы высоты стенок коробочек, и получения не только ровного по высоте торца, но и высоты стенок по коротким сторонам коробочек, большей, чем по длинным, т.е. управления процессом фестонообразования. По результатам исследований были созданы два новых способа выдавливания, на которые получены авторские свидетельства, и штамп, на который получено положительное решение на выдачу авторского свидетельства.

5. Результаты промышленного внедрения и экономическая эффективность.

Внедрение полученных в данной работе результатов в промышленность проведено на ПО "Электрон". Для телевизоров "Электрон 714" и "Электрон 718" разработаны рекомендации по изменению существующего технологического процесса изготовления деталей типа "Экран" из алюминиевого сплава А-7М. Разработаны новые конструкции штампов для обратного выдавливания квадратных и удлиненных в плане деталей коробчатой формы, что позволило повысить стойкость рабочего инструмента в 1,5 раза, при снижении себестоимости изготовления матрицы в 2,3 раза. Экономический эффект от внедрения на 1979 г. составляет 5100 рублей.

Разработаны новые конструкции штампов с активным действием

сил трения, позволяющие уменьшить удельные усилия выдавливания на 15-20%, увеличить стойкость рабочего инструмента в 2 раза и повысить коэффициент использования металла на 8-9%. Предполагаемый экономический эффект от внедрения составит на 1980 г. 36000 рублей. Документы, подтверждающие использование результатов данной работы в промышленности приведены в приложении к диссертации.

Общие выводы.

1. Анализ литературных данных показал, что процесс обратного выдавливания коробчатых изделий имеет высокую производительность и является эффективным, наряду с этим процесс характеризуется сложным течением металла, большой неравномерностью деформаций, приводящей к резкому фестонообразованию с большим отходом металла, а также высокими удельными усилиями деформирования и низкой стойкостью штампов. Накопленные научно-экспериментальные и производственные данные о процессе являются недостаточными для правильного проектирования процесса, что затрудняет внедрение его в производство.

2. Получено замкнутое теоретическое решение для конечной стадии деформирования и предложены формулы для распределения напряжений и определения усилия выдавливания коробчатых изделий с цилиндрическим и плоским дном. Формулы учитывают основные факторы, влияющие на процесс как для квадратных, так и для прямоугольных в плане коробочек и позволяют выполнить прочностной расчет штампов и выбор оборудования.

3. Исследование деформированного состояния осадки цилиндрической пластины и обратного выдавливания коробчатых изделий позволило получить картины течения металла, обнаружить застойные зоны и очаги пластических деформаций. Получены распределения сдвиговых деформаций γ_{Σ} в различных зонах пластины для различных степеней деформации и условий трения, которые хорошо согласуются (расхождение не превышает 15%) с распределениями сдвиговых деформаций γ_r , построенными по теоретическим зависимостям. Полученные при выдавливании коробочек для различных этапов ходов деформирования, условий трения, степеней деформации данные о деформированном состоянии подтверждают принятые теоретические расчетные схемы при степени деформации $\varepsilon > 0,6$.

4. Исследованием напряженного состояния и силовых параметров осадки пластины и выдавливания коробочек получены рас-

предления напряжений по поверхности рабочего инструмента и определены усилия выдавливания пластин и коробочек при разных степенях деформации и т.п. Полученные значения напряжений и усилий хорошо согласуются с теоретическими значениями (расхождение не превышает 15%) при степени деформации $\varepsilon > 0,6$.

5. Исследованиями изменения условий трения на наружной поверхности по коротким сторонам коробочки при обратном выдавливании установлено, что при применении свободной матрицы снижение удельного деформирующего усилия составляет $(5+12)\%$, а при применении активного действия сил трения наблюдается снижение усилия на $(22+34)\%$ по сравнению с выдавливанием в закреплённой матрице. Одновременно с этим можно регулировать скоростью опережения высоты стенок по коротким и длинным сторонам коробки и добиться увеличения коэффициента использования металла на 20%.

6. Применением математического планирования и обработки экспериментальных данных при исследовании обратного выдавливания коробочек и активным действием сил трения получены два уравнения регрессии для горячего выдавливания и холодного выдавливания из цветных металлов и сплавов, описывающие деформирование стенок коробочек в зависимости от многих факторов для коробочек с отношением длины к ширине $\frac{L}{B} = 2+3$.

7. Было разработано два новых способа обратного выдавливания коробчатых изделий и новая конструкция штампа, которые признаны изобретениями. Экспериментальная проверка нового способа и штампа показала их высокую эффективность, что послужило хорошей рекомендацией для их дальнейшего внедрения в промышленность.

8. На основании результатов исследования были разработаны мероприятия по улучшению существующих технологических процессов для получения в заводских условиях деталей типа "Экран", а также новые конструкции штампов. Экономический эффект от внедрения результатов исследования на ПО "Электрон" на 1979 г. составляет 5100 рублей, а ожидаемый экономический эффект на 1980 г. составит 36000 рублей.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Семёнов И.Е. Напряжённое состояние цилиндрической пластины при осадке в жестком штампе. "Известия вузов. Машиностроение", № 8, 1976, с.136-139.

2. Семёнов И.Е. Расчет деформирующего усилия при горячей калибровке толстолистовых заготовок, изогнутых по радиусу, "Вестник машиностроения", № 12, 1976, с.65-67.

3. Семёнов И.Е. Расчет усилия деформирования при обратном выдавливании изделий коробчатой формы. "Машины и технологии обработки металлов давлением", М.Машгиз, вып.1, 1972, с.130-132.

4. Жаров А.Л., Семёнов И.Е. Напряженное состояние заготовки при закрытой прошивке коническим пуансоном "Вестник машиностроения", № 2, 1977, с.71-74.

5. Семёнов И.Е. Способ выдавливания изделий, а.с. СССР № 627898, с приоритетом от 11.04.77г. Бюллетень "Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки", № 38, 1978.

6. Семёнов И.Е. Способ выдавливания изделий, а.с. СССР № 676369, с приоритетом от 11.04.77 г. Бюллетень "Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки", № 28, 1979.

