

1548962

На правах рукописи

Ковалев Виктор Григорьевич

УДК 621.983: (681.14:658.512)

Разработка методики определения и конструкторско-
технологического обеспечения заданной точности размеров деталей,
изготовленных вытяжкой и отбортовкой из листовых заготовок

Специальность 05.03.05. - Процессы и машины обработки
обработки давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва -1995



Работа выполнена в Московском
Государственном Техническом Университете им. Н. Э. Баумана

Научный консультант:
академик Российской Академии Проблем качества,
заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации,
доктор технических наук, профессор

Овчинников А. Г.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор	Соловцов С. С.
доктор технических наук, профессор	Матвеев А. Д.
доктор технических наук, профессор	Исаченков Е. И.

Ведущее предприятие: ГП НПО " Техномаш "

Защита состоится *24 декабря* 1995 г. в *14 30* часов
на заседании диссертационного совета при
Государственном Техническом Университете им. Н. Э. Баумана
по адресу: 107005, Москва, ул. Бауманская, д. 5
С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке
Государственного Технического Университета им. Н. Э. Баумана
Ваш отзыв на диссертацию и автореферат просим направить по адресу:
Почтовый ящик № 40, Москва, ул. Бауманская, д. 5
Телефон для справок: 241-11-11

Автореферат

Ученый секретарь
специализированной комиссии
к. т. н. , доцент

Подписано _____
Заказ 40

1548962

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Конкурентоспособность изделий машино- и приборостроения зависит от технологических способов, обеспечивающих высокую точность, производительность и стойкость инструмента. Однако, сегодня штамповочное производство не все эти требования может обеспечить. Для определения возможной точности проектируемых изделий пользуются данными, полученными при условиях, не учитывающих многообразия параметров и факторов производства; расчетных методик определения, повышения и обеспечения заданной точности нет. Поэтому разработчики изделий вынуждены назначать ту точность деталей, которую может обеспечить производство. Из-за этого при сборке возникает большой объем брака, так в производстве кинескопов для телевизоров он достигает в среднем 12,5%, а в производстве кинескопов ЭВМ управления самолетом основные размеры штампованных деталей доводят вручную (при отклонении по высоте борта электрода оптики электронной пушки 0,02 мм погрешность отклонения магнитной отклоняющей системой луча на экране кинескопа превышает допустимую в десятки тысяч раз).

В настоящее время обеспечение заданной высокой точности деталей, изготовленных штамповкой с использованием большого объема доводочных работ штампов со значительными затратами времени, материалов и ручной доводкой ответственных размеров деталей не обеспечивает экономичного производства качественных деталей. Поэтому определение и повышение точности штампованных деталей для получения ее заданной величины при минимальных затратах является крупной проблемой, имеющей большое народнохозяйственное значение. Работа соответствует Решениям ГРАУ от 20.06.95 г. и 555/4/0720 от 11.07.95 г., подтверждающими Решения Государственной комиссии СМ номер 320 от 06.09.89 г. и номер 91 от 29.05.91 г., по повышению точности специзделий.

Цель работы: установление факторов, влияющих на точность размеров изделий, разработка методики расчета технологически- и конструкторских параметров при проектировании технологии и штамповой оснастки для изготовления деталей, удовлетворяющих заданной точности при использовании формообразующих операций

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1548962

Ковалев В.Г. Разработка ме

вытяжки с утонением, обратной вытяжки и отбортовки.

Методы исследования. Теоретические положения, разработанные и примененные для анализа процессов пластического деформирования и разгрузки построены на классических методах описания движения и напряженно-деформированного состояния материала, принятых в механике сплошных сред и в теории пластичности. Математическое моделирование процессов пластического и упругого деформирования построено на основе численного решения системы основных уравнений, использования ЭВМ и пакетов стандартных и специально разработанных программ.

Автор защищает:

- методику определения точности поперечных размеров деталей в операциях вытяжки с утонением, обратной вытяжки и отбортовки;
- методику повышения точности и обеспечения заданной точности при выполнении указанных операций, а при обычных требованиях к точности-методику расширения поля допуска на износ;
- методику расчета исполнительных размеров пуансонов и матриц штампов для указанных операций;
- методику определения "длины" пуансона и "высоты" матрицы штампа в технологической системе открытый пресс-штамп-заготовка для обеспечения их нормальной стойкости;
- методику конструирования комбинированных штампов с разделительными и формообразующими переходами, обеспечивающую нормальную стойкость инструментов разделительных переходов;
- методику расчета технологических параметров процесса вытяжки с утонением и проталкиванием.

Научная новизна. 1. Создана обобщенная расчетно-аналитическая модель определения и выявления возможности повышения точности размеров в процессах листовой штамповке.

2. Созданы математические модели определения и повышения точности размеров в процессах вытяжки с утонением, вытяжки с утонением и проталкиванием, комбинированной вытяжки, обратной вытяжки, отбортовки, отбортовки со сжатием, комбинированной отбортовки, разработаны алгоритмы и программы расчета точности.

3. Разработана методика определения оптимальных параметров процессов вытяжки и отбортовки с утонением для достижения наибольшей точности.

4. Анализированы процессы вытяжки с утонением и проталкиванием и обратной вытяжки, для которой получены уравнения равновесия и

деформаций в тороидальных координатах и получены необходимые расчетные зависимости; разработаны алгоритм и программа расчета всех параметров вытяжки с утонением и проталкиванием.

5. Создана математическая модель технологической системы открытый пресс-штамп-заготовка, обеспечивающая возможность получения наименьших разностенности и изгиба оси изделия при вытяжке и увеличения стойкости рабочих деталей разделительных штампов. Разработана методика конструирования высокостойких комбинированных штампов последовательного действия с разделительными и формоизменяющими переходами.

Достоверность результатов обеспечена анализом принятых допущений и гипотез, использованных в математических моделях процессов холодной листовой штамповки, сходимостью результатов теоретического и экспериментального исследования, практическим использованием результатов работы.

Практическая ценность и реализация работы. Решенные в диссертации задачи и разработанные методы дают возможность определить точность и обеспечить заданную точность размеров и качество штампуемых деталей в процессах листовой штамповки: вытяжки с утонением, вытяжки с утонением и проталкиванием, комбинированной вытяжки, обратной вытяжки, отбортовки, комбинированной отбортовки. Это имеет большое значение особенно для ускорения подготовки производства (сокращения наладочных работ, исключения экспериментальной доводки и т. п.). Разработана обобщенная модель процесса вытяжки с утонением и учетом граничных условий. Учет особенностей работы технологической системы открытый пресс-штамп-заготовка позволил за счет обеспечения совпадения центров давления пуансона и матрицы увеличить точность изделий и стойкость инструмента, особенно разделительных штампов путем назначения определенной "длины" пуансона и "высоты" матрицы. Использование этих решений обеспечивает сокращение количества операций технологического процесса, повышает точность деталей и стойкость штампов. Результаты работы используются на Московском заводе электровакуумных приборов, на заводах оборонного комплекса и в лекциях по технологии холодной штамповки.

Апробация работы. Основные положения работы были доложены и обсуждены на научных семинарах и научно-технических конференциях: кафедры МТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана, на заседании клуба деловых встреч кузнецов и штамповщиков МДНП.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 20 печатных работ, в том числе получено 3 авторских свидетельства и патента, основные результаты включены в учебник для специальности 05.03.05 "Автоматизация и технология листовой штамповки", принятый издательством "Машиностроение" к опубликованию.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, общих выводов, списка литературы из 198 наименований и приложения,ложена на 212 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 31 таблицу, общий объем-302стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ РАЗМЕРОВ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ШТАМПОВКОЙ ИЗ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ. По данным научно-технической литературы и отраслевых стандартов точность размеров деталей, изготавливаемых с использованием большей части процессов листовой штамповки соответствует 12-14 качеству, исключением являются детали, изготовленные чистовой вырубкой и пробивкой, вытяжкой, с утонением, калибровкой, при выполнении которых возможно достижение 6-9 качественной точности

Точность размеров деталей зависит от факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние заготовки. Вопросы точности образования размеров в обработке давлением и в том числе в листовой штамповке еще не достаточно разработаны. До настоящего времени полностью не изучены и не использованы все возможности технологических процессов и технологической оснастки; реализация этих возможностей во многих случаях позволит без дополнительных затрат в производстве повысить показатели точности, увеличить стойкость штампов, производительность, снизить себестоимость, сделать производство ритмичным.

Создание математических моделей технологических процессов изготовления деталей с заданной точностью способами листовой штамповки имеет большое значение особенно в современных условиях, когда для ускорения освоения и выпуска новых изделий разработку конструкции и технологии ведут одновременно при недостатке исходной информации.

При решении вопросов технологии и экономического производства большое значение имеет надежность работы технологической системы пресс-штамп-заготовка. Особое значение это имеет в случае использования прессы с открытой станиной. Несмотря на большое число исследований по этому вопросу (работы А.Г. Овчиннико-

ва, Е. Н. Ланского и др.) до настоящего времени не выявлены пути рационального использования всех особенностей работы технологической системы открытый пресс-штамп-заготовка для получения более высокой точности изделий и стойкости инструмента.

На основе анализа проблемы точности образования и рассеивания размеров в процессах холодной листовой штамповки сформулированы задачи работы:

1-создание математических моделей, алгоритмов и программ для получения при вытяжке с утонением и проталкиванием и обратной вытяжке расчетных зависимостей;

2-оценка влияния степени деформации, материала и его состояния, вида и схемы процесса формоизменения, трения, температуры, геометрических параметров заготовки и детали на точность размеров штампуемых деталей;

3-создание математических моделей разгрузки для анализа процесса формирования, оценки и обеспечения точности деталей при вытяжке с утонением, обратной вытяжке и отбортовке;

4-разработка методики расчета рабочих частей штампов для получения заданной точности деталей и стойкости операционных и комбинированных штампов последовательного действия, содержащих разделительные и формообразующие переходы.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКЕ. Научной базой повышения точности листштампованных изделий и их элементов при проектировании технологии и ее совершенствовании являются современная теория пластичности и теория упругости, и их практическое приложение к решению конкретных задач. Е. А. Попов, Н. Н. Малинин, С. Д. Пономарев, Л. А. Шофман, А. Д. Томленов, С. В. Бояршинов, С. А. Валиев, Н. И. Безухов, В. Л. Колмогоров, Г. Д. Дель, А. Д. Матвеев, С. П. Яковлев, В. Т. Мещерин, С. С. Соловцев, А. Г. Овчинников, В. Свифт, Д. М. Ву, Д. С. Чань, С. Кобаяши и другие советские и зарубежные ученые создали теоретические основы современных расчетов технологических операций листовой штамповки, позволяющие получить конкретные числовые величины по пластическому деформированию заготовок из различных материалов.

Отклонение размеров деталей от номинальных обусловлено рядом причин. Все причины отклонений условно разделяют на два основных класса: систематические и случайные; систематические

причины разделяют на два подкласса: систематические постоянные и систематические переменные. В дальнейших исследованиях принятым материалом детали изотропным. Отклонение размера изделия от размера инструмента при листовой штамповке в соответствии с правилами суммирования ошибок равно:

$$\Delta L = \Delta L_y + \Delta L_n + \Delta L_t + \Delta L_u + \Delta L_p + \Delta L_o + \Delta L_z + \Delta L_6 + \Delta L_{изг} + \Delta L_a + \Delta L_c, \quad (2.1)$$

где ΔL_y - упругое изменение размера изделия может быть обусловлено деформациями разгрузки от действия нормальных сил, изгибающих моментов и упругой деформацией инструмента:

$$\Delta L_y = \Delta L_{yр} + \Delta L_{ym} + \Delta L_{yn}. \quad (2.2)$$

ΔL_{yn} - изменение размера изделия, обусловленное деформацией разгрузки; в соответствии с законом о разгрузке А. А. Ильюшина: деформация разгрузки в данном направлении прямо пропорциональна нагряжениям разгрузки, равным разности напряжений нагрузки и напряжений, остающихся после разгрузки; в общем случае:

$$\Delta L_{yn1} = \epsilon_1 * L_1, \quad \epsilon_1 = [b_1 - \nu(b_j + b_k)] / E, \quad (2.3)$$

L_1 - размер изделия в 1-ом направлении; b_1, b_j, b_k - главное нормальное напряжение разгрузки в направлении оси 1, j, k; причем

$$b_1 = b_1^n - b_1^o, \quad b_j = b_j^n - b_j^o, \quad b_k = b_k^n - b_k^o,$$

где b_1^n, b_j^n, b_k^n - напряжения нагрузки; b_1^o, b_j^o, b_k^o - остаточные напряжения; ν - коэффициент Пуассона материала детали; E - модуль упругости первого рода материала детали; ΔL_{ym} - упругое изменение размера, обусловленное действием изгибающего момента, определяемое в зависимости от геометрических и механических характеристик материала изделия;

ΔL_{yn} - упругая деформация инструмента при формоизменении, зависящая не только от действующих напряжений, но и от места их приложения.

Пластические изменения размера изделия возникают в процессе разгрузки штампованного изделия и инструмента и деформации инструмента, превышающей упругую деформацию детали:

$$\Delta L_n = |\Delta L_{yn}| - |\Delta L_{yn} + \Delta L_{ym}| > 0 \quad (2.4)$$

Температурные изменения размера изделия или инструмента (возникают из-за тепловыделения в процессе деформирования), равны:

$$\Delta L_t = \alpha * (t_2 - t_1) * L, \quad (2.5)$$

где α - коэффициент линейного расширения; t_1 - температура до деформаций; t_2 - конечная температура, по данным Э. Томсена, Ч. Янга и Ш. Кобаяши равна:

$$t_2 = t_1 + k \cdot (f_6 \cdot d \epsilon) / (427 \cdot c \cdot \rho), \quad (2.6)$$

$$\epsilon = 0$$

k - коэффициент выхода тепла (для стали 0,9, для дюралюминия 0,77); f_6 - интенсивность напряжений пластического деформирования; ϵ - интенсивность деформаций; 427 - механический эквивалент теплоты; c - удельная теплоемкость; ρ - удельная масса.

Изменение параметров механических свойств материала детали, возникающее из-за изменения температуры в процессе деформирования, представленное в работах П. И. Полухина, Г. Я. Гуна, А. М. Галкиа, А. В. Теретьякова и В. И. Зюина, на основе метода выравнивания выразим в экспоненциальной форме:

$b_p = b_{p20} \cdot e^{a \cdot t}$, $n = n_{20} \cdot e^{b \cdot t}$, $E = E_{20} \cdot e^{c \cdot t}$, $\nu = \nu_{20} \cdot e^{d \cdot t}$, (2.7-2.10)
 где b_{20} , n_{20} , E_{20} , ν_{20} - предел прочности, показатель упрочнения, модуль Юнга и коэффициент Пуассона при температуре 20°C; a , b , c , d - расчетные коэффициенты, определяемые по действительным кривым температурного изменения определяемого параметра.

Изменение размера изделия, вызванное изнашиванием инструмента принимаем в общепринятом виде:

$$\Delta L_u = U_n + U_0 \cdot l, \quad (2.11)$$

где U_n - изнашивание, соответствующее периоду приработки; U_0 - удельное изнашивание установившегося периода; l - длина пути всех деформированных изделий относительно инструмента.

Погрешность размера инструмента переносится на размер изделия, поэтому рекомендуется инструмент изготавливать на 1...2 квали. эта точнее по сравнению с заданной точностью детали.

Погрешность, обусловленная неточностью оборудования и штампа зависит от конструкции пресса и штампа, рабочего усилия и схемы установки штампа; на прессе с открытой станиной отклонения от заданной геометрической формы больше, чем на прессе с закрытой станиной, жесткость элементов штампа, точность совпадения оси давления штампа с осью давления пресса, зависящая от конструкции хвостовика, в значительной мере определяют точность формы и размеров изделий.

Погрешность формы и размеров заготовки и др.: коробовидность, серповидность, отклонение от круглости, разнотолщинность, непрямолинейность, наличие осевых точечных напряжений; величина этих погрешностей определяется условиями получения заготовки.

Погрешность базирования обусловлена неточностью формы.

размеров заготовки и схемой установки; ее величина может быть равна нулю или составлять значительную часть допуска на изготовление. Погрешность, обусловленная изгибом заготовки вблизи зон ссражения участков с различной кривизной или различным пространственным расположением, ограничена определенными размерами. Для цилиндрических элементов детали изменение размера будет только при их длине $l < 1,77 \cdot (d \cdot s)^{0,5}$, где d — диаметр, s — толщина; (у торообразных элементов $\omega_2(0,1) - \omega_1(0,2) < 4/\lambda$). В дальнейших исследованиях будем принимать длину цилиндрических участков превышающей указанную величину.

Случайные погрешности обусловлены случайным изменением вышеперечисленных параметров, параметров механических характеристик материала, условий штамповки. Случайные погрешности могут быть определены аналитическим путем, если известны интервалы изменения причин, вызвавших их. При невыявленной зависимости между величиной случайной погрешности и факторами вызывающими ее, пределы изменения случайной величины могут быть установлены на основе экспериментальных исследований. Каждую из случайных погрешностей можно описать соответствующим законом распределения. Отдельные погрешности суммируют для определения общего интервала рассеивания размеров по формуле:

$$\Delta L_c = (k_1^2 \cdot \Delta_1^2 + k_2^2 \cdot \Delta_2^2 + \dots + k_n^2 \cdot \Delta_n^2)^{1/2}, \quad (2 \cdot 12)$$

где $k_1, k_2, \dots, k_n$ — коэффициенты приведения фактического закона рассеивания размеров к нормальному; $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ — рассеивание размера, определяемое каждым из n параметров.

Данные об изменении размеров деталей позволяют установить уже на этапе проектирования технологического процесса ту точность размеров, которую обеспечивает процесс.

Представленное показывает, что все производственные условия и параметры определяют величину отклонений и точность размеров. В частности, такими параметрами являются: вид материала (его параметры E, ν, n, b_n) и его состояние, анизотропия, точность геометрических параметров заготовки и ее шероховатость, степень износа и конструкция инструмента, точность прессы и его состояние, трение и его стабильность и др.

3. РАЗМЕРЫ И ТОЧНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ВЫТЯЖКЕ С УТОНЕНИЕМ.

Производственный процесс в зависимости от требований к точности, геометрических параметров изделия, возможностей изготови-

теля может быть следующим: -вытяжка с утонением неравностенной заготовки; -вытяжка с утонением равностенной заготовки без отжига; -последовательная вытяжка в ленте или на многопозиционном прессе; -вытяжка с утонением и проталкиванием равностенной отожженной заготовки; -вытяжка с утонением и проталкиванием равностенной заготовки без отжига; -комбинированная вытяжка.

3.1. Размеры и точность при вытяжке с утонением отожженной равностенной заготовки [7]. Напряженно-деформированное состояние представлено в трудах Е. А. Попова. Приближенно принимаем наличие полной разгрузки после вытяжки с утонением и поэтому деформация разгрузки равна:

$$\epsilon_{\phi} = -(0,5 - \nu) * (\delta_z + \delta_0) / E \quad (3.1)$$

Так как радиальные сжимающие пуансон напряжения после вытяжки перед съемом изделия с пуансона невелики, то можно принять наличие полной его разгрузки, а деформацию разгрузки равной:

$$\epsilon_n = -[\chi(1 - \nu_n) * \delta_0 - \nu_n * \delta_{zn}] / E. \quad (3.2)$$

где ν_n и E_n - соответственно коэффициент Пуассона и модуль упругости первого рода материала пуансона; $\delta_{zn} = 4 * \delta_z * S / d$ - среднее осевое напряжение сжатия пуансона; χ - коэффициент относительной длины нагруженного участка рабочей поверхности пуансона. После разгрузки возможная наибольшая дополнительная упругая деформация, после достижения которой диаметр изделия увеличивается при пластическом растяжении окружающими напряжениями, равна:

$$\epsilon_g = \delta_s / E \quad (3.3)$$

Общая величина возможной упругой деформации изделия равна:

$$\epsilon_g^y = \epsilon_g - \epsilon_{\phi} \quad (3.4)$$

Пластическое деформирование детали при разгрузке пуансона возможно при

$$\epsilon_{ng} > \epsilon_n - \epsilon_g^y > 0. \quad (3.5)$$

При $\epsilon_{ng} < 0$ происходит только упругое деформирование детали, а деформация разгрузки детали после снятия ее с пуансона равна:

$$\begin{aligned} \epsilon_y^p &= \{\epsilon_g \text{ при } \epsilon_{ng} > 0, \\ &= \{\epsilon_{\phi} \text{ при } \epsilon_{ng} < 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Фактический рабочий размер пуансона L_{ϕ}^n из-за его сжатия радиальными напряжениями меньше его номинального размера в ненагруженном состоянии L_n , а размер матрицы L_{ϕ}^m из-за растяжения больше номинального размера в ненагруженном состоянии L_m :

$$L_{\phi}^n = (1 - \epsilon_n) * L_n. \quad (3.7)$$

$$L_{\phi}^m = (1 + \epsilon_m) * L_m \quad (3.7a)$$

После съема с пуансона, разгрузки и охлаждения поперечные внутренние L^{BH} и наружные L^{HP} размеры детали равны:

L^{BH}		L^{HP}		Условие
$(1-\varepsilon_g) * (1-\varepsilon_{tm}) * L_{\phi}^{PH}$		$(1-\varepsilon_g) * (1-\varepsilon_{tp}) * L_{\phi}^{PH}$		при $\varepsilon_{ng} > 0$.
$(1-\varepsilon_{\phi}) * (1-\varepsilon_{tm}) * L_{\phi}^{PH}$		$(1-\varepsilon_{\phi}) * (1-\varepsilon_{tp}) * L_{\phi}^{PH}$		при $\varepsilon_{ng} < 0$, $\varepsilon_{\phi} > 0$.
$(1+\varepsilon_{\phi}) * (1-\varepsilon_{tm}) * L_{\phi}^{PH}$		$(1-\varepsilon_{\phi}) * (1-\varepsilon_{tp}) * L_{\phi}^{PH}$		при $\varepsilon_{ng} < 0$, $\varepsilon_{\phi} < 0$

(3.8)

Поперечные размеры пуансона и матрицы, необходимые для получения изделия с заданным L^{BH} и L^{HP} , с учетом выражений (3.7), (3.7a) и (3.8) определяются соотношениями:

$$L^{BH} / [(1-\varepsilon_g) * (1-\varepsilon_n) * (1-\varepsilon_{tp}) * (1-\varepsilon_t)] \text{ при } \varepsilon_{ng} > 0,$$

$$L_{PH}^{BH} = \{ L^{BH} / [(1-\varepsilon_{\phi}) * (1-\varepsilon_n) * (1-\varepsilon_{tp}) * (1-\varepsilon_t)] \text{ при } \varepsilon_{ng} < 0, \varepsilon_{\phi} > 0, \quad (3.9)$$

$$L^{BH} / [(1+\varepsilon_{\phi}) * (1-\varepsilon_n) * (1-\varepsilon_{tp}) * (1-\varepsilon_t)] \text{ при } \varepsilon_{ng} < 0, \varepsilon_{\phi} < 0,$$

$$L^{HP} / [(1-\varepsilon_g) * (1-\varepsilon_m) * (1-\varepsilon_{tm}) * (1-\varepsilon_t)] \text{ при } \varepsilon_{ng} > 0,$$

$$L_{PH}^{HP} = \{ L^{HP} / [(1-\varepsilon_{\phi}) * (1-\varepsilon_m) * (1-\varepsilon_{tm}) * (1-\varepsilon_t)] \text{ при } \varepsilon_{ng} < 0, \varepsilon_{\phi} > 0 \quad (3.9a)$$

$$L^{HP} / [(1+\varepsilon_{\phi}) * (1-\varepsilon_m) * (1-\varepsilon_{tm}) * (1-\varepsilon_t)] \text{ при } \varepsilon_{ng} < 0, \varepsilon_{\phi} < 0$$

Случайные погрешности, определяемые рассеиванием механических характеристик штампуемого материала и другими параметрами, могут быть определены на основе интервалов рассеивания этих параметров или опытным путем. Для сокращения объема вычислительных работ при определении деформации разгрузки расчетно-аналитическим путем составим таблицу-матрицу экстремального влияния сочетания исследуемых параметров на величину деформации разгрузки (см. табл. 1) в соответствии с (3.1).

Таблица 1

	E		ν		b_b		μ		n	
ε_{ϕ}	нб	нм	нб	нм	нб	нм	нб	нм	нб	нм
ε_{ϕ}^{H6}		+	+		+		+		+	
ε_{ϕ}^{HM}	+			+		+		+		+

С учетом представленного рассеивание поперечных размеров вытянутых изделий может быть определено по выражениям:

$$\Delta L_c = ((\varepsilon_{\phi}^{H6} - \varepsilon_{\phi}^{HM}) * L \text{ при } \varepsilon_g < 0 \quad (3.10)$$

$$= ((\varepsilon_g^{H6} - \varepsilon_g^{HM}) * L \text{ при } \varepsilon_g > 0$$

При учете всех факторов, влияющих на размеры, это выражение поз-

воляет определить точность при вытяжке с утонением.

При некоторой степени утонения правая часть выражения (3.10) равна нулю—это оптимальная степень утонения, при которой получаем минимальное рассеивание деформации. Точность размеров при этом будет наибольшая.

Для получения конкретных данных разработан алгоритм вычислений, выбраны материалы (см. табл. 2) для изготовления изделий диаметром от 6 до 500 мм. Вычисления выполнены на ПЭВМ.

Таблица 2

Материал	$E \cdot 10^3$, МПа	ν	σ_B , МПа	μ	n
Сталь 20	210-245	0,28-0,32	470	0,05-0,1	0,218
Латунь Л62	105-120	0,37-0,42	430	0,05-0,1	0,406
Бронза БрБ2	120-130	0,33-0,35	450	0,05-0,1	0,442
Сталь 12Х18Н9	188	0,27	620-	0,05-0,1	0,49
			550		

В табл. 3 представлены результаты оценки точности поперечных размеров изделий для указанных материалов, где приняты обозначения: "об"—размер пуансона соответствует номинальному размеру изделия, как это обычно принято при проектировании, "пт"—точность при размере пуансона, определенном с учетом исключения систематических погрешностей по формуле (3.9).

Таблица 3

	Латунь Л62				Сталь 20				Бериллиевая бронза БрБ2			
Диаметр, мм	So / S											
	1,2		2,2		1,2		2,2		1,2		2,2	
	об	пт	об	пт	об	пт	об	пт	об	пт	об	пт
6	3	0	6	4	2	0	4	1	4	0	6	4
10	4	1	7	5	3	0	5	2	6	1	7	5
50	7	4	9	7	6	2	7	5	7	4	10	7
120	8	5	10	9	7	3	9	6	9	5	11	9
500	9	7	12	10	9	5	10	8	10	7	13	10

Из представленных теоретических зависимостей и расчетных данных следует, что точность деталей диаметром от 6 до 500 мм при степени утонения $So/S=1,2$ и при обычном проектировании инструмента, изготовленных из латуни Л62 соответствует 3-9 качеству, из стали 20 - 2-9 качеству, из бериллиевой бронзы - 4-10 качеству, при степени утонения $So/S=2,2$ соответственно - 6-12, 4-10 и 6-13 качеству точности; точность же при исключении систематических погрешностей изготовления детали при том же интервале диаметров изделий и степени утонения $So/S=1,2$ для изделий из латуни Л62 соответствует 0-7 качеству, из стали 20 - 01-5 качеству, из бериллиевой бронзы ЕБ2 - 0-7 качеству.

При отсутствии требования по более высокой точности поперечных размеров, чем 6-9 качество, можно использовать эту методику проектирования рабочих размеров инструмента для увеличения припуска на износ инструмента. Полученные теоретические результаты также позволяют утверждать, что поперечный размер изделия может быть больше, меньше и равен диаметру инструмента в зависимости от степени утонения; при степенях утонения $So/S < 1,4-1,6$ рассеяние поперечного размера положительно, при $So/S > 1,4-1,6$ это рассеивание отрицательно, а при $So/S 1,4-1,6$ примерно равно нулю; величина отклонения поперечного размера изделия может быть заранее определена, а инструмент скорректирован на величину этого отклонения с целью изготовления более точных изделий; исключение систематических погрешностей также позволяет изготавливать изделия с точностью на 2-4 качества более высокой, чем при проектировании по обычной методике.

Отметим, что этот процесс следует использовать для изготовления наиболее точных в поперечном сечении размеров деталей.

3.1.2. Размеры и точность изделий при вытяжке с утонением отоженной неравностенной заготовки. Напряженно-деформированное состояние заготовки в этом случае принимаем таким же, как и в предыдущем случае, а в расчетных формулах должна быть учтена неравномерность толщины заготовки по высоте и где S_0 должны заменить на

$$S_t = S_0 (\rho/r)^{(1+At)/(2-At)}, \quad (3.11)$$

где ρ - радиус рассматриваемой точки на заготовке, необходимый для определения положения этой точки на образующей цилиндра,

A_t - текущее соотношение меридионального и окружного

напряжения по радиусу заготовки, равное

$$A_t = -\ln(K \cdot r / \rho) / [1 - \ln(K \cdot r / \rho)], \quad (3 \cdot 12)$$

K - коэффициент вытяжки без утонения, равный отношению радиусов исходной заготовки R и изделия $r \cdot R / r$.

Расстояние от дна изделия до рассматриваемой точки после вытяжки с утонением, принимая условие постоянства объема, равно:

$$h = 0,25 \cdot [(4\rho^2 / d) - d] \cdot S_0 / S \quad (3 \cdot 13)$$

Соотношения, определяющие упругие и температурные деформации разгрузки, представляют формулы (3.1) ... (3.9).

Из представленного можно установить: при вытяжке без утонения за один переход толщина изделия по высоте изменяется в пределах от 0,85 до 1,4 исходной толщины и, принимая степень утонения у дна равной 1,2, у верхнего торца получим степень утонения равной 1,83. Для детали из латуни Л63 диаметром от 6 до 500 мм точность изменяется от 6 до 12 квалитета при обычном способе проектирования инструмента, а при корректировке инструмента по новой методике точность будет изменяться от 4 до 12 квалитета. Таким образом, предельно технически возможная точность поперечных размеров изделий при вытяжке с утонением отожженной неравностенной заготовки значительно снижается: для изделий из латуни Л63 - на 3...4 квалитета, из стали 20 - на 2 квалитета и изделий из бериллиевой бронзы БрБ2 2-4 квалитета.

3.2. Размеры и точность при вытяжке с утонением заготовки без отжига.

3.2.1. Размеры и точность изделий при вытяжке с утонением неравностенной заготовки без отжига. Такой процесс характерен для изготовления наиболее точного изделия способом комбинированной последовательной штамповки. Все выше представленные соотношения (3.1) ... (3.10) остаются и в этом случае пригодными, однако, в этом случае напряжение текучести определяется в зависимости от степени упрочнения материала по формуле:

$$\sigma_s = \sigma_s [(e/n) \cdot \ln(\epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \epsilon_3 \cdot \dots)]^n \quad (3 \cdot 14)$$

Так как во всех соотношениях все параметры сохраняются, кроме напряжения текучести, то характер образования размеров во всех случаях остается прежним, а рассеивание размеров становится больше и точность становится меньше. Интервал рассеивания размеров увеличивается пропорционально соотношению напряжения текучести неотожженного и отожженного штампуемого материала:

$$R_u = [\ln(\epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \epsilon_3 \cdot \dots) / \ln \epsilon]^n \quad (3 \cdot 15)$$

В зависимости от упрочнения материала интервал рассеивания может увеличиться в 1,5-2 раза, а точность поперечных размеров уменьшиться. Как показывает числовая оценка отклонений для поперечного размера изделия диаметром 50 мм и 100 мм из латуни Л62, стали 20 и бериллиевой бронзы БрБ2 точность размера снижается на 1-2 квалитета; из этого следует, что для получения более точных изделий надо уменьшать напряжение текучести штампуемого материала, т.е. перед завершающей операцией вытяжки с утонением следует заготовки отжигать.

3.2.2. Размеры и точность изделий при вытяжке с утонением неравностенной заготовки без отжига. С учетом выше приведенных соотношений (3.1)...(3.15) можно установить, что упрочнение и в этом случае увеличивает рассеивание размеров в 1,5 - 2 раза, а точность поперечных размеров уменьшается. При числовой оценке точности поперечных размеров изделий диаметром 50 мм и 100 мм из латуни Л62, стали 20 и бериллиевой бронзы БрБ2 точность снижается на 1-2 квалитета и составляет 10-11 квалитет при обычной методике проектирования инструмента, а при исключении систематических погрешностей - 8-10 квалитет.

3.3. Размеры и точность изделий при последовательной вытяжке с утонением в ленте или на многопозиционном прессе. Существенными отличительными признаками формирования размера и точности в этом случае являются температурные условия. Если при операционной штамповке штампуемая деталь к следующей операции охлаждается до комнатной температуры, то в этом случае от одного к другому технологическому переходу температура штампуемого изделия увеличивается. Это приводит к изменению механических характеристик штампуемого материала, размеров инструмента и изделия: уменьшаются $\sigma_{\text{в}}$, n , E , увеличиваются ν , размеры инструмента и изделия в процессе формообразования. Вследствие уменьшения напряжения текучести ($\sigma_{\text{в}}$ и n) уменьшаются напряжения пластического деформирования, что и приводит к уменьшению не только систематических, но и случайных погрешностей; нагрев инструмента приводит к противоположному изменению размера - увеличению; абсолютная величина температурного увеличения размера превосходит величину деформации разгрузки и поэтому поперечные размеры изделий после охлаждения будут меньше размеров пуансона, рассеивание размеров будет также несколько меньше, чем при пооперационной вытяжке, а точность размеров будет выше.

Практическим подтверждением этому является тот факт, что при использовании инструмента проектируемого по обычной методике в процессах последовательной непрерывной штамповки (в штампах последовательного действия или на многопозиционных прессах) всегда получают годные детали.

3.4. Размеры и точность изделия при вытяжке с утонением и проталкиванием равностенной отожженной заготовки [10, 11, 12]. По напряженно-деформированному состоянию этот процесс вытяжки отличается от вытяжки с утонением наличием осевых сжимающих напряжений на верхней границе очага деформации.

3.4.1. Напряженно-деформированное состояние заготовки. Исследование влияния краевых условий выполнено на базе известного решения Е. А. Попова для вытяжки с утонением путем введения в основные решения краевых условий. В результате получаем осевое напряжение:

$$\sigma_z = \sigma_s \{ \ln(S_0/S) - a + \operatorname{tg}(\alpha/2) + (\mu/\alpha) * [1 - 0.5 * (\ln(S_0/S) - a)] * (1 - S/S_0) \} \quad (3.16)$$

где

$$\alpha / [\cos(\alpha/2)] = \{ \mu [2 - \ln(S_0/S) + a] (1 - S/S_0) \}^{1/2}, \quad (3.17)$$

при коэффициенте запаса пластичности λ процессе деформирования равно $b = 6 / \sigma_s$, получим:

$$\sigma_{\max} = \{ \ln(S_0/S) + \operatorname{tg}(\alpha/2) + (\mu/\alpha) * [1 - 0.5 * \ln(S_0/S)] (1 - S/S_0) \} : [1 - (\mu/2\alpha) * (1 - S/S_0)] \quad (3.18)$$

- относительная величина напряжения проталкивания, она ограничивается возможностью потери устойчивости заготовкой. Предельные напряжения потери устойчивости на основе данных из теории сопротивления материалов: - при упругом деформировании, ($l > 10d$):

$$\sigma_{кр}^y = E * [1 + (1 - S/D)^2] * [\pi D / (8 * \mu_{кр} * l)]^2, \quad (3.19)$$

- при пластическом деформировании ($l < 10d$):

$$\sigma_{кр}^n = \sigma_{нц}, \quad (3.20)$$

где $\sigma_{нц}$ - предел пропорциональности; S - толщина трубчатой заготовки с наружным диаметром D ; l - длина заготовки; $\mu_{кр}$ - коэффициент приведения длины заготовки, определяемый схемой закрепления, принимаемый в нашем случае равным 1. Коэффициент (напряжение) проталкивания; - при упругой потере устойчивости

$$\sigma_y = \sigma_{кр}^y / \sigma_s \quad (3.21)$$

- при пластической потере устойчивости

$$\sigma_n = \sigma_{кр}^n / \sigma_s \quad (3.22)$$

Предельная относительная длина проталкиваемой заготовки

при упругой потере устойчивости равна:

$$1_{\text{пр}}^y / D < (\pi/8) * \{(E/\sigma_{\text{кр}}^y) * [1 + (1 - S/D)^2]\}^{1/2} \quad (3.23)$$

и при пластической потере устойчивости равна:

$$1_{\text{пр}}^y / D < (\pi/8) * \{(E/\sigma_{\text{кр}}^n) * [1 + (1 - S/D)^2]\}^{1/2} \quad (3.24)$$

Оптимальные и взаимосвязанные условиями процесса угол матрицы и коэффициент проталкивания определяют при совместном решении выражений (3.17) и (3.18) с учетом (3.19) и (3.20).

3.4.2. Исследование образования точности размеров при вытяжке с утонением и проталкиванием. Здесь используем ранее представленные соотношения, определяющие точность образования размеров (3.1) – (3.10). Для этого случая отмечены характерные особенности образования размеров и точности: 1-с увеличением коэффициента проталкивания увеличиваются абсолютные величины систематических и случайных погрешностей при заданной степени утонения; 2-точность поперечных размеров изделий уменьшается с увеличением коэффициента проталкивания при заданной степени утонения; 3- предельное относительное отклонение размеров деталей при предельной степени утонения не превышает определенной величины. По сравнению с процессом вытяжки с утонением вытяжка с утонением и проталкиванием обеспечивает получение поперечных размеров деталей меньшей точности, как при проектировании инструмента по общепринятой методике, так и при использовании инструмента с корректировкой его размеров на величину систематических погрешностей.

3.4.3. Анализ результатов расчета. Представленные математические модели и расчетные данные позволяют установить следующие основные особенности вытяжки с утонением и проталкиванием.

Опустив особенности напряженно-деформированного состояния, на основе результатов исследования можно установить следующие характерные особенности. При заданном напряжении проталкивания деформация разгрузки в зависимости от степени утонения изменяется от положительных до отрицательных значений. Нулевая деформация разгрузки детали с увеличением напряжения проталкивания смещается в сторону больших степеней утонения. При больших коэффициентах проталкивания интервал изменения деформации разгрузки несколько увеличивается, однако, всегда меньше возможного предела упругости деформирования детали (σ_s/E). С увеличением коэффициента трения деформация разгрузки детали увеличивается, так как увеличиваются напряжения пластического деформиро-

вания.

Температура и температурная деформация увеличиваются почти прямо пропорционально увеличению степени утонения.

Оценим величину отклонения размеров деталей от размеров инструмента. Для этой оценки возьмем данные, определяющие деформации разгрузки при $a=0; 0,4$ и $0,8$ при $\mu=0,15$ и соответственно степени утонения 1,2 и 1,7; 1,2 и 2,2; 1,7 и 2,7. В таблице 4 представлены результаты оценки точности полученных отклонений размеров (в квалитетах) с учетом исключения упругих и температурных изменений размеров деталей. Приведенные в таблице 4 данные должны быть скорректированы на величину допустимого износа инструмента (ориентировочно можно считать: $0,006-0,004$ мм износа соответствуют изготовлению 1000 штук деталей). Следовательно, с учетом возможного рассеивания размеров деталей и из-

Таблица 4

a	S_0/S	Диаметр							
		6	10	30	50	80	120	250	500
0	1,2	01	0	2	3	3	4	5	6
	1,7	4	5	6	7	8	8	9	10
0,4	1,2	3	3	6	7	7	8	9	10
	2,2	5	5	7	8	9	9	10	11
0,8	1,7	3	3	5	6	7	7	8	9
	2,7	4	4	7	9	9	9	10	11

носом инструмента в допустимых пределах данные таблицы должны быть скорректированы в сторону уменьшения точности на 2-3 квалитета, т.е. получим точность деталей после вытяжки с утонением в пределах 6-9 квалитетов для диаметров до 50-80 мм.

Можно сделать также важные для технологии выводы. В том случае, когда точность изготавливаемых деталей не выше обычных значений, то при исключении систематических погрешностей, возможно расширение поля допуска на износ инструмента, что позволит получить без дополнительных затрат тысячи-десятки тысяч деталей, т.е. повысить стойкость инструмента.

2968451

3.4.4. Размер и точность изделий при вытяжке с утонением и проталкиванием равностенной заготовки без отжига.

Ранее представленные соотношения образования размеров и точности (3.1)–(3.10), а также рассеивания размеров остаются пригодными и здесь. Здесь возможно сравнение этого процесса с вытяжкой с утонением, но без проталкивания отожженной и неотожженной заготовки. Поэтому для вытяжки с утонением и проталкиванием неотожженной заготовки можно утверждать, что точность размеров по сравнению с точностью размеров при вытяжке с утонением и проталкиванием отожженной заготовки будет на 1–2 качества ниже для размеров 50–100 мм и материала латунь Л62 сталь 20, сталь 12Х18Н9. Остается и здесь справедливым замечание, что для получения более точных поперечных размеров изделий необходимо перед завершающей операцией заготовку отжигать.

3.5. Размеры и точность изделий при комбинированной вытяжке [18]. Напряженно-деформированное состояние при комбинированной вытяжке наиболее полно изучено С. А. Валиевым, наибольшая степень утонения в этом случае меньше, сжимающие пуансон и растягивающие матрицу напряжения меньше, чем при вытяжке с утонением. Формула для осевого напряжения вытяжки отличается от аналогичной формулы для вытяжки с утонением и проталкиванием только знаком перед коэффициентом a , который должен быть изменен на противоположный. Изменение толщины заготовки после вытяжки без утонения по высоте равно:

$$S_H = S_0 \cdot \exp(1/[1 - \delta_{s1}/\delta_{z1}]), \quad (3.25)$$

S_0 – толщина исходной заготовки; a – коэффициент, равный отношению напряжения вытяжки без утонения и напряжения течения при комбинированной вытяжке:

$$a = [\ln K + 0,2 \cdot K \cdot \mu \cdot (K - 1 - 18 \cdot K \cdot S_0 / D)] \cdot (1 + 1,6 \cdot \mu) / \\ / (1 + \ln(S_H / S_0) / [\ln K + \ln(S_0 / S_H)])^n \quad (3.26)$$

Расчет параметров упругого и температурного изменения поперечного размера изделия, выполняем по известным соотношениям (3.1)–(3.10) и (3.25), (3.26). Для расчета взята сталь 12Х18Н9 (табл. 2), все расчеты выполнены с учетом температурного изменения δ_s , n , E и μ в процессе вытяжки при коэффициенте вытяжки $k = 1,1; 1,2; 1,3; 1,4$, степени утонения $S_0/S = 1,15; 1,25; 1,45$ и коэффициенты трения с интервалами его изменения в процессе вытяжки равными: $\mu = 0,05 + 0,05; 0,15 + 0,05; 0,20 + 0,05; 0,25 + 0,05$; температурные изменения указанных величин приняты на основе данных А. В.

Третьякова и В. И. Гвозина, П. И. Полухина, Г. Я. Гуна и А. М. Галкина.

Из результатов теоретических исследований следует, что деформация разгрузки с учетом температурного изменения пластических (σ_s, n) и упругих (E, ν) характеристик штампуемого материала меньше деформации разгрузки, определенной без учета температурного изменения пластических и упругих характеристик штампуемого металла (σ_s, n, E, ν), что является следствием уменьшения деформирующих напряжений; также следует, что с увеличением интервала рассеивания коэффициента трения (от 0,05-0,05 до 0,15-0,05) значительно увеличивается величина и полоса рассеивания деформации разгрузки и поэтому снижается точность поперечных размеров детали. Установлено влияние механических свойств материала на величину и ширину полосы деформации разгрузки при одинаковых величинах коэффициента утонения, коэффициента вытяжки и интервала изменения коэффициента трения $\mu=0,15-0,05$. Выявлен характер влияния трения на величину и полосу рассеивания деформации разгрузки и размеров деталей, в частности, ширина полосы рассеивания деформации разгрузки увеличивается по зависимости, близкой к прямо пропорциональной.

В заключение отметим характерные особенности образования размеров деталей и расчета инструмента: 1-из-за повышения температуры деформируемого металла величина деформации разгрузки меньше той деформации разгрузки, которую можно было бы получить при неизменной температуре деформируемого металла; при увеличении степени утонения такое уменьшение становится больше; 2-с увеличением интервала рассеивания коэффициента трения ширина полосы рассеивания деформации разгрузки становится больше, а точность размеров-меньше; с увеличением коэффициента вытяжки и утонения рассеивание деформации разгрузки также увеличивается, а точности размеров-уменьшается; 3-с увеличением коэффициента вытяжки температурная деформация увеличивается, а с увеличением степени утонения температурная деформация прямо пропорционально увеличивается, точность деталей диаметром 6-500 мм из стали 12Х18Н9 при указанных параметрах-от 01 до 9 качества.

3.6. Порядок удаления из штампа и точность поперечных размеров детали. Обычная схема процесса-это вытяжка с утонением на провал со съемом изделия с пуансона при обратном ходе ползуна. В условиях массового производства возможна и вторая схема удаления изделия из штампа: выталкивание детали из матрицы вместе

с удаляющимся пуансоном. В этом случае сжимающее пуансон осевое усилие изменяется на растягивающее усилие, обусловленное силами выталкивания и трения между пуансоном, матрицей и заготовкой; его поперечный размер становится меньше исходного; при этом частично разгружается и матрица-уменьшается ее периметр. При обратном ходе диаметр пуансона и матрицы уменьшается, а деталь пластически деформируется: калибруется по наружному и внутреннему диаметру и толщине стенки. Эти параметры становятся более точными. Износ инструмента на этой операции увеличивается. Это отрицательное свойство такой схемы, но здесь есть и другие (кроме увеличения точности) положительные свойства-это увеличение производительности и отсутствие технологического комплекса калибровки.

3.7. Размеры и точность изделий и их элементов при вытяжке с утонением и различными крайевыми условиями. Обобщенная форма уравнений напряженно-деформированного состояния позволяет использовать единую математическую модель для описания вытяжки с утонением при наложении на торец заготовки сжимающих, растягивающих или нулевых напряжений-вытяжки с утонением, комбинированной вытяжки и отбортовки, вытяжки с утонением и проталкиванием. Это обеспечивает удобство решения всех технологических задач этого класса, причем для выбранного процесса необходимо ввести только нужную величину степени утонения с соответствующим знаком перед коэффициентом проталкивания. Аналогичные преимущества дает и математическая модель разгрузки при решении задачи на ЭВМ. Кроме указанных преимуществ единые математическая модель, алгоритм и программа позволяют также решить оптимизационную задачу по выбору процесса, обеспечивающего требуемую точность при наибольшей износостойкости инструмента.

Для вытяжки с утонением получены зависимости, позволяющие заранее определить с учетом условий процесса точность поперечных размеров деталей, повысить точность этих размеров за счет исключения систематических погрешностей или при обычных требованиях к точности-расширить интервал поля допуска на износ.

У вытяжки с утонением и проталкиванием и комбинированной выявлены особенности: при вытяжке с утонением и проталкиванием точность поперечных размеров деталей ниже, а при комбинированной вытяжке-выше, чем при вытяжке с утонением; для вытяжки с утонением и проталкиванием, комбинированной вытяжки и отбортов-

ки получены формулы для определения согласованных величин угла матрицы и напряжения проталкивания или натяжения.

Оптимизация параметров процесса позволяет получить минимальное рассеивание деформации разгрузки и наибольшую точность.

4. ОБРАЗОВАНИЕ И ТОЧНОСТЬ РАЗМЕРОВ ПРИ ОТБОРТОВКЕ [6, 19].

Здесь рассмотрим практически применяемые процессы: отбортовку, отбортовку со сжатием и комбинированную отбортовку.

4.1. Размеры и точность отбортованных элементов изделий. Отбортованные элементы деталей используют в основном для сопряжения их с другими деталями путем сварки или механического соединения. По данным С. А. Валиева точность при отбортовке соответствует ориентировочно 14 качеству. Теоретически и в этом случае также возможно оценить точность.

Приближенно считаем, что после снятия деформирующего усилия происходит полная разгрузка; напряжения разгрузки будут равны напряжениям, деформировавшим заготовку. Из-за незначительной величины нормальными напряжениями пренебрегаем, а деформация разгрузки и изменение диаметра горловины равны:

$$\epsilon_0 = (\sigma_0 - \nu \sigma_r) / E \quad \Delta D = \epsilon_0 \cdot D, \quad (4.1) \dots (4.2)$$

где D — диаметр отбортованного элемента; σ_0 , σ_r — окружное и меридиональное наибольшие напряжения пластического деформирования, определяемые на основе исследований Е. А. Попова.

Связь между расстоянием от точки сопряжения горловины с тороидальной частью и соответствующим ей диаметром на плоской заготовке по данным Е. А. Попова с точностью до 3% описывается выражением: $h_1 = (D - d_0^T) / 2 + r_m \cdot \pi / 2 - S \cdot \pi / 4$.

Для отбортовки заготовки пуансоном с криволинейным рабочим торцом, оформленным по трактрисе, влиянием изгибающих напряжений и трением на величину радиальных напряжений можно пренебречь, так как они будут составлять от величины напряжения отбортовки несколько процентов. Учитывая также то, что второй член в формуле (4.1) не превышает 7,5% пренебрежем и влиянием меридиональных напряжений на величину деформации разгрузки. При этом деформация разгрузки будет равна:

$$\epsilon_0 = \sigma / E [(e/n) \cdot \ln(D/d_0^T)]^n \quad (4.3)$$

где $d_0^T = d_0^c - D - r_m \cdot \pi - \pi \cdot S / 2 - 2 \cdot h_1$; r_m — радиус рабочей кривой матрицы (0,5...2, S) и при $h_1 = 0$ у точки сопряжения горловины с тороидальной частью $d_0^c = D - \pi \cdot r - \pi \cdot (S/2)$.

Из формул (4.3) и (4.2) можно установить, что значительное

влияние на уменьшение диаметра отбортованного элемента при разгрузке происходит с увеличением коэффициента упрочнения n и соотношений b_b/E и D/d_0^T ; незначительное влияние относительных величин радиуса и толщины материала r_n/D , S/D . Из этих формул также следует, что при отбортовке в одном штампе деталей из различных материалов или штамповке деталей из материала в состоянии поставки или предварительно деформированного (например, отбортовка после вытяжки) будем получать различную точность размеров отбортованного элемента детали.

Расчет по формулам (4.3) и (4.2) позволяет получить фактический наименьший размер детали по сравнению с размером инструмента (пуансона) в процессах отбортовки; при коэффициенте отбортовки равном 0,7 и рабочей кромке пуансона очерченной по трактрисе ($b_{изг} = 0$) при номинальных размерах отбортованных элементов от 6 до 500 мм для деталей, изготовленных из стали 20 получают размеры соответственно в пределах от 8 до 14 качества, для деталей из стали 12X18H9T - от 9 до 15 качества и для латуни Л63 - от 9 до 16 качества.

Из формулы (4.3) также следует, что деформация разгрузки с удалением от торца отбортованного элемента уменьшается и это обуславливает погрешность формы типа конусность. Наибольшая величина этой погрешности определяется разностью окружающих деформаций у торца борта ϵ_T и в зоне сопряжения с радиусом ϵ_c :

$$\Delta d_p = \epsilon_\phi * D, \quad \epsilon_\phi = \epsilon_T - \epsilon_c = (b_b/E) * [(e/n) * \ln(d_0^c/d_0)]^n \quad (4.4)$$

Из первой формулы (4.4) следует прежде всего, что погрешность отбортованного элемента детали типа "конусность" увеличивается с увеличением высоты этого элемента.

Возможное отклонение размера при отбортовке также обусловлено некоторым изменением механических характеристик материала детали. На основе этого определим интервал рассеивания размеров. Для сокращения объема вычислений используем матрицу сочетаний параметров, определяющих максимальные и минимальные деформации разгрузки также, как это было сделано и предыдущих случаях (табл. 1).

Расчет на максимум и минимум деформации и изменения размера при разгрузке показывает, что предельные отклонения размеров, вызванные изменением механических характеристик материала с учетом погрешности формы типа "конусность", определенные по формулам (4.4), могут в среднем отличаться от номинальных раз-

меров отбортованных элементов, определенных по формулам (4.3) и (4.2) на один квалитет. Эти расчеты были проведены для сталей 20, 12Х18Н9 и латуни Л63 для размеров от 6 мм до 500 мм. Ширину поля рассеивания размера в этом случае определяют по формуле:

$$\Delta d_p = (\epsilon_{\phi}^{\max} - \epsilon_{\phi}^{\min}) \cdot D \quad (4.5)$$

Следовательно, размеры отбортованных элементов при создании инструмента с размерами, соответствующими номинальным размерам отбортованных элементов, будут соответствовать 9..17 квалитетам при изготовлении деталей из сталей 20, 12Х18Н9 и латуни Л63. При исключении систематических погрешностей, определяемых деформацией разгрузки, точность поперечного размера детали увеличивается на 1..2 квалитета и для указанных материалов и размеров соответствует 8...15 квалитету. Диаметр инструмента-пуансона в этом случае равен:

$$d_n = d / (1 - \epsilon_0) \quad (4.6)$$

Полученные соотношения позволяют определить точность размеров детали при отбортовке и размеры формообразующих элементов инструмента. Данная методика предназначена для расчета исполнительных размеров формообразующих элементов инструмента и позволяет изготавливать детали, удовлетворяющие 8..15 квалитетам с диаметром от 6 до 500 мм из сталей 20 и 12Х18Н9 и латуни Л63.

4.2. Точность размеров детали при отбортовке со сжатием по периметру отверстия в заготовке. Напряженно-деформированное состояние при отбортовке со сжатием по периметру отверстия деформируемой заготовки изменяется только в зоне сжатия, ширина которой равна примерно одной толщине, и становится не плоским одноименным с растягивающими радиальными и окружными растягивающими напряжениями, а объемным со сжимающими осевыми и двумя другими растягивающими напряжениями. Условие пластичности при этом по Треска-Сен-Венану - $\sigma_s = \sigma_0 - \sigma_z$.

Из-за небольшой величины сжимающего напряжения, которая согласно данным работы Жвик-Ворончихина находится в пределах ~10% напряжения течения металла, можно с уверенностью утверждать, что изменение размера в этом случае такое же, как и ранее. Действительно, в скобках формулы (2.3) для края горловины второй член разности будет с плюсом и равен 0,03; это составляет около 3% величины отклонения размера при обычной отбортовке.

4.3. Образование и точность размеров при комбинированной отбортовке. Основы анализа напряженного и деформированного состо-

яния отбортовки и вытяжки с утонением разработаны Е.А. Поповым. Предпосылки анализа комбинированной отбортовки также представлены в работе С.А. Валиева. Для сохранения единства в анализе процессов точности образования размеров будем ориентироваться на нашу методику, изложенную в работе для вытяжки с утонением и проталкиванием. При комбинированной отбортовке на верхней и нижней границах очага деформации утонения заготовки, как и при комбинированной вытяжке, действуют растягивающие напряжения. Величина этих напряжений зависит от коэффициента отбортовки, коэффициента трения, угла конусности матрицы. Здесь необходимо также учитывать непостоянство толщины отбортованного элемента по высоте, которая равна:

$$S_n = S_0 (2\rho_n/D)^N, \quad (4.7)$$

где $N = [(2\rho_n/D) - 1/K] / [(\rho_n/D) + 1/K]$; ρ_n - текущий радиус заготовки; R_0 - радиус борта детали, равный $R_0 = D/2$, $K = d_0/D$ - коэффициент отбортовки; d - диаметр отверстия; α - коэффициент натяжения, определяемый отношением меридиональных напряжений отбортовки и натяжения течения комбинированной отбортовки:

$$\alpha = (1 + \mu_s \cdot \operatorname{tg} \alpha) \ln(D/d_k)^2 / \ln[(D \cdot S) / (d_k \cdot S_n)], \quad (4.8)$$

μ - коэффициент трения; α - угол конусности матрицы.

Радиальное, сжимающее пуансон, и окружное напряжения равны:

$$\sigma_0 = \sigma_{22} - \sigma_{32}, \quad \sigma_\phi = \sigma_{22} + 0,5 \cdot \sigma_{32} \quad (4.9) \dots (4.10)$$

Деформационные параметры разгрузки и температурного изменения поперечных размеров детали принимаем по (3.1) ... (3.10).

На основе выше приведенных теоретических данных были выполнены необходимые расчеты. Расчеты выполнены при коэффициентах отбортовки $K = 0,85; 0,75$ по всей высоте борта при $\rho_n/R_0 = 0,8; 0,75; 0,7; 0,6$ в зависимости от утонения ($S_n/S = 1,25; 1,75; 2,25$). Относительная величина меридионального растягивающего напряжения при отбортовке (4.8) и коэффициента натяжения находится для всех случаев расчета в пределах $0,0002 \dots 0,0006$.

При анализе установлено: влияние меридионального напряжения отбортовки на точность образующегося размера практически не проявляется; с увеличением коэффициента трения и степени утонения увеличивается рассеивание размеров и снижается точность размеров; при степени утонения примерно $1,37 \dots 1,43$ размеры деталей совпадают с размерами пуансона; эту особенность образования размера и точности можно использовать для расчета пуансона завершающих операций точной комбинированной отбортовки без

выполнения расчетов; изменение деформации разгрузки и поперечного размера по высоте борта незначительно, поэтому нет необходимости выполнять каждый раз расчеты по определению изменения поперечного размера борта по его высоте, достаточно это сделать для одного из сечений по высоте борта; с увеличением коэффициента утонения увеличивается деформация разгрузки, с увеличением коэффициента отбортовки увеличивается рассеивание деформации разгрузки и размеров.

Результаты исследования позволяют проектировать инструмент для изготовления более точных деталей или увеличить его износостойкость.

5. ТОРОИДАЛЬНЫЕ КООРДИНАТЫ В АНАЛИЗЕ ОПЕРАЦИЙ ШТАМПОВКИ.

Здесь на основе теории криволинейных, ортогональных координат разработаны уравнения равновесия и деформаций в тороидальных координатах [8], которые использованы для определения напряженно-деформированного состояния при обратной вытяжке. Полученные выражения учитывают влияние всех факторов, а формула для осевого напряжения не сложнее соответствующей формулы для (прямой) вытяжки и отличается от известной формулы Л. А. Шофмана для обратной вытяжки отсутствием рекомендуемых коэффициентов. Для решения в этом случае не использовали функции комплексного переменного, а применение тороидальных координат позволило без трудностей при анализе процесса деформирования постепенно переходить с одного к другому участку обрабатываемой заготовки: кольца, тора, "цилиндра-конуса", тора и круга. Разработана методика определения деформации разгрузки и точности при обратной вытяжке. В частности, здесь выделены три характерных участка разгрузки: 1-участок, формируемый при стационарном очаге деформации, 2-участок, формируемый при нестационарном очаге деформации, 3-участок, формируемый при действии сжимающих напряжений у открытого торца. Наибольшее рассеивание размеров обусловлено деформацией разгрузки на первом и третьем участках, причем на первом участке-наименьшей, а на третьем-наибольшей ее величиной; получены выражения для определения поля рассеивания при наибольшем и меньшем, чем наибольший, коэффициенте вытяжки; при наибольшем коэффициенте вытяжки деформация рассеивания равна:

$$\Delta = (\sigma_{сн}^{нб} / E_{нм}) * [1 - \nu_{нм} * \sigma_{сн}^{нм} * E_{нм} / (\sigma_{сн}^{нб} * E_{нб})], \quad (5.1)$$

где $\sigma_{сн}^{нб}$, $\sigma_{сн}^{нм}$ - наибольшая и наименьшая величина напряжения текучести; $E_{нм}$, $E_{нб}$ - наименьшая и наибольшая величина модуля Юнга;

$\nu_{\text{нн}}$ - наименьшая величина коэффициента Пуассона.

Оценка точности деталей диаметром от 3 до 500 мм вытягиваемых из стали 20 при наибольшем осевом напряжении течения и исключении систематических погрешностей позволила установить, что точность размеров соответствует при диаметре от 3 до 500 мм - 7-14 качеству, из латуни Л63 - 7-15 качеству, из бронзы БрБ2 - 9-16 качеству, из стали 12Х18Н9 - 8-15 качеству. При проектировании рабочих частей инструмента по общеизвестной методике получают точность в среднем на два качества ниже.

6. КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ШТАМПОВКЕ НА ПРЕССАХ С ОТКРЫТОЙ СТАНИНОЙ [5, 13, 15, 17]. Ранее исследовали влияние элементов технологической системы на стойкость штампов А. Г. Овчинников, Е. Н. Ланской, А. Б. Абашкин и В. П. Кокоулин, З. Марчиняк, М. Е. Зубцов и В. Д. Корсаков, Д. А. Вайнтрауб, Ф. П. Михаленко, Н. С. Бишневским. Однако, есть еще один путь увеличения стойкости штампов и повышения точности изделий.

В процессе работы станина пресса с открытой станиной деформируется так, что ось давления ползуна наклоняется к оси давления штампа под углом γ , центр давления ползуна у нижнего торца направляющих смещается от штамповщика на величину Δ , а закрытая высота увеличивается на h . При этом оси давления штампа и ползуна пресса пересекаются в некоторой точке в пределах закрытой высоты пресса. В соответствии с этим при длине, например, вырубного пуансона большей, чем расстояние до точки пересечения осей давления штампа и пресса, пуансон будет "врубаться" в матрицу со стороны близкой к штамповщику, а при меньшей его длине - со стороны близкой к станине пресса, и только при длине пуансона, соответствующей точке пересечения осей давления штампа и ползуна пресса, а также высоте матрицы, соответствующей точке пересечения этих осей, центры давления матрицы и пуансона будут совпадать и зазор между матрицей и пуансоном будет практически равномерным. При креплении штампа к ползуну через жесткий хвостовик "длина" пуансона и "высота" матрицы равны:

$$H_{\text{п}} = \Delta / \sin \gamma + L, \quad H_{\text{м}} = H_0 - \Delta / \sin \gamma \quad (6.1)$$

где L - расстояние от нижнего торца направляющих ползуна до верхней плиты штампа в рабочем состоянии; H_0 - закрытая высота пресса в рабочем состоянии.

"Длина" пуансона и "высота" матрицы определена и для дру

гих типов хвостовиков: ломающихся с неподвижной и подвижной шаровой опорой скольжения и качения, а также для хвостовика с двумя сферическими опорами. Установлено, что наименьшая длина пуансона будет при использовании хвостовика с двумя сферическими опорами, несколько большая — при ломающемся хвостовике с опорой качения, затем — при ломающемся хвостовике с опорой скольжения, затем — при ломающемся хвостовике с неподвижной опорой и наибольшая — при креплении штампа через жесткий хвостовик.

Припуск на переточку пуансона и матрицы определяем на основе допустимой ассиметрии зазора между пуансоном и матрицей. Для разделительных штампов допустимую ассиметрию зазора можно определить как разность между оптимальными максимальным и минимальным зазорами, в формоизменяющих штампах — на основе допустимой величины несоосности наружного и внутреннего контура изделия. Пусть допустимая ассиметрия зазора равна Δz , тогда припуск на переточку штампа равен:

$$\Delta H = \Delta z / \sin \gamma \quad (6.2)$$

При равномерном износе пуансона и матрицы и любом типе хвостовика, кроме жесткого, фактическая осевая длина пуансона и высота матрицы могут изменяться в пределах

$$H_{\text{пф}} = H \pm \Delta H / 4, \quad H_{\text{мф}} = H_{\text{м}} \pm \Delta H / 4 \quad (6.3)$$

Назначение осевых размеров пуансонов и матриц обеспечивает достижение стабильной стойкости штампов (и точности деталей) в пределах 70–100 тысяч штамповок.

При комбинированной последовательной штамповке с выполнением разделительных и формоизменяющих переходов обычно, еще до получения первой детали пуансон вырубки "врубается" в матрицу и выходит эта позиция штампа из строя. Для обеспечения нормальных условий работы инструментов разделительных переходов разработана конструкция штампа с жестким хвостовиком, направляющими колечками и втулками у всего блока, в котором выделены в отдельные блоки инструменты разделительных переходов со своими направляющими элементами, причем эти блоки соединены через плавающие подпятники и грибковые элементы с общим блоком штампа, а для совмещения центра давления пресса с центром давления штампа перед началом работы разделительных переходов в конструкции штампа введены уравниватели, обеспечивающие правильную ориентировку разделительных инструментов перед началом их работы. Такое решение позволяет довести стойкость штампа до норми-

рованной величины (60-90 тыс.); это подтверждает опыт Московского завода электровакуумных приборов.

Общие выводы и рекомендации по работе.

1. На основе выполненных исследований даны научно-основанные технологические решения, состоящие в возможности определения, повышения и получения заданной точности штампуемых деталей, внедрение которых ускоряет научно-технический прогресс в технологии штамповки деталей из листовых материалов, обеспечивающие повышение производительности, снижение брака при сборке, себестоимости деталей и собранных изделий, а также повышающие ресурс работы и улучшающее качество и надежность систем управления летательными аппаратами.

2. Разработана методика анализа напряженно-деформированного состояния вытяжки с утонением и проталкиванием и обратной вытяжки; для обратной вытяжки были созданы уравнения равновесия и деформаций в тороидальных координатах. Это позволило поучить расчетные зависимости и уточнить напряженно-деформированное состояние заготовки и граничные условия для расчета и выбора режимов деформирования, обеспечивающих заданную точность штампуемых деталей.

3. Разработана методика расчета точности поперечных размеров деталей при вытяжке с утонением, вытяжке с утонением и проталкиванием, комбинированной вытяжке, обратной вытяжке, отбортовке и отбортовке со сжатием по периметру отгтерстия, комбинированной отбортовке в зависимости от степени деформации, механически: характеристик материала и его состояния, вида и схемы процесса формообразования, трения, температуры заготовки и инструмента, геометрических параметров осесимметричных деталей. Согласно расчетам получены следующие данные: при обратной вытяжке заготовки постоянной толщины по высоте детали из стали 12Х18Н9 с коэффициентом вытяжки от 2 до 1,5 и известной методике проектирования диаметром 3 мм получают 9-квалитет, 30-80 мм -12-14 квалитет, 180-500 мм -15-16 квалитет точности. При вытяжке с утонением отожженной заготовки постоянной толщины по высоте из стали 12Х18Н9 со степенью утонения 1,2 диаметром 6 мм получают 2 квалитет, 30-80 мм -5-7 квалитет, 250-500 мм -8-9 квалитет точности; при вытяжке со степенью утонения 1,7 и диаметре 6 мм получают 4 квалитет, 30-80 мм -6-8 квалитет.

250-500 мм - 9-10 квалитет точности. При использовании латуни Л63 и бронзы БрБ2 точность деталей ниже на 1-2 квалитета, при вытяжке с утонением заготовок неодинаковой толщины по высоте (полученных вытяжкой) точность снижается на 2-3 квалитета, при вытяжке неотожженной заготовки (после вытяжки) точность также на 2-3 квалитета ниже, чем при вытяжке отожженной заготовки.

4. Методика расчета позволила при исключении систематических погрешностей повысить точность деталей на 2-3 квалитета при выполнении любых вышеуказанных процессов; это снизило трудоемкость и себестоимость. Согласно расчетам при изготовлении из стали 12Х18Н9 обратной вытяжкой с коэффициентом вытяжки от 2 до 1,5 (коэффициент трения равен 0,05) получают точность деталей диаметром 3 мм соответствующую 7-6 квалитету, 30-80 мм - 9-11 квалитету, 180-500 мм - 12-14 квалитету; при изменении коэффициента трения от 0,05 до 0,3 и предельном напряжении вытяжки (коэффициент вытяжки изменяется при этом от 2 до 1,5) получают точность при диаметре 3 мм - от 7 до 6 квалитета, 30-80 мм - 11-9 квалитета, 180-500 мм - 11-14 квалитета; при изготовлении деталей из бронзы БрБ2 и латуни Л63 точность снижается на 1-2 квалитета. При вытяжке деталей, изготовленных из сталей 12Х18Н9 и 20 и заготовок одинаковой толщины по высоте со степенью утонения 1,2 диаметром 6 мм получают 01 квалитет точности, 30-80 мм - 2-3 квалитет, 250-500 мм - 5-6 квалитет и при степени утонения 1,7 для детали диаметром 6 мм - 4 квалитет, 30-80 мм - 6-8 квалитет, 250-500 мм - 9-10 квалитет. При вытяжке с утонением и проталкиванием со степенью утонения 1,2 детали из стали 12Х18Н9 диаметром 30-80 мм получают 6-7 квалитет, 250-500 мм - 9-10 квалитет и при степени утонения 2,2 детали диаметром 6 мм - 5 квалитет, 30-80 мм - 7-10 квалитет, 250-500 мм - 10-11 квалитет точности. При комбинированной вытяжке с коэффициентом вытяжки 1,2 и степенью утонения 1,2 детали из стали 12Х18Н9 диаметром 30-80 мм получают 4-6 квалитет, 250-500 мм - 8-9 квалитет точности и при коэффициенте вытяжки 1,4, степени утонения 1,4, диаметре 30-80 мм получают 5-7 квалитет, 250-500 мм - 8-9 квалитет точности. При отбортовке и отбортовке со сжатием по периметру отверстия, коэффициенте отбортовки 2 детали из стали 12Х18Н9 диаметром 6 мм получают 5 квалитет, 30-80 мм - 9 квалитет, 250-500 мм - 11-12 квалитет точности, а при использовании бронзы БрБ2 и ла-

туни Л63 получают точность соответственно на 1-2 качества более высокую. При комбинированной отбортовке с коэффициентом отбортовки 1,18 и степени утонения 2 у детали из стали 12Х18Н9 диаметром 30 - 80 мм получают 4 качество, 250-500 мм - 6-7 качество точности.

5. Методика также позволяет оптимизировать процесс вытяжки с утонением так, чтобы точность поперечных размеров изготовленных деталей была наибольшей; в этом случае оптимальная степень утонения не минимальная, а изменяющаяся в небольшом интервале у центра группирования со степенью утонения 1,5. Центр группирования в зависимости от условий на верхней границе очага деформации смещается: при отрицательных напряжениях и увеличении их абсолютной величины - в сторону больших степеней утонения, при положительных напряжениях и их увеличении - в сторону меньшей степени утонения и в этом случае возможно его значение равно минимальной степени утонения. Последнее особенно важно для обеспечения минимальных трудоемкости и себестоимости детали. Оптимизация выполняется на основе минимизации интервала рассеивания деформации разгрузки в процессах штамповки с различным напряженным состоянием в очаге деформации.

6. В случаях, когда не требуется высокая точность изготовления деталей, исключение систематических погрешностей при установлении оптимальных режимов вытяжки с утонением обеспечивает расширение поля допуска на износ, что повышает стабильность размеров деталей и увеличивает число деталей, изготовленных на штампе на единицу-сотни тысяч штук (без дополнительных затрат на инструмент) в зависимости от диаметра. Это также способствует уменьшению трудоемкости и себестоимости изготовления деталей; например, в гильзовом производстве.

7. Для штампов, установленных на прессы с открытой станиной, создана методика расчетов, обеспечивающая совпадение центров давления рабочих торцев пуансонов и матриц, повышение стойкости штампов и стабильность размеров деталей. В раздельных штампах стойкость повышается в 2-8 раз. Также создана методика проектирования штампов последовательного действия, содержащих раздельные и формообразующие переходы, обеспечивающая их нормальную стойкость путем создания условий для силовой развязки наименее стойких групп пуансонов и матриц.

8. Разработаны новые необходимые элементы расчета штампов:

1-расчета исполнительных размеров инструмента для изготовления деталей заданной точности или расширения поля допуска на износ; 2-расчета "длины" пуансона и "высоты" матрицы для штампов с различными типами хвостовиков; 3-определение напряжения проталкивания и соответствующего ему угла конуса матрицы.

9. Представленные в работе технологические процессы и конструктивные решения используются на заводах и при этом получено увеличение точности в два раза, стойкости инструмента в 1,8 раза, в гильзовом производстве получено снижение затрат-16 рублей (1986 г.) на 1000 штук деталей, повысилась производительность труда. На способ повышения точности и конструктивные решения получены 3 авторских свидетельства и патента на изобретения. Основные результаты работы используются в лекциях и в учебнике для специальности 05.03.05 "Автоматизация и технология холодной штамповки", принятом издательством "Машиностроение" к опубликованию.

Основные положения диссертации изложены в работах:

1. Ковалев В.Г. Полнее указывать механические характеристики металлов // Стандарты и качество. - 1969. - N 7. - С. 68.

2. Ковалев В.Г. Расчет размеров пуансонов и матриц при вытяжке деталей повышенной точности // Конструкции штампов листовой штамповки: Материалы семинара МДНТП им. Ф.И. Дзержинского. - М., 1976. - С. 157...165.

3. Ковалев В.Г. Повышение точности пластин магнитопроводов электромикромашин // Технология производства элементов автоматических устройств: Материалы семинара МДНТП им. Ф.И. Дзержинского. - М., 1976. - С. 74...75.

4. Ковалев В.Г. О габаритах, определяющих точность размеров деталей при вытяжке листового металла // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. - 1980. - N 322. - С. 20...33.

5. А.С. N 11855717 СССР, МКИ В 21 D 37/00. Узел крепления штампа к ползуну прессы /В.Г. Ковалев, П.В. Сыроватченко// Открытия, изобретения. - 1985. - N 28.

6. Ковалев В.Г. Поперечные размеры отбортованных элементов // Изв. вузов. Машиностроение. - 1988. - N 8. - С. 103...106.

7. Ковалев В.Г. О точности поперечных размеров при вытяжке с утонением // Вестник машиностроения. - 1989. - N 11. - С. 142...146.

8. Ковалев В.Г. Уравнения равновесия в тороидальных координатах // Изв. вузов. Машиностроение. - 1982. - N 11. - С. 142...146.

9. Ковалев В. Г., Соловьев В. М. Особенности вытяжки с утонением и проталкиванием // Передовой производственный опыт. - 1990. - № 11. - С. 6...8.

10. Ковалев В. Г., Соловьев В. М. Особенности образования поперечных размеров деталей при вытяжке с утонением и проталкиванием // Передовой производственный опыт. - 1990. - № 11. - С. 8...10.

11. Ковалев В. Г., Соловьев В. М. Вытяжка с утонением и проталкиванием и относительная длина заготовки // Вестник машиностроения. - 1993. - № 4. - 56-58.

12. Ковалев В. Г. К определению поперечных размеров при вытяжке с утонением и проталкиванием // Вестник машиностроения. - 1992. - № 5. - С. 63...65.

13. Авторское свидетельство № 1690912 (СССР) от 01.09.1989. МКИ 5 В21Д 37/00. Заявл. 01.09.1989. Способ повышения стойкости штампов / Ковалев В. Г., Сыроватченко П. В. // Открытия, изобретения. - 1991. - № 42.

14. Разработка математической модели и алгоритма лервой вытяжки и вытяжки с утонением и повышения стойкости разделительных штампов: Научно-технич. отчет по теме Л070389/МГТУ им. Н. Э. Баумана. ГРН 01.9.10.045483, инв. №02.9.10.043820. Рук. темы Ковалев В. Г. - М., 1990. - 83 с.

15. Патент РФ 20.6687. МКИ 5 В21 D37/00. Заявка 92-014839/27/061437 от 29.12.1992. Штамп последовательного действия / В. Г. Ковалев, В. В. Ковалев // Изобретения. - 1994. - № 19.

16. Ковалев В. Г. Изготовление заготовок и деталей приборов обработкой давлением // Справочник технолога-приборостроителя. В 2-х т. / Под ред. П. В. Сыроватченко. - М.: Машиностроение. 1980. - Т. 1. - С. 184-252.

17. Ковалев В. Г. Хвостовик штампа с двумя сферическими опорами // Кузнечно-штамповочное производство. - 1992. - № 8. - С. 2...3.

18. Ковалев В. Г., Соловьев В. М. О точности при комбинированной вытяжке // Вестник машиностроения. - 1994. - № 6. - С. 37-39.

19. Ковалев В. Г., Соловьев В. М. О точности при комбинированной отбортовке // Вестник машиностроения. - 1994. - № 9. - С. 39-41.

20. Попов Е. А., Ковалев В. Г. Кованные и штампованные заготовки // Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. - М.: Машиностроение. 1985. - Т. 1. - С. 134-168.