

1549721

На правах рукописи

Семенов Иван Евгеньевич

Разработка ресурсосберегающих технологий и оборудования
для холодной штамповки коробчатых деталей.

Специальность 05.03.05. Процессы и машины обработки
давлением



Автореферат
диссертации на соискание ученой степени доктора
технических наук

Москва 1996

Работа выполнена в Московском государственном техническом
университете им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: академик Российской Академии Проблем
Качества, доктор технических наук,
профессор Живов Л.И.
Доктор технических наук, профессор
Степанский Л.Г.
Доктор технических наук, профессор
Вогданов Э.Ф.

Ведущая организация: НПО ВПТИЯЖМАШ

Защита состоится "15" мая 1996 г. в 14³⁰ час.
на заседании специализированного Совета Д053.15.05. при МГТУ им.
Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в 1 экз., заверенный печатью, просим
выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им.
Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан "04" 04 1996 г.
Телефон для справок 267-09-63

Ученый секретарь
специализированного совета
к.т.н., доц.



Семенов В.И.

Подписано к печати 28.03.96

Объем 2,0 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ

115

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана

Актуальность. В машиностроении, строительстве, электронной и других областях промышленности большое применение находят разнообразные по форме и размерам коробчатые детали. Большинство таких деталей изготавливают методами холодной пластической деформации, в основном, холодным обратным выдавливанием из объемной заготовки, вытяжкой и гибкой из листовой заготовки.

Обратное выдавливание коробчатых деталей еще не получило широкого внедрения из-за недостатка данных для рационального проведения процесса. Поэтому многие производственные детали, для изготовления которых было бы рационально применять обратное выдавливание, в настоящее время получают обработкой резанием или многократной вытяжкой из листового материала, что требует большей трудоемкости, больших ресурс- и энергозатрат и увеличивает себестоимость.

Однако сами процессы холодного выдавливания имеют существенные недостатки, такие как высокие удельные силы, действующие на рабочий инструмент, что требует применения оборудования с большими усилиями и соответственно большими энергетическими затратами и большие отходы вследствие неравномерности течения металла в стенки коробчатых деталей. Следует отметить и то обстоятельство, что обратным выдавливанием можно получать коробчатые детали с относительно небольшими габаритными размерами до 200x200 мм в плане и массой до нескольких килограмм, что связано с большими силами деформирования. Более крупные тонкостенные детали получают листовой штамповкой, а именно многопереходной вытяжкой, или гибкой.

Значительным резервом технологии изготовления деталей сложной формы является сочетание холодной объемной штамповки с другими видами холодного деформирования - специальными видами обработки с локальным нагружением (раскаткой, штамповкой качающимся и вращающимся инструментом и др.), листовой штамповкой с применением в качестве рабочего инструмента эластичных сред, последний вид обработки требует однако повышенных энергозатрат, так как возникают дополнительные потери энергии на деформирование эластичного инструмента.

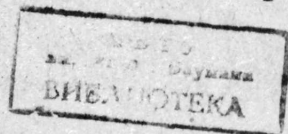
Следует особо отметить и тот факт, что в современных условиях вхождения России в мировой рынок происходит резкий рост стоимости

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1549721

Семенов И.Е. Разработка ре



материалов и энергии. Так только за период с января 1991 по июль 1995 г.г. произошло подорожание алюминиевого проката в 20000 раз, стального проката в 10000 раз, электроэнергии в 5000 раз.

Таким образом всего за 4,5 года стоимость металлопроката в России достигла уровня мировых цен, однако, т.к. стоимость электроэнергии у нас еще ниже среднемировой примерно в 2...2,5 раза, то, вероятно, в ближайшее время следует ожидать ее дальнейшего повышения. Ускорение решения проблемы ресурсо- и энергосбережения может быть достигнуто разработкой и широким внедрением в промышленность новых ресурсосберегающих технологических процессов и энергосберегающего оборудования для холодной штамповки коробчатых деталей.

Работа выполнена в соответствии с планом научных исследований Координационного совета по проблеме "Холодная объемная штамповка металлов", созданного согласно приказа минвуза СССР N 1342 от 08.12.80.

Цель работы - разработка научно обоснованных технологических и технических решений, создание на их основе новых ресурсосберегающих технологических процессов холодной штамповки коробчатых деталей, штамповой оснастки и энергосберегающего оборудования, внедрение которых позволяет внести значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса в области холодной штамповки и ускорить решение важной народно-хозяйственной проблемы ресурсо-и энергосбережения.

Методы исследования. Теоретические и экспериментальные исследования выполнены с использованием классических методов описания движения и напряженно-деформированного состояния материала, принятых в механике сплошных сред и в теории пластичности, и экспериментальных методов определения силовых и кинематических параметров в процессе деформирования. Математическое моделирование процессов упругого деформирования рабочего инструмента проведено с использованием основных уравнений теории упругости методом конечных разностей с применением специальных комплексов программ ФИТИНГ-1.

Автор защищает:

- теоретические зависимости для расчета энерго-силовых параметров процесса холодного выдавливания коробчатых деталей;
- математические модели деформирования эластичного инструмента с учетом сил трения и полученные результаты анализа напряженно-деформированного состояния;

- основные принципы локального формообразования коробчатых деталей эластичным рабочим инструментом и новые схемы оборудования;
- результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния коробчатых образцов при обратном выдавливании;
- результаты экспериментальных исследований влияния на процесс выдавливания коробчатых деталей активного действия сил трения, возможность управления процессом формообразования стенок коробок и созданные новые способы и конструкции штампов выдавливания коробчатых деталей;
- разработанные рекомендации для проектирования ресурсосберегающих технологий и оборудования для изготовления коробчатых деталей и методику оценки стойкости пуансонов при холодном выдавливании коробчатых деталей;
- новые ресурсосберегающие технологические процессы и оборудование для изготовления коробчатых деталей и результаты их внедрения в промышленность;
- перспективные направления дальнейшего развития принципа локального формообразования эластичным инструментом, новые технологические процессы и специализированное энергосберегающее оборудование для изготовления изделий, не имеющих коробчатую форму и результаты их внедрения в промышленность.

НАУЧНУЮ НОВИЗНУ составляют следующие результаты:

- разработаны основные принципы локального формообразования низких коробчатых деталей эластичным рабочим инструментом и новые схемы оборудования;
- разработаны математические модели деформирования эластичного инструмента с учетом сил трения и выполнен расчет напряженно-деформированного состояния;
- проведен теоретический анализ процесса деформирования при обратном выдавливании коробчатых деталей и получены зависимости для расчета энергосиловых параметров, в том числе для различных условий трения между заготовкой и матрицей;
- проведенный экспериментальный анализ напряженно-деформированного состояния и влияния активного действия сил трения при обратном выдавливании коробчатых деталей позволил разработать новые способы управления течением металла в стенки коробок и конструкции штампов;
- разработаны рекомендации для проектирования ресурсосберегающих технологических процессов и оборудования для изготовления

коробчатых деталей и методика оценки стойкости пуансонов для холодного выдавливания;

- предложены перспективные направления использования принципа локальной обработки эластичным инструментом для изготовления изделий, не имеющих коробчатую форму.

ПРАКТИЧЕСКУЮ ЗНАЧИМОСТЬ работы составляют следующие результаты:

- создание на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований ресурсосберегающих технологий, новых способов и конструкций штампов для выдавливания коробчатых деталей, получивших внедрение в промышленности;
- создание на основе принципа локального формообразования коробчатых деталей новых видов ресурсосберегающего оборудования, получивших внедрение в промышленности;
- создание новых ресурсосберегающих технологий, использующих принципы локальной обработки эластичным инструментом для изготовления коробчатых деталей, внедренных в промышленности;
- определены перспективные направления дальнейшего развития технологии и оборудования локального формообразования эластичным инструментом, разработаны и внедрены в промышленности новые ресурсосберегающие технологические процессы и специализированное энергосберегающее оборудование для изготовления изделий, не имеющих коробчатую форму.
- экономический эффект - прибыль, полученная в результате внедрения новых технологий и оборудования в промышленности, составила более 2,2 миллиардов рублей в ценах на 31.12.95.

АПРОВАЦИЯ РАБОТЫ. Материалы работы были представлены на следующих конференциях и семинарах: Всесоюзной конференции "Повышение качества и эффективности изготовления технологической оснастки методами пластического деформирования". - Таллин, 1977; Научно-техническом семинаре "Использование сил трения при обработке металлов давлением". - Москва, 1980; Научно-техническом совещании-семинаре Минтяжмаша СССР "Состояние и пути повышения технического уровня изготовления листовых и профилированных заготовок". - Ташкент, 1980; Всесоюзной научно-технической конференции "Современные пути повышения производительности и точности металлообрабатывающего оборудования и автоматизация технологических процессов в машиностроении". - Москва, 1980; Научно-технической конференции "Научно-техническое творчество молодых ученых и специалистов". - Москва, 1981; Республиканском семинаре-совещании руководителей машиностроительных предприятий

"Малоотходная штамповка". - Ереван, 1981; Научно-техническом семинаре "Пути повышения эффективности холодноштамповочного производства". - Ленинград, 1987; Международной конференции "Восток - Запад. Инвестиции, конверсия, российские высокие технологии"//UNIDO - организация объединенных наций по промышленному развитию. - Санкт-Петербург - Новгород, 1994; Германо-Российском симпозиуме по возобновляемым источникам энергии. - Германия, Фрайбург, 1994; Международном конгрессе "Малая энергетика и инвестиции". - Москва, 1995; Научных семинарах кафедр МТ6 МГТУ им. Н.Э.Баумана и "Автоматизированные системы и модули обработки металлов давлением" МГТУ (СТАНКИН) (1977-1996).

Новые технологии, штампы и оборудование экспонировались на: ВДНХ СССР (1980, 1987, 1991); Второй всесоюзной выставке научно-технических и производственных кооперативов. - Ленинград, 1990; "ЭКСПО-91". - Болгария, Пловдив, 1991; "ЭКСПО-93". - Корея, Сеул, 1993; Лейпцигской весенней ярмарке. - Германия, Лейпциг, 1994; Международной выставке-ярмарке "Экология России". - Москва, ГВЦ, 1994 и были награждены дипломами и медалями.

Автор благодарит д.т.н., проф. Силанова В.И. и к.т.н. Гришину В.И. за полезное обсуждение численных методов исследования.

ПУБЛИКАЦИИ. По теме диссертации опубликовано 25 печатных работ, в том числе 10 авторских свидетельств и патентов.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, общих выводов и рекомендаций, списка литературы из 327 наименований и приложения, изложена на 270 страницах машинописного текста, содержит 171 рисунок и 19 таблиц. Общий объем работы 429 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

Во введении обоснована актуальность и сформулирована цель работы, изложена научная новизна, практическая значимость и результаты, выносимые на защиту.

В первом разделе дан обзор классификаций и теоретических методов исследования процессов выдавливания коробчатых деталей, изложены основные опубликованные результаты экспериментальных исследований, рассмотрены технологические процессы холодного выдавливания, особенности конструирования рабочего инструмента и выбора оборудования. Рассмотрены способы интенсификации процессов холодного выдавливания и состояние проблемы автоматизированного проектирования. Большой вклад в развитие теории и технологии процессов холодного выдавливания внесли отечественные и зарубежные

ученые М. В. Сторожев, А. Д. Томленов, Г. А. Смирнов-Аляев, В. Е. Фаворский, Г. А. Навроцкий, В. А. Головин, В. А. Евстратов, А. Г. Овчинников, Л. Г. Степанский, Е. Н. Ланской, А. М. Дмитриев, А. Э. Артеc, В. В. Евстифеев, В. П. Кузнецов, И. П. Ренне, Е. Н. Сосенушкин, Х. Кудо и многие другие.

В значительной мере широкое внедрение в промышленность технологических процессов изготовления коробчатых деталей методами листовой штамповки — гибкой, вытяжкой, формовкой и штамповкой эластичными средами осуществлено благодаря работам Е. А. Попова, В. П. Романовского, Л. А. Шофмана, А. Д. Томленова, В. Т. Мещерина, А. Д. Матвеева, С. П. Яковлева, Ю. М. Арышенского, М. И. Лысова, В. И. Ершова, Ф. В. Гречникова, Ю. А. Аверкиева, Е. И. Исаченкова, А. Д. Комарова, В. Д. Ходырева, И. А. Шаврова, А. Г. Рябинина, В. С. Мамутова, К. К. Мартенса, М. Н. Вирюкова, И. И. Берковича и многих других, которым удалось детально исследовать эти процессы и разработать практические рекомендации для их внедрения.

Рассмотрены вопросы локализации очага деформации при обработке листовых металлов на двухвалковых машинах с эластичным покрытием одного из валков, которые в последнее время получили широкое внедрение в промышленности благодаря работам И. М. Закирова, М. И. Лысова и их учеников.

Существующие классификаторы не позволяют учесть весь класс деталей коробчатой формы, так как большинство из них предназначено только для осесимметричных, а не коробчатых деталей, другие же классификаторы учитывают особенности коробчатых деталей, изготавливаемых только каким-либо определенным способом, например, вытяжкой из листовой заготовки. Поэтому нами был предложен классификатор коробчатых деталей, который, базируясь на соотношениях геометрических размеров коробок, и в первую очередь, на их относительную высоту, подразделяет коробки на низкие и высокие, далее коробки подразделяются по относительной толщине стенок и затем определяются возможные способы изготовления. Данный классификатор позволяет выбрать возможные варианты технологических процессов с учетом всех возможных способов изготовления обработкой давлением.

В результате анализа литературы было установлено, что в настоящее время в области листовой штамповки коробчатые детали классифицированы в отдельную группу и изучены достаточно полно, а в области холодной объемной штамповки накопленные теоретические и экспериментальные данные являются явно недостаточными для

рационального проектирования технологии. Поэтому в связи с развитием объемной холодной штамповки и новых методов локальной обработки, а также повышенными требованиями к ресурсо- и энергосбережению были установлены две малоисследованные и наиболее перспективные области изготовления коробок, требующие детального исследования: холодное обратное выдавливание и локальное формообразование эластичным инструментом.

Задачи работы.

- 1) Провести теоретический анализ процессов обратного выдавливания высоких коробчатых деталей (в том числе с активным действием сил трения) и получить недостающие для проведения технологических расчетов зависимости для определения энергосиловых параметров.
- 2) Теоретически исследовать процессы формоизменения эластичного инструмента при локальном формообразовании низких коробчатых деталей и получить данные, необходимые для рационального проектирования оборудования и технологических процессов.
- 3) Разработать методику проведения экспериментальных исследований и провести исследования напряженно-деформированного состояния процесса выдавливания высоких коробок, проверить достоверность полученных теоретических формул, исследовать возможности управления течением металла в стенки коробок.
- 5) Провести экспериментальные исследования процесса локального формообразования низких коробок эластичным инструментом, проверить достоверность полученных теоретических решений, определить границы применения данного способа деформирования и получить данные, необходимые для проектирования оборудования и технологии.
- 6) Разработать ресурсосберегающие технологические процессы и новые конструкции штампов для получения высоких коробчатых деталей методами холодного выдавливания.
- 7) Разработать основные принципы локального формообразования низких коробчатых деталей эластичным инструментом, новые схемы оборудования, новые ресурсосберегающие технологические процессы и энергосберегающее оборудование.
- 8) Внедрить новые технологические процессы, штампы и оборудование для холодной штамповки в производство, методы их проектирования - в конструкторскую практику и учебный процесс.
- 9) Определить перспективные направления дальнейшего развития принципа локального формообразования эластичным инструментом. Разработать новые технологические процессы и оборудование для

изготовления изделий, не имеющих коробчатую форму и внедрить их в промышленность.

Во втором разделе проведен теоретический анализ напряженно-деформированного состояния заготовок и рабочего инструмента для определения энерго-силовых параметров и технологических возможностей холодного формообразования коробчатых деталей.

Исследование процесса обратного выдавливания коробчатых деталей с плоским дном проведено инженерным методом для конечного момента деформирования. Очаг деформации разбит на зоны I, II, где зона II — зона развитых пластических деформаций прямоугольного участка с шириной a , а зона I — два радиусных участка, где имеют место также развитые пластические деформации. Формулы для определения напряжений на радиусных участках зоны I были получены нами в более ранних работах и σ_p при $p = r_s$ и $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ имеем:

$$\sigma_p = \frac{\sigma_s^* r_s^2}{r_s^2 - (r_s + H/2)^2} \quad (1)$$

здесь r_s — радиус пуансона в зоне перехода от дна к стенке коробки; H — толщина стенки и дна коробчатой детали. Распределение напряжений на прямолинейных участках примем согласно решению Прандтля для осадки полосы, которое после определения произвольной постоянной и преобразований примет вид:

$$\sigma_z = \sigma_s^* \left[\frac{\pi}{2} \frac{r_s^2}{r_s^2 - (r_s + H/2)^2} - 1 - \frac{a/2 - x}{H} \right] \quad (2)$$

Силу, необходимую для деформирования определяем по формуле:

$$P = P_1 + P_2 \quad (3)$$

Где P_1 — сила от двух радиусных участков I' с длиной a и от двух радиусных участков I с длиной f ; P_2 — сила от донного плоского участка II. Силами от четырех участков 3, связывающих радиусные участки I для коробок, удлиненных в плане, пренебрегаем. Разобьем плоский участок II на два треугольника (равнобедренных с углом при вершине 90°), примыкающим к коротким (в плане) сторонам коробки и две трапеции (по длинным сторонам коробки), учитывая, что гипотенуза треугольника равна a , а основание трапеции f получим для трапеций и треугольников выражения для σ_z :

$$\text{для трапеций} \quad \sigma_{z1} = \sigma_s^* \left[\frac{r_s^2}{r_s^2 - (r_s + H/2)^2} - 1 - \frac{a/2 - x}{H} \right]$$

$$\text{для треугольников} \quad \sigma_{z2} = \sigma_s^* \left[\frac{r_s^2}{r_s^2 - (r_s + H/2)^2} - 1 - \frac{f/2 - y}{H} \right]$$

Проводя интегрирование σ_{z1} по $dF_1 = [(f-a) + 2x] dx$ и σ_{z2}

по $dF_2 = [2\gamma - (f + \alpha)] d\gamma$ после преобразований определим значение P2, суммируем его с полученным в более ранних работах усилием P1 (с учетом сил трения $\tau = \mu \sigma_s^*$), после преобразований получим:

$$P = \sigma_s^* \left\{ 2(f + \alpha) \tau_B \left[\frac{\tau_B^2}{\tau_B^2 - (\tau_B + H/2)^2} - \frac{3}{2} \right] + \right. \\ \left. + f\alpha \left[\frac{\tau_B^2}{\tau_B^2 - (\tau_B + H/2)^2} \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{4H} + \frac{\alpha^2}{6fH} - 1 \right] \right\} \quad (4)$$

Для квадратных в плане коробок формула 4 после учета 4х участков в углах коробки будет иметь вид:

$$P = \sigma_s^* \left\{ 4\alpha \tau_B \left[\frac{\tau_B^2}{\tau_B^2 - (\tau_B + H/2)^2} - \frac{3}{2} \right] + \alpha^2 \left[\frac{\tau_B^2}{\tau_B^2 - (\tau_B + H/2)^2} \frac{\pi}{2} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{\alpha}{4H} + \frac{\alpha}{6H} - 1 \right] + \frac{4}{3} \pi \tau_B^2 \left[\frac{\tau_B^2}{\tau_B^2 - (\tau_B + H/2)^2} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{1}{3} \right) - 1 \right] \right\} \quad (5)$$

Для случая выдавливания коробок пуансоном с рабочим пояском 1 и с коэффициентом трения по пояску μ , формула 4 будет иметь следующий вид:

$$P = \sigma_s^* \left\{ 2(f + \alpha) \tau_B \left[\mu \left(\frac{2\tau_B^2}{\tau_B^2 - (\tau_B + H/2)^2} - 1 \right) - \left(1 + \right. \right. \right. \\ \left. \left. + 2\mu, \frac{\ell}{H} \right) \right] + f\alpha \left[\frac{2\mu \tau_B^2}{\tau_B^2 - (\tau_B + H/2)^2} \frac{\pi}{2} - \frac{\mu\alpha}{2H} + \frac{\mu\alpha^2}{3fH} - \right. \\ \left. \left. - \left(1 + 2\mu, \frac{\ell}{H} \right) \right] - 2(\alpha + f + \pi \tau_B) \mu, \ell \right\} \quad (6)$$

При расчетах процессов холодного выдавливания вместо σ_s^* надо положить σ_i , которое зависит от степени деформации ϵ_i и определяется по формулам: $-\rho\epsilon_i$;

$$\sigma_i = m - n\epsilon \quad ; \quad \text{или} \quad \sigma_i = A\epsilon_i^m$$

Для получения более полного представления об изменении энергосиловых параметров для разных стадий процесса выдавливания и оценки влияния на процесс активных сил трения было проведено исследование обратного выдавливания кобобчатых деталей энергетическим методом. Сначала была рассмотрена вторая стадия процесса - установившееся течение с постоянным очагом пластических деформаций под пуансоном. При этом приняты следующие допущения:

- материал заготовки жесткопластичный, изотропный, однородный и несжимаемый;

- прямоугольная область заготовки под пуансоном разделена на участки I и I', течение металла в которых осуществляется соответственно в направлении осей X и Y;

- весь объем заготовки разбит на зоны I, II, III, IV, I', II', III', пластические деформации сосредоточены в зонах I, I', II, II', а зоны III, III', IV - жесткие;

- компоненты деформации не зависят от координат, а компоненты перемещений в направлении осей являются линейными функциями их;
- угловые сдвиги отсутствуют;
- функции для перемещений терпят разрывы на границах различных участков заготовки, которые компенсируются введением работ сил среза на соответствующих границах;
- радиусы на торце пуансона приняты бесконечно малыми;
- работой, затрачиваемой на заполнение металлом угловых участков, ввиду большой длины коробочек и малой толщины стенок, пренебрегаем.

Расчетная схема второй стадии процесса представлена на рис.1.

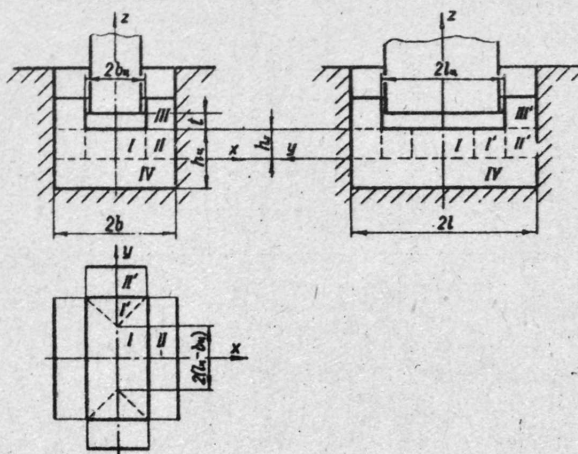


Рис.1. Схема к расчету процесса выдавливания коробчатых деталей (вторая стадия - установившееся течение).

Относительное удельное усилие на торце пуансона определим из условия равенства работ внешних и внутренних сил:

$$A_n = A_{тр.г} + A_{тр.в} + A_{ср.} + A_{вн.} \quad (7)$$

где A_n - работа нормальной составляющей деформирующей силы, приложенной к торцу пуансона;

$A_{тр.г}$ - работа сил трения по горизонтальным поверхностям;

$A_{тр.в}$ - работа сил трения по вертикальным поверхностям;

$A_{ср.}$ - работа сил среза на границах участков;

$A_{вн.}$ - работа внутренних сил.

Компоненты деформаций и перемещений для бесконечно малой осадки Δh на участках I и I' запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon = \varepsilon_{x1} = \varepsilon_{z1} = \Delta h / h_x; \quad u_{x1} = \varepsilon x \quad \text{при } 0 \leq y \leq \ell_4 - b_4; \\ u_{x1} = \varepsilon(x - y + \ell_4 - b_4) \quad \text{при } \ell_4 - b_4 \leq y \leq \ell_4; \quad u_{z1} = \varepsilon z; \quad y_{xz1} = 0; \\ \varepsilon = \varepsilon_{y1'} = \varepsilon_{z1'} = \Delta h / h_x; \quad u_{y1'} = \varepsilon(y - x - \ell_4 + b_4); \\ u_{z1'} = \varepsilon z; \quad y_{yz1'} = 0 \end{aligned}$$

на участках II и II' $\varepsilon_{x2} = -\varepsilon_{z2} = -\varepsilon'; \quad u_{x2} = \varepsilon'(\ell - x);$

$$u_{z2} = \varepsilon' z; \quad y_{xz2} = 0 \quad \text{где} \quad \varepsilon' = \frac{(2\ell_4 - b_4)b_4}{2\ell_4(\ell - b_4)} \varepsilon;$$

$$\varepsilon_{y2'} = -\varepsilon_{z2'} = -\varepsilon''; \quad u_{y2'} = \varepsilon''(\ell - y);$$

$$u_{z2'} = \varepsilon'' z; \quad y_{yz2'} = 0 \quad \text{где} \quad \varepsilon'' = \frac{b_4}{2(\ell - \ell_4)} \varepsilon$$

Интенсивность деформации сдвига для участков I и I' $\Gamma_1 = \Gamma_{1'} = 2\varepsilon$ а для участков II и II' $\Gamma_2 = 2\varepsilon', \quad \Gamma_{2'} = 2\varepsilon''$

Проведя интегрирование и просуммировав работы в правой части формулы 7 получим: $A_\Sigma = \sum_{i=1}^{16} A_i = 4\tau_s \Delta h \ell_4 b_4 \left\{ 4 + \sqrt{3} \psi \frac{\ell}{a} + \frac{b_4}{h_x} \left[\frac{\psi+1}{6} (3 - \lambda) + \frac{a}{b_4} \right] + \frac{1}{2} \frac{h_x}{a} \left(\psi + \frac{b}{b_4} + \frac{\ell}{\ell_4} - 1 \right) \right\}$

здесь $\lambda = b_4 / \ell_4$; a - толщина стенки коробки; $\psi = f(\mu)$.

Учитывая, что

$$A_\Sigma = P \Delta h = 4p \ell_4 b_4 \Delta h; \quad \tau_s = \frac{G\ell}{\sqrt{3}}; \quad \sigma_s'' = \frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}}$$

(где P - полная сила выдавливания, p - удельная сила, отнесенная к площади пуансона).

Получим формулу для определения удельных сил выдавливания для второй стадии процесса: $P_{II} = \sigma_s'' \left\{ 2 + \frac{\sqrt{3}}{2} \psi \frac{\ell}{a} + 0.5 \frac{b_4}{h_x} \left[\frac{\psi+1}{6} (3 - \lambda) + \frac{a}{b_4} \right] + \frac{h_x}{4a} \left(\psi + \frac{b}{b_4} + \frac{\ell}{\ell_4} - 1 \right) \right\}$

$$\quad \quad \quad (8)$$

Исходя из принципа минимума полной энергии деформации для жесткопластической среды ($\partial A_\Sigma / \partial h_x = 0$), определим величину распространения очага пластической деформации:

$$h_x = \sqrt{\frac{2a b_4 [(\psi+1)/6 (3-\lambda) + a/b_4]}{\psi + b/b_4 + \ell/\ell_4 - 1}} \quad (9)$$

Переход от второй стадии к третьей определяется условием $h_x = h_{nc}$, т. е. начинается деформация очага под пуансоном. При принятой схеме течения металла деформированное состояние для третьей стадии полностью определяется условием несжимаемости.

Определяя составляющие полной работы деформации для третьей стадии процесса по аналогии со второй стадией, только h_x заменится

на h_c (исключение составят работы сил среза на поверхности $z=0$, которые заменятся на работы сил трения), получим формулу для определения удельных сил выдавливания для третьей стадии процесса:

$$P_{III} = \sigma_s^* \left\{ 2 + \frac{\sqrt{3}}{2} \psi \frac{t}{a} + \frac{b_y}{2h_y} \left[\frac{\psi}{3} (3-\lambda) + \frac{a(1+\psi)}{2b_y} \right] + \frac{h_y}{4a} \left(\psi + \frac{b}{b_y} + \frac{e}{e_y} - 1 \right) \right\} \quad (10)$$

Рассмотрим процесс обратного выдавливания короччатых деталей с активным действием сил трения. Особо интересен случай, когда активные силы трения приложены только по коротким сторонам коробки. Это приводит к изменению формообразования и дает возможность управления процессом течения металла в стенки.

При принудительном движении коротких стенок матрицы в сторону течения металла направление сил трения на боковой поверхности заготовки совпадает с направлением течения металла, т. е. силы трения меняют знак. В общем случае, когда скорость матрицы совпадает со скоростью металла, имеющего координату $z=hm$, на части участка боковой поверхности будут действовать активные силы трения F_a , а на другой части участка — силы трения сопротивления F_c .

Величины всех работ определяются в данном случае аналогично обычному выдавливанию за исключением работ сил трения по вертикальным поверхностям $y = \pm e$ и работ сил трения по поверхности контакта зоны III' с калибрующим пояском пуансона и матрицей, величина которых в рассматриваемом случае будет иной.

Обозначив $V_m/V_{мет} = h_m/h'x = V_{оп} = \alpha$ — коэффициент опережения (где V_m — скорость подъема матрицы, $V_{мет}$ — скорость истечения металла в стенку), после определения новых выражений работ и преобразований получим следующую формулу для удельных сил (вторая стадия):

$$P_{II}' = \sigma_s^* \left\{ 2 + \frac{\sqrt{3}}{4} \psi \frac{t}{a} (2 - \lambda \alpha) + \frac{b_y}{2h_x'} \left[\frac{\psi+1}{6} (3-\lambda) + \frac{\alpha}{b_y} \right] + \frac{h_x'}{4a} \left[\frac{b}{b_y} + \frac{e}{e_y} + \psi(1 - \lambda \alpha^2) - 1 \right] \right\} \quad (11)$$

Величина распространения очага пластической деформации будет несколько иной, чем при обычном выдавливании:

$$h_x' = \sqrt{\frac{2\alpha b_y \left[\frac{\psi+1}{6} (3-\lambda) + \frac{\alpha}{b_y} \right]}{\psi(1 - \lambda \alpha^2) + \frac{b}{b_y} + \frac{e}{e_y} - 1}} \quad (12)$$

Проделав соответствующие вычисления, аналогичные указанным ранее, получим формулу для определения удельных сил для третьей стадии выдавливания:

$$P_{III}' = \sigma_s^* \left\{ 2 + \frac{\sqrt{3}}{4} \psi \frac{t}{a} (2 - \lambda \alpha) + 0,5 \frac{b_4}{h_4} \left[\frac{\psi}{3} (3 - \lambda) + \frac{\alpha(1 + \psi)}{2 b_4} \right] + \frac{h_4}{4 \alpha} \left[\psi (1 - \lambda \alpha^2) + \frac{b}{b_4} + \frac{e}{e_4} - 1 \right] \right\} \quad (13)$$

Еще больше снижение удельных сил произойдет, если приложить активные силы трения по всему периметру коробочки. В этом случае дополнительно к рассмотренным ранее работам иначе определяются работы сил трения по вертикальным поверхностям $X = \pm b$ и работа сил трения по поверхности рабочего пояса пуансона и матрицы в зоне III. Проделав соответствующие вычисления получим:

$$P_{II}'' = \sigma_s^* \left\{ 2 + \frac{\sqrt{3}}{2} \psi \frac{t}{a} (1 - \alpha) + \frac{b_4}{2 h_x} \left[\frac{\psi + 1}{6} (3 - \lambda) + \frac{\alpha}{b_4} \right] + \frac{h_x''}{4 \alpha} \left[\psi (1 - 2 \alpha^2) + \frac{b}{b_4} + \frac{e}{e_4} - 1 \right] \right\} \quad (14)$$

$$h_x'' = \sqrt{\frac{2 \alpha b_4 \left[\frac{\psi + 1}{6} (3 - \lambda) + \frac{\alpha}{b_4} \right]}{\psi (1 - 2 \alpha^2) + b/b_4 + e/e_4 - 1}} \quad (15)$$

$$P_{III}'' = \sigma_s^* \left\{ 2 + \frac{\sqrt{3}}{2} \psi \frac{t}{a} (1 - \alpha) + \frac{b_4}{2 h_4} \left[\frac{\psi}{3} (3 - \lambda) + \frac{\alpha(1 + \psi)}{2 b_4} \right] + \frac{h_4}{4 \alpha} \left[\psi (1 - 2 \alpha^2) + b/b_4 + e/e_4 - 1 \right] \right\} \quad (16)$$

В некоторых случаях при выдавливании с активными силами трения используется гладкий (без калибрующего пояса) пуансон. Для этого случая получены формулы: $P_{II}''' = \sigma_s^* \left\{ 2 + 0,108 \psi (H_p / \alpha^2) b_1 + \frac{b_4}{2 h_x''} \left[\frac{\psi + 1}{6} (3 - \lambda) + \frac{\alpha}{b_4} \right] + \frac{h_x''^2}{\alpha} \left[\psi (1 - \lambda \alpha^2) + b/b_4 + e/e_4 - 1 \right] \right\}$ (17)

$$P_{III}''' = \sigma_s^* \left\{ 2 + 0,108 \frac{H_p}{\alpha^2} \psi b_1 + 0,5 \frac{b_4}{h_4} \left[\frac{\psi}{3} (3 - \lambda) + \frac{(1 + \psi) \alpha}{2 b_4} \right] + 0,25 \frac{h_4}{\alpha} \left[\psi (1 - \lambda \alpha^2) + b/b_4 + e/e_4 - 1 \right] \right\} \quad (18)$$

где H_p - величина рабочего хода пуансона,

$$b_1 = 2 \alpha (2 - \lambda) + (2 - \lambda)^2 b_4 + \lambda (2 \alpha + b_4) (1 - \alpha)$$

Нужно отметить, что при принятых допущениях уравнения (11-18) действительны в пределах $0 \leq \alpha \leq 1$ и максимальная скорость движения матрицы, вызывающая снижение деформирующих сил, равна скорости истечения металла на выходе в стенку изделия.

В результате проведенных теоретических исследований получены аналитические зависимости (достоверность которых подтверждена экспериментом в разделе 3), позволяющие определять силы деформирования на любой стадии процесса выдавливания, в том числе в условиях действия активных сил трения.

Анализ напряженно-деформированного состояния эластичного инструмента для локального формообразования низких коробчатых деталей выполнен методом конечных элементов (МКЭ) с использованием специального комплекса программ ФИТИНГ-1, разработанного в ЦАГИ. При этом решалась контактная задача и рассмотрено несколько схем нагружения. Первая расчетная схема содержала: жесткий вал 1, диаметром 110 мм и длиной 700 мм, изготовленный из стали 30ХГСА с модулем упругости $E=210000$ н/мм² и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,25$; эластичная оболочка вала 2, диаметром 200 мм и длиной 570 мм изготовлена из полиуретана СКУ-7Л или СКУ-ПФЛ; вал с эластичной оболочкой прижимается силой P к жесткой плите матрицы 3, изготовленной из стали 30 с модулем упругости $E=200000$ н/мм² и $\nu = 0,25$. Решалась задача определения напряженно-деформированного состояния эластичной оболочки при ее пошаговом нагружении (т. е. при пошаговом перемещении вала на величину ΔH вниз по оси Y), а также определялись нормальные напряжения σ_y , действующие в зоне контакта эластичной оболочки с матрицей.

При этом вводилось предположение, что в оболочке вала и матрице как при прямом нагружении, так и при снятии нагрузки действует закон Гука, и остаточные деформации малы. Предположим также, что деформации в направлении оси вала Z отсутствуют, а напряжения не зависят от координаты Z , т. е. рассматриваем задачу плоского деформированного состояния.

СКП ФИТИНГ-1 позволил создать дискретную модель конструкции и получить значения величин зон контакта и напряженно-деформированного состояния во взаимодействующих телах на основе гипотезы малых перемещений. Однако полиуретановая оболочка при нагружении деформируется весьма существенно (до 30%), поэтому для решения задачи больших деформаций и перемещений используется дискретный подход. При этом общее максимальное смещение вала разбивается на ряд интервалов ($\Delta H = 1$ мм). На первой итерации задается этот малый интервал смещения вала, определяются компоненты напряженно-деформированного состояния, величины зоны контакта и форма оболочки. На последующих итерациях форма деталей

конструкции редактируется с помощью средств препроцессора ФИТИНГ, т. е. начальные условия задаются с учетом предыдущего нагружения.

Математическая модель конструкции содержала три подконструкции, моделирующих: матрицу — подконструкция 1, эластичную оболочку — подконструкция 2 и жесткий вал — подконструкция 3. Зоны контакта задавались контактными парами, которые определялись в процессе расчета. Все подконструкции состояли из треугольных конечных элементов с линейным законом перемещений. Из четырех треугольных элементов составлялись четырехугольные элементы. По условиям симметрии рассматривалась правая половина конструкции со следующими кинематическими граничными условиями: при $x=0$ $U=0$, при $y=-50$ мм $V=0$, здесь U и V — соответственно перемещения в направлении осей OX и OY (в плоскости, перпендикулярной оси вала Z); толщина матрицы равна 50 мм; трение отсутствует.

Результаты расчета силовых параметров (P — сила на валу) и величины пятна контакта A для полиуретана СКУ-7Л и СКУ-ПФЛ представлены в таблице 1.

Таблица 1.

ΔH мм	ξ	СКУ-7Л		СКУ-ПФЛ	
		P кН	A мм	P кН	A мм
4	0,09	37,8	28,5	41,15	27,1
8	0,18	107,6	50,9	127,8	49,0
12	0,27	216,2	67,5	240,8	66,2
14	0,31	269,8	75,0	305,8	73,5

В результате расчета были построены: картины распределения полей напряжений σ_y в эластичной оболочке; эпюры распределения нормальных напряжений на контактных поверхностях и деформированное состояние эластичной оболочки из полиуретанов марки СКУ-7Л и СКУ-ПФЛ для степеней деформации оболочки от $\xi = 0,09$ до $\xi = 0,31$.

Полученные значения напряжений σ_y и их распределение по пятну контакта хорошо согласуются с данными эксперимента, однако величины напряжений и усилий, полученные расчетом, несколько меньше (при степенях деформации $\xi > 0,2$), полученных экспериментально, и, наоборот, величина пятна контакта, полученная расчетом, несколько больше действительной, замеренной в эксперименте. Все это объяснялось тем обстоятельством, что в расчетной схеме трение не учитывалось.

Для повышения точности расчета было учтено трение между эластичной оболочкой и жестким валом и между эластичной оболочкой и матрицей. Оценка влияния сил контактного трения проводилась по методике, предложенной И.И. Берковичем. Удельная сила трения определялась по формуле:

$$\tau = \tau_0 + \mu \sigma_y \quad (19)$$

(где величины τ_0 и μ определялись в зависимости от марки полиуретана и марки контактирующего с ним металла).

Для полиуретана СКУ-7Л эти величины были равны $\tau_0 = 2$ МПа и $\mu = 0,1$, а для СКУ-ПФЛ — соответственно $\tau_0 = 3,6$ МПа и $\mu = 0,16$.

По определенным по формуле 19 удельным силам трения определялись силы трения на контактных поверхностях, которые добавлялись к вектору внешних сил конструкции.

В таблице 2 представлены результаты расчета силовых параметров (Р) и величины пятна контакта А для эластичной оболочки из полиуретанов СКУ-7Л и СКУ-ПФЛ с учетом сил трения.

Таблица 2.

ΔH мм	ϵ_1	СКУ-7Л		СКУ-ПФЛ	
		Р кН	А мм	Р кН	А мм
4	0,09	37,5	27,6	40,6	26,4
8	0,18	106,3	50,1	120,2	48,6
12	0,27	222,4	66,6	242,7	65,5
14	0,31	287,6	74,2	316,7	73,2

Как видно из сравнения данных таблиц 1 и 2, трение при малых степенях деформации (при $\epsilon < 0,2$) не оказывает существенного влияния на силовые параметры процесса деформирования оболочки, а при увеличении $\epsilon > 0,2$ усилие Р возрастает более интенсивно, чем при расчете без трения. Во всех случаях учет трения приводил к некоторому уменьшению ширины пятна контакта А, хотя и не очень значительному (до 1 мм). При этом результаты расчета достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными, приведенными в разделе 3 диссертационной работы. С учетом сил трения были определены: поля напряжений σ_y в эластичной оболочке; эпюры распределения нормальных напряжений на контактных поверхностях при степенях деформации $\epsilon = 0,09 \dots 0,31$ для оболочек из СКУ-7Л и СКУ-ПФЛ. Следует отметить, что уточнение математической модели за счет учета сил трения позволило получить результаты, которые хорошо согласуются с данными эксперимента не только по силовым

параметрам (силам на валу), но и по характеру распределения нормальных напряжений по поверхности матрицы (напряжения σ_y), которые не просто растут в определенной зоне контакта с увеличением деформации оболочки вала, но и меняют характер распределения, увеличивая с увеличением степени деформации зону приложения максимальных напряжений.

На рис. 2 представлена расчетная схема 2.

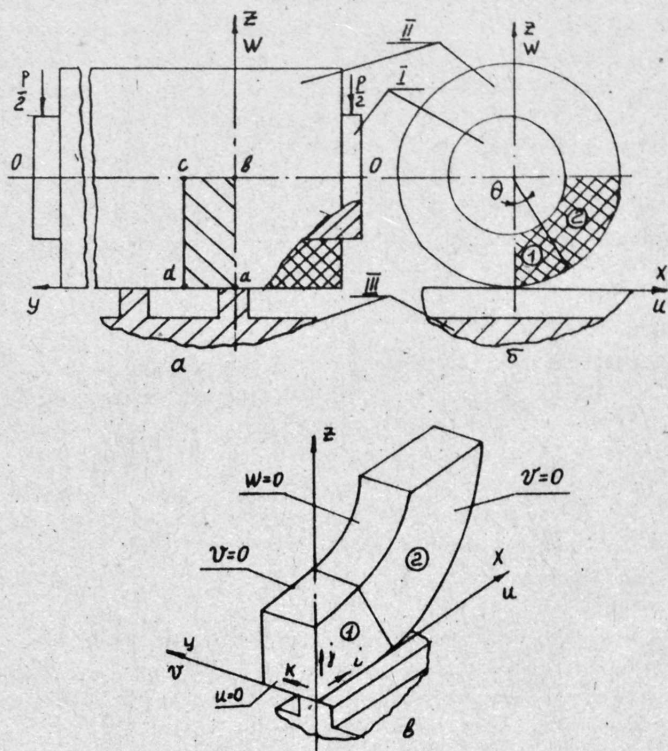


Рис. 2. Схема к расчету напряженно-деформированного состояния эластичной оболочки вала при ее контакте с рабочими рельефными матрицами (объемная модель): а, б- схема нагружения (I- жесткий вал, II- эластичная оболочка, III- матрица); в- схема расчетной модели (1,2-подконструкции).

Расчетная схема 2 была составлена для решения объемной задачи по определению напряженно-деформированного состояния эластичной оболочки вала при ее контакте с рабочими рельефными матрицами с разной шириной полости B_p , так как при проектировании технологического процесса необходимо знать не только распределение нормальных напряжений на контактных поверхностях, но и параметры деформированного состояния эластичной оболочки, которые будут определять граничные условия (по максимально возможному формоизменению) технологического процесса для конкретной рабочей поверхности матрицы. Рассмотрена задача вдавливания эластичной оболочки в рабочие матрицы формовки теплоприемных и теплообменных панелей. Схема нагружения показана на рис.2а. Выделяли из эластичной оболочки элемент $abcd$, ограниченный радиусом $R_n=200$ мм, $R_{вн}=110$ мм и размером $ad=0,5(B_g+B_p)$ — здесь B_g — ширина гребня матрицы, B_p — ширина полости матрицы ($B_g=6$ и 5 мм и $B_p=11,5$ и 21 мм — соответственно для 1-го и 2-го вариантов матриц) и рассматривали только нижнюю часть эластичной оболочки (ниже оси $O-O$ вала), расположенную между серединами гребня и полости матрицы и занимающую первый октант системы координат XYZ (двойная штриховка на рис.2б).

Была рассмотрена объемная модель, схема которой представлена на рис.2в. Модель содержит 2 подконструкции, первая из которых содержит 504 узла. ($i=9, j=8, k=7$, здесь i, j, k — количество сечений модели по осям X, Y, Z), вторая 392 узла ($i=7, j=8, k=7$). Таким образом, расчетное поле оболочки разбивалось на ряд шестигранных призматических элементов, заполненных тетраэдрами с линейной аппроксимацией перемещений. Каждый узел содержит три неизвестных перемещения U, V, W . Общее количество неизвестных перемещений — 2600.

При моделировании контактного взаимодействия между эластичной оболочкой и жестким выступом матрицы было положено, что абсолютно жесткий выступ матрицы внедряется в эластичную оболочку на величину заданного перемещения $W=W_0$ ($W_0=4, 6, 8, 10, 12, 14$ мм). После получения решения на каждом шаге приводили анализ напряженно-деформированного состояния в зоне контакта оболочки с выступом матрицы. В случае проникновения оболочки за границу жесткой матрицы узлы, попадающие в эту зону, принудительно выводились на поверхность матрицы и процесс счета повторялся до выполнения условия непроникновения оболочки в матрицу.

В таблице 3 представлены значения максимальных величин внедрения эластичной оболочки в полости матрицы W (в центре полости), значения максимальных нормальных напряжений, действующих на поверхности выступа (в точке с координатами $x=0$; $y=0,125$ (мм); $z=0$), и размеры зоны контакта A (мм).

Таблица 3.

Смещение ΔH_i (мм)	Вариант 1			Вариант 2		
	W мм	Сигма МПа	A мм	W мм	Сигма МПа	A мм
6	2,22	-8,0	63	3,55	-9,33	64
10	3,75	-10,8	82	6,0	-13,2	84
12	4,39	-11,8	88	7,09	-14,7	91
14	5,04	-13,0	97	8,19	-16,5	99

Полученные расчетные результаты достаточно хорошо совпадают с экспериментально полученными данными в рабочем диапазоне степеней деформации $\epsilon = 0,15 \dots 0,3$, хотя и наблюдается устойчивая тенденция превышения (до 1 мм) максимальных величин внедрения эластичной оболочки в полости матрицы, полученных экспериментально. Таким образом, используя методику расчета, изложенную в этом разделе, и СКП ФИТИНГ-1, можно с достаточной степенью точности определять максимальные величины внедрения эластичной оболочки вала в полости матрицы, которые будут определять границы возможной деформации листовых заготовок.

В третьем разделе изложена методика проведения экспериментов: общие положения, планирование лабораторных экспериментов, порядок проведения, обработка результатов, выбор материалов, описание конструкций и измерительных устройств. На первом этапе было проведено исследование процессов обратного выдавливания коробчатых деталей.

Исследование деформированного состояния при обратном выдавливании изделий коробчатой формы проводилось с целью экспериментального определения параметров деформированного состояния и установления очагов пластической деформации для разных степеней деформации, исполнения перехода от дна к стенке, на разных стадиях выдавливания, а также сравнения с принятыми предположениями об очаге в теоретической части работы. Экспериментальный штамп имел набор матриц с радиусами перехода от

дна к стенке $R = 5$ мм и 10 мм и матрицу с $R = 0$. Штамп имел набор пуансонов с различными размерами и радиусами скругления, позволяющими варьировать степени деформации при выдавливании от $\varepsilon = 0,5$ до $\varepsilon = 0,9$, и получать коробки с толщинами стенок от 7 до 2 мм. Образцы изготавливались из свинца С-1 и алюминия АД-1. Для исследования деформированного состояния мы применяли координатную сетку с квадратными ячейками на прямолинейных участках дна под пуансоном и радиальную — на радиусных участках дна. Это давало возможность непосредственно визуальным наблюдением устанавливать характер течения металла и наличие застойных зон и проводить сравнения с теоретическими положениями.

Изучая очаг пластической деформации (при $\varepsilon > 0,6$ в конце рабочего хода), было установлено, что он распространяется на всю подпуансонную и радиусную области, а застойные зоны практически отсутствуют. Центральная часть подпуансонной области соответствует осадке полосы, а радиусная часть перехода от дна к стенке — выдавливанию коробок с цилиндрическим дном, т. е. картина деформированного состояния очень хорошо согласуется с теоретическим очагом, состоящим из двух зон — центральной и радиусной (их также две). Нами была предложена методика машинной обработки деформированной координатной сетки, составлен алгоритм и программа расчета деформированного состояния. В результате получены картины распределения деформаций и интенсивностей деформаций по вертикальной (Z) оси симметрии образца и по горизонтальной (X) координате. Было установлено (для второй стадии), что по мере удаления от оси симметрии образца Z деформации ε_x меняют знак и при приближении к выходу очага в стенку коробки резко увеличиваются. Непосредственно под пуансоном деформации малы и резко возрастают лишь в области интенсивного течения металла в стенку коробки. Распределение осевых деформаций характеризуется наличием во всей подпуансонной зоне очага деформации сжимающих осевых деформаций ε_z , которые в зоне перехода в стенку резко возрастают и меняют знак на противоположный, то есть становятся растягивающими. Интенсивности деформаций непосредственно под пуансоном весьма незначительны, что говорит о наличии в этой области "застойной" зоны, а по мере приближения к стенке коробки наблюдается резкий рост ε_z , особенно в областях, непосредственно примыкающих к пуансону. Это говорит о наличии здесь области, опасной с точки зрения разрушения. Полученные картины распределения деформаций являются

характерными при выдавливании коробчатых изделий со смазкой для степеней деформации $0,6 \leq \epsilon \leq 0,9$.

При рассмотрении картины течения металла по выявленной макроструктуре на коробчатых образцах из алюминия АД-1 можно увидеть, что при малых степенях деформации $\epsilon \leq 0,5$ в начальной стадии процесса имеет место ярко выраженная застойная зона под торцем пуансона, а очаг деформации распространяется на значительную глубину. Причем наибольшую деформацию получают участки, примыкающие к радиусным частям пуансона. В конечной стадии выдавливания (для той же степени деформации) можно наблюдать хорошо сохранившуюся застойную зону под торцем пуансона при распространении очага пластических деформаций уже на всю подпуансонную область. При рассмотрении картины течения металла в начальной стадии обратного выдавливания коробочек с $\epsilon = 0,85$ можно увидеть, что и при таких степенях деформации в начальной стадии процесса имеет место застойная зона под торцем пуансона, однако размеры ее значительно меньше, чем при меньших степенях деформации, конечный же момент выдавливания характерен полным отсутствием застойных зон, т. е. весь объем металла в подпуансонной области охвачен пластической деформацией.

Таким образом, принятое теоретическое предположение о течении металла в конечный момент выдавливания в очаге пластических деформаций достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными, особенно для степеней деформации $\epsilon > 0,6$.

Для определения характера течения металла в плоской подпуансонной области нами были продеформированы слоистые образцы, состоящие из двух и трех слоев с нанесенной на места контакта слоев координатной сеткой. При выдавливании слоистых образцов получена картина течения металла по всей высоте образца, причем в верхнем подпуансонном 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.

Исследование напряженного состояния проводилось с целью определения удельных сил на контактных поверхностях рабочего инструмента (матрицы) и сравнения экспериментальных значений с теоретическими. Материалом для образцов был выбран свинец С-1.

Для проведения экспериментов использовался тот же штамп, что и при исследовании деформированного состояния, матрица которого имела четыре датчика (для матрицы с радиусом), или три датчика (для матриц без радиуса) для замера удельных сил на поверхности. Таким образом мы получали возможность определять нормальные напряжения, действующие на контактной поверхности матрицы. Кроме датчиков штамп был снабжен мессдозой, измеряющей силу выдавливания и ходографом, измеряющим перемещение. Сигналы от всех датчиков поступали на усилитель, а затем на осциллограф, где фиксировались на бумаге.

Полученные экспериментальные значения величин удельных сил на поверхности матрицы для конечной стадии выдавливания приведены в таблице 4, где представлены также полученные расчетом по теоретическим формулам значения удельных сил (H — толщина стенки).

Таблица 4.

Нмм	q [МПа]	q_1	q_2	q_3
7	экспер.	89	54	80
7	теор.	68	34	68
5	экспер.	188	119	164
5	теор.	199	110	199

Из таблицы 4 видно, что экспериментально полученные значения удельных сил согласуются с теоретическими, причем наибольшее расхождение мы получаем для толстостенных коробочек, что объясняется влиянием застойной зоны под торцом пуансона, которую мы не учитывали в теоретических расчетах и которая отсутствует в конечной стадии деформирования при выдавливании коробок с $\xi > 0,6$.

Исследование влияния активного действия сил трения на процесс было проведено на образцах с размерами 20×50 мм ($B \times L$) 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 $V_{оп} = V_m/V_{мет} = 0$; 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 удельных деформирующих

сил; 2 - исследовалось влияние различных факторов (в том числе активных сил трения) на величину неравномерности стенок по высоте $y = (y_L - y_E)/y_E$ (где y_L - средняя высота стенок по длинным сторонам, а y_E - соответственно по коротким сторонам коробочки). Были построены зависимости удельных сил q от рабочего хода H_p для различных условий выдавливания и скорости опережения V_{op} , а также получены зависимости изменения удельных сил выдавливания от скорости опережения V_{op} . Наибольший эффект снижения удельных сил получается при максимальных степенях деформации и скорости опережения $V_{op} = 1,9$ (увеличение скорости $V_{op} > 2$ приводит к образованию надрывов и утяжин на поверхности заготовок), а снижение удельных сил при выдавливании коробок из АД-1 со смазкой составляет в этом случае (22 - 34%). При свободной матрице снижение удельных сил составляет 5 - 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, рабочего хода, коэффициента трения) и 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 напряжения текучести, степени деформации, скорости опережения, рабочего хода, коэффициента трения). По полученным функциям был сделан расчет и проведены дополнительные проверочные 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 удельных деформирующих сил, но и выявлена возможность управления течением металла в стенки коробочек изменением скорости подъема подвижных стенок матрицы и получения не только ровного по высоте торца, но и высоты стенок по коротким сторонам коробчатых деталей, большей, чем по длинным ее сторонам. По результатам исследований были созданы новые способы и штампы, признанные изобретениями.

Проведено исследование процесса обратного выдавливания коробчатых деталей с переменной по периметру толщиной стенок и

исследован метод выдавливания таких коробок, заключающийся в том, что по наружной поверхности тонкой стенки изделия, то есть в местах затрудненного течения металла, создаются активно действующие силы трения, направление которых совпадает с направлением течения металла в этих зонах. В результате установлено, что при приложении активного действия сил трения по наружной поверхности тонкой стенки коробки уже при коэффициентах опережения $V_{op} = 1,2$ удается получить качественные образцы с толщиной тонкой стенки $St = 0,3$ мм (для свинца С-1); $St = 0,4$ мм (для АД-1) и $St = 0,8$ мм (для меди М-1) при толщине остальных стенок $S=4$ мм.

Были проведены исследования локального формообразования низких коробчатых деталей эластичным инструментом, причем предварительно исследовались эластичные оболочки из разных марок полиуретана, в результате чего рекомендовано для обработки заготовок из пластичных металлов и сплавов с низким сопротивлением деформированию типа АМ, АД, АМГм и т. п. применять полиуретан марки СКУ-7Д, а при обработке заготовок из 12Х18Н10Т, ВТ1-0 и т. п. материалов применять полиуретан марки СКУ-ПФЛ и установлена оптимальная толщина оболочки $H = 40 \dots 50$ мм для жесткого вала диаметром $100 \dots 140$ (мм).

В процессе проведения экспериментов замерялись силы P_i , необходимые для деформирования эластичной оболочки на величину ΔH_i (по величинам осадки крешеров, подкладываемых между двумя плитками в узел вертикального перемещения вала), определялась площадь пятна контакта A эластичной оболочки с матрицей (без рельефа на поверхности) с помощью копировальной бумаги.

По результатам экспериментов строились кривые зависимости: сил на валу P от величины перемещения ΔH ; перемещения ΔH от A и зависимости изменения средних нормальных напряжений, действующих на плоскости пятна контакта эластичной оболочки с матрицей от величины относительной степени деформации эластичной оболочки ε , которые сравнивались с данными, полученными в теоретической части работы, и были положены в основу рекомендаций по проектированию технологии и оборудования для локального формообразования низких коробчатых деталей. Результаты теоретического расчета с использованием комплекса программ ФИТИНГ-1 отличаются от экспериментальных данных не более чем на 10-15%, что дает возможность рекомендовать предложенную в разделе 2 методику для практических расчетов.

При анализе пятен контакта (отпечатки копировальной бумаги на белой бумаге, которые подкладывались между эластичной оболочкой вала и матрицей) была отмечена интересная особенность. При определенных степенях деформации пятно контакта начинает делиться на 2 области (по ширине). Первая область характеризуется низкой насыщенностью цвета отпечатка и находится в его центре. Вторая область находится у краев отпечатка и характеризуется гораздо большей насыщенностью цвета. Было проверено и подтверждено предположение, что величина отпечатка и степень его цветовой насыщенности зависят только от нормального давления в зоне контакта до значений $\varepsilon \leq 0,29$. Последнее обстоятельство было использовано для определения величин напряжений, действующих на плоскости контакта полиуретановой оболочки с матрицей.

Для получения эталонных отпечатков были использованы контактные точечные мессдозы в блоке матрицы, которые применялись ранее для определения нормальных давлений при выдавливании высоких коробок. Для этого из полиуретана марок СКУ-7Л и СКУ-ПФЛ вырезались прямоугольные образцы с размерами $40 \times 20 \times 100$ мм, которые укладывались в матрицу таким образом, чтобы между полиуретаном и контактным датчиком находилась копировальная бумага и слой белой бумаги. Производилось нагружение полиуретана на испытательной машине УИМ-30. При этом на осциллографе замерялось отклонение луча, соответствующее удельной нагрузке на датчик 4, 6, 8, 10, 12 МПа. Таким образом были получены эталонные отпечатки, которые соответствовали определенным удельным силам.

Для количественной оценки величин интенсивности цветовой насыщенности отпечатков использовали показатель поглощения A_s , который определяли замером накладным фотометром ФМ-59.

Используя эталонные отпечатки и результаты замера отпечатков, полученных при нагружении вала с полиуретановыми оболочками из СКУ-7Л и СКУ-ПФЛ, были определены значения напряжений σ_y на контактных поверхностях и установлено, что с увеличением степени деформации эластичной оболочки увеличивается пятно контакта и одновременно с этим увеличивается периферийная зона, где действуют максимальные напряжения σ_y . Причем характер кривых, полученных для оболочек из полиуретана СКУ-ПФЛ, подобен кривым, полученным для оболочек из полиуретана СКУ-7Л при несколько большем напряжении σ_y (превышает σ_y оболочки из СКУ-7Л на 1...1,5 МПа) и меньшей ширине пятна контакта. Характер теоретических кривых, полученных расчетом на ЭВМ с использованием СКП ФИТИНГ-1, хорошо

соответствует экспериментальным данным как по размеру самого пятна контакта, так и по размерам зон минимальных (центральных) напряжений σ_y .

Экспериментальное определение возможностей формообразования эластичным инструментом проводилось на следующих металлах: А5М ($S = 0,8 \dots 1,0$ мм); А1 сплав 1105 ($S = 0,8$ мм); Амц ($S = 0,33$ мм); 12Х18Н10Т ($S = 0,3 \dots 0,5$ мм); ВТ1-0 ($S = 0,3$ мм).

На первом этапе проводили эксперименты при неподвижном столе на матрицах двух типов с продольным расположением каналов. Заготовки в виде карточек с размерами 200×300 мм укладывали на матрицу и проводили нагружение вала, задавая последовательно перемещения $\Delta H = 4; 6; 8; 10; 12; 14$ мм. После каждого нагружения замерялась максимальная глубина отформованной в заготовке полости в центре заготовки. Были построены зависимости изменения максимальной глубины отформованной полости от величины деформации эластичной оболочки вала ΔH . В матрице с шириной полости $B = 11,5$ мм оказалось невозможным получить сколь-нибудь значимую глубину полости на титане ВТ1-0 и нержавеющей стали с толщиной $S = 0,5$ мм, а в матрице с шириной полости $B = 21$ мм удалось провести деформирование даже титана ВТ1-0.

При проведении деформирования со скоростью перемещения стола 1м/мин полноразмерных панелей удалось установить, что перемещение стола и деформирование заготовки вращающейся эластичной оболочкой вала приводит к некоторому увеличению глубины отформованной полости, причем при малых деформациях эластичной оболочки (с $\Delta H \leq 8$ мм) глубина полости в заготовке при статическом и динамическом нагружении отличается не более чем на 3...5%, а при больших степенях деформации ($\Delta H \geq 10$ мм) это расхождение увеличивается до 12% (при $\Delta H \geq 12$ мм).

Таким образом было установлено, что по сравнению со статической схемой нагружения при деформировании заготовки вращающимся валом с эластичной оболочкой значения напряжений увеличиваются на 10...15% в области начала деформирования, причем эту особенность изменения напряжений по ширине пятна контакта описывал в своих работах В.Л. Бидерман, который исследовал процесс качения автомобильных шин. Учитывая вышеизложенное, а также и то обстоятельство, что при динамическом нагружении не происходит заметного увеличения сил на валу (рост составляет не более 3...5%, что вписывается в поле допуска доверительного интервала эксперимента) по сравнению со статическим нагружением, можно

предположить, что рост нормальных напряжений происходит за счет изменения формы эпюры напряжений.

В четвертом разделе изложены разработанные на основании результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований рекомендации по проектированию ресурсосберегающих технологических процессов, новые конструкции штампов и оборудования для изготовления коробчатых деталей и рассмотрены результаты внедрения предложенных разработок в промышленность.

Разработанные ресурсосберегающие технологические процессы холодного выдавливания коробчатых деталей типа "Экран", "Корпус", "Гильза" и новые конструкции штампов позволили уменьшить расходы металла на 7...10% за счет уменьшения неравномерности верхнего торца коробок (уменьшения припуска на его обрезку) и применения рациональной заготовки. Разработана методика оценки стойкости пуансонов (по условию малоциклового прочност) для холодного выдавливания коробчатых деталей. Разработанные ресурсо- и энергосберегающие технологические процессы изготовления низких коробчатых деталей типа стеновых и потолочных панелей из Al сплавов, позволяют в несколько раз уменьшить затраты на изготовление штампов, сократить в 2-3 раза потребление штамповых сталей и снизить на порядок потребление энергии. Разработанные новые технологические процессы и оборудование для изготовления низких коробчатых деталей типа теплоприемных и теплообменных панелей из нержавеющей сталей позволяют уменьшить расход металла в 2...2,5 раза за счет использования преимуществ локальной обработки эластичным рабочим инструментом, позволяющим уменьшить толщину обрабатываемого металла и снизить на порядок затраты на энергию.

Проведенный анализ причин брака при локальном формообразовании низких коробчатых деталей позволил выявить его основные виды и разработать эффективные способы их устранения. Разработанные рекомендации по расчету технологических и конструктивных параметров локальной обработки листового металла были использованы при создании новых видов оборудования.

Результаты работы внедрены в промышленность на ПО "Электрон", НИИХТ, НПП "Конкурент" (ЦАГИ) с экономическим эффектом более 1300млн. рублей (в ценах на 31.12.95.).

В пятом разделе рассмотрены перспективные направления дальнейшего развития технологии и оборудования локального формообразования листового материала эластичным рабочим

инструментом для изготовления изделий, не имеющих коробчатую форму. Разработанные новые технологические процессы и оборудование для изготовления автомобильных номеров и гофролиста с рельефным рисунком, имитирующим черепицу для крыш зданий, позволили сократить потребление энергии по сравнению со штамповкой на прессах в 4-5 раз. Рассмотрены возможности использования принципа локальной обработки эластичным инструментом в разделительных операциях.

Разработанные технологические процессы и оборудование внедрены в НПП "Конкурент" (ЦАГИ) с экономическим эффектом 980млн. рублей (в ценах на 31.12.95.).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.

1. В результате выполненных теоретических исследований процессов обратного выдавливания коробчатых деталей с использованием существующих методов получены зависимости: для определения распределения напряжений на контактных поверхностях и силовых параметров в конечной стадии деформирования; для определения энергосиловых параметров процесса в условиях обычного выдавливания и с активным действием сил трения с разными условиями их воздействия на заготовку. Данные зависимости необходимы для рационального проектирования технологии.

2. Разработанная методика экспериментальных исследований и их проведение позволили определить напряженно-деформированное состояние и силовые параметры процессов обратного выдавливания высоких коробок с учетом основных технологических факторов. Полученные экспериментальные результаты согласуются с теоретическими зависимостями и находятся в области доверительного интервала эксперимента.

3. Экспериментальными исследованиями процесса обратного выдавливания высоких коробок с различными условиями трения между вертикальными поверхностями заготовки (по ее узким граням) и матрицей установлено, что при применении свободной матрицы, перемещаемой под действием металла стенок заготовки, удельная деформирующая сила уменьшается на (5...12%), а применение в этой зоне активного действия сил трения позволяет уменьшить удельную деформирующую силу на (20...30%) по сравнению с выдавливанием с закрепленной матрицей. Проведенные исследования показали также широкие возможности управления процессом истечения металла заготовки в стенки, а применение математического планирования и

обработки экспериментальных данных позволило получить уравнения, описывающие процесс формообразования стенок коробки с учетом технологических факторов для изделий с отношением длины к ширине (в плане) $L/B=2...3$. Полученные экспериментальные результаты подтвердили достоверность теоретических исследований и легли в основу новых способов и конструкций штампов для выдавливания коробчатых деталей, признанных изобретениями и рекомендованных к внедрению в производство.

4. Экспериментально исследованы процессы обратного выдавливания высоких коробок с переменной по периметру толщиной стенок и показана возможность получения таких изделий путем приложения активных сил трения в зонах затрудненного течения металла (более тонкая стенка), что в отличие от известных способов, где при выдавливании таких коробок рекомендуется применять противодавление по торцу коробки, не только не приводит к увеличению удельных сил на пуансоне, а даже уменьшает их на (3...5)%.

5. Созданные математические модели деформирования эластичного инструмента при его сжатии между жестким валом и матрицей с учетом сил трения и выполненный с использованием МКЭ и комплекса специальных программ ФИТИНГ-1 расчет напряженно-деформированного состояния позволили разработать основные принципы локального формообразования низких коробчатых деталей и новые схемы оборудования.

6. Экспериментальные исследования процессов и оборудования локального формообразования эластичным инструментом позволили определить силовые параметры и контактные нормальные напряжения, возникающие при деформировании эластичной оболочки вала, которые хорошо согласуются с полученными теоретически расчетными данными. Эксперименты по исследованию возможностей формообразования, проведенные на наиболее распространенных рабочих типах матриц, позволили определить технологические возможности метода, получить подтверждение достоверности теоретических решений и рекомендовать марку эластичной оболочки вала: полиуретан СКУ-7Л для деформирования листовых металлов из алюминиевых, магниевых и других пластичных цветных металлов и сплавов с глубиной рельефа на поверхности до 20 мм; и полиуретан СКУ-ПФЛ для деформирования нержавеющей сталей, титановых сплавов и других труднодеформируемых листовых материалов с глубиной рельефа на поверхности до 5 мм.

7. Разработанные на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований рекомендации по проектированию

технологий и оборудования для локального формообразования низких коробок эластичным инструментом позволили создать новые технологии и оборудование (признанные изобретениями), получившие внедрение в промышленности с большим экономическим эффектом. (Получена прибыль более 1,3 млрд. рублей в ценах на 31.12.95).

8. Разработаны и внедрены на предприятиях радиоэлектронной (ПО "Электрон") и оборонной (НИИХТ) промышленности новые ресурсосберегающие технологические процессы и новые конструкции штампов для обратного выдавливания высоких коробок.

9. Определены и проверены экспериментально основные направления дальнейшего развития процессов локального формообразования эластичным инструментом плоских изделий, имеющих отличную от коробчатой форму. Разработаны новые конструкции оборудования и технологические процессы, внедренные в НПП "Конкурент" (ЦАГИ) с экономическим эффектом свыше 980 млн. рублей (в ценах на 31.12.95).

10. Результаты работы внедрены в учебный процесс на кафедре автоматизированных систем и модулей обработки металлов давлением Московского государственного технологического университета (СТАНКИН) в комплексе учебно-исследовательской работы студентов и курсах: технология листовой штамповки, теория обработки давлением и технология объемной штамповки.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В РАБОТАХ.

1. Артеc А.Э., Семенов И.Е., Серов Е.С.: Технологические процессы для участка холодной объемной штамповки //Вестник машиностроения. - 1988. -N-4. -С.44-46.
2. А.с.615994. СССР. МКИ⁵ В 21 D 22/10, В 21 D 51/52. Штамп для вытяжки прямоугольных коробок / И.Е.Семенов, С.А.Ефремов, Л.А.Кудинов и др. (СССР). -N-2332392/25-27; Заявл.09.03.76. Оpubл.25.07.78. Б.И. N-27. -С.49.
3. А.с.623627. СССР. МКИ⁵ В 21J 13/02. Штамп для выдавливания изделий коробчатой формы /И.Е.Семенов (СССР). - N-2472471/25-27; Заявл.11.04.77. Оpubл.15.09.78. Б.И. N-34. -С.46.
4. А.с.627898. СССР. МКИ⁵ В 21J 5/06. Способ выдавливания изделий /И.Е.Семенов (СССР). -N-2472466/25-27; Заявл.11.04.77. Оpubл.15.10.78. Б.И. N-38. -С.48.
5. А.с.676369. СССР. МКИ⁵ В21 J 5/06. Способ выдавливания изделий /И.Е.Семенов (СССР). -N-2472467/25-27; Заявл.11.04.77. Оpubл. 30.07.79. Б.И. N-28. -С.44.

6. А.с.742026. СССР. МКИ⁵ В 21 J13/02. Штамп для изготовления изделий коробчатой формы /Е.И.Семенов, И.Е.Семенов (СССР). - N-2731210/25-27; Заявл.5.03.79. Оpubл.25.06.80.Б.И. N-23.-С.44.
7. А.с.963673. СССР. МКИ⁵ В 21 J13/02. Штамп для получения деталей типа стаканов /Е.Н.Ланской, А.Э.Артес, И.Е.Семенов и др. (СССР).- N-3218319/25-27; Заявл.16.12.80. Оpubл. 07.10.82. Б.И. N-37.-С.43.
8. А.с.1057159. СССР. МКИ⁵ В 21 J13/02. Штамп для изготовления изделий коробчатой формы / И.Е.Семенов, П.В.Любимов (СССР). - N-3460717/25-27; Заявл.05.07.82.Оpubл.30.11.83.Б.И. N-44.-С.46.
9. А.с.1731383. СССР. МКИ⁵ В 21 J 1/06, 5/06, В 21 К 21/00. Способ изготовления полых изделий коробчатой формы с разновысокими стенками /С.С.Соловцов, И.Е.Семенов, Н.Л.Лисунец и др.(СССР).- N-4783263/27; Заявл.17.01.90. Оpubл.07.05.92. Б.И. N-17.-С.27.
10. МУ 2- 041-1-85 Методические указания: Групповые технологические процессы изготовления точных заготовок и деталей гидроаппаратуры методом холодной и полугорячей штамповки /А.Э.Артес, С.С.Соловцов, И.Е.Семенов и др.- М.: ВНИИТЭМР, 1986.- 79с.
11. Жаров А.Л., Семенов И.Е. Напряженное состояние заготовки при закрытой прошивке коническим пуансоном //Вестник машиностроения.-1977.-N 2.-С.71-74.
12. Зимин В.В., Семенов И.Е., Смирнов А.М. Проектирование холодноштамповочных цехов автоматизированных производств.- М.:1988.-84с.(Препринт/ Минвуз РСФСР, Мосстанкин; N1649).
13. Изыскание, исследование и разработка процесса штамповки алюминиевых прямоугольных гильз: Отчет о НИР (промежуточ.) N89-26 / Мосстанкин; Руковод.- С.С. Соловцов; Отв. исп. И.Е.Семенов.-N 89-26; Инв. N 07856489.-М., 1989.-75с.д.с.п.
14. Пат. 1692302 АЗ. СССР, МКИ⁵ В 21D 22/14. Устройство для ротационной вытяжки изделий со сложной поверхностью /И.Е.Семенов, Д.В.Кевеш., Э.А.Костык (СССР).- N 4828100/27; Заявл.24.05.90. Оpubл.15.11.91. Б.И. N 42.-С.29.
15. Пат. 1699345. СССР, МКИ⁵ В 21D 22/10. Устройство для изготовления изделий с выпукло-вогнутым рельефом из листового металла /И.Е.Семенов, Д.В.Кевеш, Э.А.Костык (СССР).- N 4827535; Заявл.24.05.90. Оpubл.15.12.91. Б.И. N 46.-С.34.
16. Головин В.А.Семенов И.Е. Примеры технологических процессов холодной и полугорячей объемной штамповки //Ковка и штамповка: Справочник: В 4-х т. /Ред. совет: Е.И.Семенов (пред.) и др.-

- М.: Машиностроение, 1987.-Т.3. Холодная объемная штамповка /Под ред. Г.А.Навроцкого.-Гл.3.- С. 181-195.
17. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки. /Ф.В.Гречников, А.М.Дмитриев, И.Е.Семенов и др. / Под общ. ред. А.Г.Овчинникова.- М.: Машиностроение, 1985.- 184 с.
18. Семенов И.Е., Напряженное состояние цилиндрической пластины при осадке в жестком штампе //Известия вузов. Машиностроение.- 1976.- N 8.- С.71-74.
19. Семенов И.Е. Расчет деформирующего усилия при горячей калибровке толстолистовых заготовок, изогнутых по радиусу //Вестник машиностроения.- 1976.- N 12.- С. 65-67.
20. Семенов И.Е. Расчет усилия деформирования при обратном выдавливании изделий коробчатой формы //Труды МВТУ. Машины и технология обработки металлов давлением.- М.:1978.- Вып.12.- С. 130-132.
21. Семенов И.Е., Любимов П.В. Исследование процесса выдавливания деталей коробчатой формы // Малоотходные технологические процессы холодной объемной штамповки: Межвузовский сборник научных трудов.- М.: Мосстанкин, 1984.- Вып. 1.-С. 76-87.
22. Семенов И.Е. Исследование процесса обратного выдавливания изделий коробчатой формы //Кузнечно-штамповочное производство.- 1980.- N 9.-С. 16-19.
23. Семенов И.Е. Исследование влияния активного действия сил трения при выдавливании коробок //Кузнечно-штамповочное производство.- 1981.- N 6.-С. 18-22.
24. Семенов И.Е. Управление течением металла при выдавливании коробчатых изделий // Современ. пути повыш. произв. и точности металлообр. оборуд. и автоматизации технологических процессов в машиностр.: Тезисы докл. Всесоюзной научно-технической конференции.- М., 1980.- С. 20-22.
25. Овчинников А.Г. Семенов И.Е. Штамповка на гидравлических прессах // Ковка и штамповка: Справочник в 4 т. /Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др.- М.: Машиностроение.- 1986.- Т. 2. Горячая объемная штамповка / Под ред. Е.И.Семенова.-Гл.5.- С. 210-233.
26. Semjonow E.I., Semjonow I.E. Rueckwaertsnapfflisspressen gehaeusefoermiger Teile // Fertigungstechnik und Betreib. (Berlin 30).-1980 - N 10.- S. 588-589.