На правах рукописи

УДК 621.735.016.3:621.979.134.

АНТОНЮК ФЕЛИКС ИВАНОВИЧ

АНАЛИЗ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ НА ПРЕССАХ НАУЧНО ОБОСНОВАННЫМ ВЫБОРОМ ЖЕСТКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Специальность 05.03.05 – Технология и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2004

КФ МГТУ

Работа выполнена в Калужском филиале Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Научный консультант –	доктор технических наук, профессор Е.Н. Ланской
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор А.Г. Овчинников доктор технических наук, профессор В.А. Головин доктор технических наук, профессор Е.Н. Сосенушкин
Ведущее предприятие –	ФГУП «Калужский завод телеграфной аппаратуры»

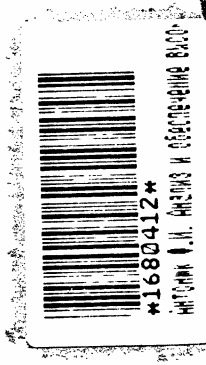
Защита состоится "20" X 2004г. в 14[80] часов на заседании диссертационного совета Д.212.141.04 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана. тел. 267-09-63

Автореферат разослан "08" IX 2004г.

Ученый секретарь диссертационного совета к.т.н., доцент — Семенов В.И.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из основных источников роста экономической эффективности машиностроительного производства и повышения конкурентоспособности его продукции является применение заготовок, у которых форма, размеры и качество поверхности максимально приближены к деталям. Этому требованию удовлетворяют поковки, изготовленные различными операциями холодной объемной штамповки (ХОШ). Их применение позволяет повысить коэффициент использования материала до 90...95% и значительно, в 3...5 раз уменьшить трудоемкость последующей обработки резанием. В процессе выполнения операций ХОШ диаметральным размерам поковок обеспечивают точность 8...9 квалитета, а высотным – на 4...6 квалитета грубее. В первом случае точность соответствует точности сопрягаемых размеров, поэтому в большинстве случаев, в частности для поковок из цветных сплавов, не требуется дальнейшая обработка. Во втором, для повышения точности высотных размеров последующая обработка резанием необходима. Это обстоятельство, как свидетельствует опыт большого числа предприятий, приводит к росту себестоимости, снижению производительности труда и, в итоге, к существенному снижению эффективности применения ХОШ. Таким образом, повышение точности высотных размеров поковок с целью исключения или значительного сокращения объема обработки резанием позволяет в полном объеме реализовать преимущества ХОШ и значительно повысить экономическую эффективность производства. Однако, имеющиеся научно-производственные данные, относящиеся к указанной проблеме, не позволяют обоснованно назначать точность высотных размеров поковок из-за противоречий и расхождений в рекомендациях, отсутствия конкретных данных об условиях, при которых возможно достижение требуемой точности. Для успешного решения проблемы повышения точности высотных размеров поковок в процессе их деформирования необходимы системные знания всех факторов, определяющих указанную точность. В первую очередь это предполагает наличие расчетно-аналитической методики, которая должна иметь конечной целью не только получение надежного численного результата ожидаемой погрешности, но и, прежде всего, раскрытие механизма управления точностью.

В связи с этим, исследования, направленные на разработку возможных путей повышения размерной точности поковок, изготавливаемых ХОШ на прессах, являются актуальными и могут быть отнесены к решениям, которые вносят значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса.

Цель работы. В представленной работе была поставлена цель обосновать возможные пути повышения точности ХОШ на прессах на основе разработанной методики, позволяющей учесть влияние на точность высотных размеров поковок всех элементов технологической системы: жесткости пресса со штампом, жесткости штампуемых поковок, особенностей технологической операции, а также характера действующих исходных погрешностей.

Достижение поставленной цели связано с решением следующих задач:

1. Разработать методику, позволяющую на основе анализа влияния всех элементов технологической системы (ТС) пресс-штамп-поковка определить возможные пути повышения точности высотных размеров поковок с учетом особенностей

им. И. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

технологических операций.

2. Установить на основе предложенной методики доминирующие случайные и систематические погрешности, влияющие на точность высотных размеров поковок при выполнении операций осадки-калибровки, обратного выдавливания стаканов и штамповки в закрытых штампах.

3. Установить на основе разработанной методики характер влияния жесткости системы пресс-штамп и жесткости штампуемых поковок на погрешность их высоты, обусловленную действием случайных и систематической погрешности наладки.

4. На основе реализации многофакторных экспериментов определить влияние погрешностей исходных заготовок и технологического процесса, а также жесткости системы пресс-штамп на погрешность высотных размеров поковок в зависимости от их жесткости при выполнении различных технологических операций ХОШ.

5. Выполнить сравнительный анализ точности высотных размеров поковок, штампуемых на универсальных кривошипных прессах, более жестких специальных для холодного выдавливания или чеканки, а также на универсальных прессах с применением упоров.

6. Определить условия эффективного использования номинальной силы кривошипного пресса, исключающие его возможную перегрузку по этому параметру, с учетом совместного влияния случайных погрешностей и систематической погрешности наладки.

7. Разработать аналитические зависимости для расчета технологических параметров, обеспечивающих повышение точности высоты поковок, штампуемых в закрытых штампах, путем введения дополнительного перехода.

Научная новизна диссертационной работы заключается:

- в разработанной методике анализа и расчета точности операций ХОШ. Критериями оценки точности являются коэффициенты преобразования исходных погрешностей в погрешность высоты поковок, отражающие функциональную связь жесткости пресса со штампом и жесткости штампуемых поковок, что позволяет определить степень и характер влияния этих элементов ТС, а также случайных и систематической погрешности на погрешность высотных размеров поковок;
- в установленном с применением коэффициентов преобразования балансе доминирующих случайных и систематической погрешностей высоты поковок с учетом влияния их жесткости и жесткости системы пресс-штамп при выполнении операций осадки-калибровки, обратного выдавливания стаканов и штамповки в закрытых штампах;
- в полученных на основе многофакторных экспериментов опытно-статистических моделях точности высотных размеров поковок и выявленых на их основе с помощью дисперсионного и регрессионного анализов факторов управления указанной точностью при осадке-калибровке, обратном выдавливании и штамповке в закрытых штампах;
- в разработанных с применением коэффициентов преобразования зависимостях, позволивших выполнить сравнительный анализ точности высотных размеров поковок, штампуемых на универсальных прессах, более жестких специальных для холодного выдавливания или чеканки, а также на универсальных с применением

упоров;

- в разработанных с помощью коэффициентов преобразования функциональных зависимостях, устанавливающих условие, при котором обеспечивается эффективное использование номинальной силы кривошипного пресса, исключающее его возможную перегрузку по этому параметру, с учетом действия случайных погрешностей и погрешности наладки;
- в разработанных функциональных зависимостях для определения возможности повышения точности высоты поковок, штампуемых в закрытых штампах, введением дополнительного перехода, на котором высокая точность высоты обеспечивается уменьшением их жесткости.

На защиту выносятся следующие основные положения работы.

1. Методика анализа и расчета точности высотных размеров поковок, изготавливаемых ХОШ, основанная на математическом моделировании совместной деформации упругих и пластических звеньев технологической системы пресс-штамп-поковка с учетом особенностей технологических операций и характера действующих погрешностей.
2. Результаты анализа точности высотных размеров поковок, изготавливаемых осадкой-калибровкой, обратным выдавливанием и штамповкой в закрытых штампах с учетом действующих погрешностей.
3. Результаты анализа позволяющие выявить факторы, влияющие на точность операций осадки-калибровки, обратного выдавливания стаканов и штамповки в закрытых штампах, с помощью экспериментально-статистических моделей, построенных по результатам многофакторных экспериментов с применением регрессионного и дисперсионного анализов.
4. Методика выбора кривошипного пресса по критерию точности штампуемых поковок с обеспечением рациональных условий его эксплуатации.
5. Результаты сравнительного анализа точности поковок, штампуемых на универсальных прессах, более жестких специальных и на универсальных прессах с применением жестких упоров.
6. Результаты теоретических и экспериментальных исследований повышения точности высоты поковок, штампуемых в закрытых штампах, введением дополнительного перехода.
7. Разработанные технологические и технические решения, позволяющие повысить точность высотных размеров поковок.

Практическая ценность работы состоит в следующем.

1. В повышении точности высотных размеров штампуемых поковок на 3…5 квалитета точности, что позволяет снизить себестоимость продукции и повысить эффективность ХОШ.
2. В применении разработанной методики для расчета точности ХОШ, которая позволяет определить возможные пути ее повышения с учетом особенностей технологических операций и жесткости штампуемых поковок.
3. В применении методики прогнозирования достижимой точности, что позволяет снизить трудоемкость и ускорить технологическую подготовку производства.

Результаты диссертационной работы реализованы:

- в виде технологических процессов изготовления деталей контактной группы энергетических установок и высоковольтных аппаратов, штампуемых в закрытых

штампах, при обеспечении точности их высотных размеров по 12 квалитету точности на электротехническом заводе (г. Калуга) и на предприятии ОАО Ровенский радиозавод;

- в виде реализованных малоотходных технологических процессов обратного выдавливания гаммы коробчатых изделий с высокой (по 12 квалитету) точностью толщины их дна на заводе КРАВТ (г. Калуга) и на предприятиях объединения ОАО «МАКО» (Украина).

Методы исследования. Для проведения исследований применялись методы системного анализа, теории чувствительности систем, методы прикладной теории пластичности, методы математической статистики, метаматематическая теория планирования факторных экспериментов.

Апробация полученных результатов.

Основные результаты работы были доложены на шестнадцати всесоюзных, всероссийских и республиканских научно-технических конференциях и семинарах по приоритетным направлениям развития кузнечно-штамповочного производства в г. Москве (1984, 1990г.г.), г. Ростове-на-Дону (1981,1983г.г.), г. Львове (1979, 1980г.г.), г. Калуге (1991-2003г.г.), а также на научных семинарах кафедры «Технология обработки давлением» МГТУ им. Н.Э. Баумана (2003, 2004г.г.).

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 31 статье.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, семи глав, выводов по главам и основных выводов по работе, списка литературы из 110 наименований и приложения. Работа изложена на 356 страницах, в том числе 289 страниц машинописного текста, содержит 99 рисунков, 25 таблиц и приложение на 5 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований.

В первой главе выполнен обзор литературных источников по проблеме обеспечения точности высотных размеров поковок, изготавливаемых ХОШ. Приведена классификация факторов и погрешностей, оказывающих влияние на точность указанных размеров при выполнении различных технологических операций на кривошипных прессах. Систематизированы общие требования, предъявляемые к технологическому оборудованию, штампам и исходным заготовкам для обеспечения требуемой точности ХОШ. Выполнен анализ методов расчета и прогнозирования точности с учетом погрешностей исходных заготовок, технологического процесса и жесткости системы пресс-штамп.

Отмечено, что усилиями научных коллективов ВУЗов – МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГТУ СТАНКИН, отраслевыми научными организациями, такими как ЭНИКМАШ, НИИТавтопром, НИИтракторсельхозмаш, а также работами В.А. Головина, А.М. Дмитриева, А.З. Журавлева, Л.И. Живова, В.А. Евстратова, А.Г. Овчинникова, Е.А. Попова, М.В. Сторожева, Л.А. Шофмана и другими отечественными и зарубежными учеными создана обширная научная база для разработки процессов ХОШ, а также проектирования надежных конструкций штампов для их реализации. Наряду с этим, отечественным машиностроением накоплен значительный практический опыт освоения технологии ХОШ в результате созда-

ния и успешного функционирования специализированных участков, цехов и производств.

Вместе с тем, выполненный обзор литературных источников и анализ производственных данных показывает, что дальнейшее развитие и освоение ХОШ неразрывно связаны с необходимостью теоретического и экспериментального исследования проблем, к которым в первую очередь следует отнести повышение точности высотных размеров штампуемых поковок. В специальной литературе недостаточно внимания уделено вопросам точности поковок. Отсутствуют научно обоснованные рекомендации по выбору прессов по показателю их жесткости с учетом жесткости штампуемых поковок; практически нет данных о величине исходных погрешностей. При прогнозировании точности ориентируются на таблицы точности, приводимые в справочной литературе и представляющие несомненную ценность, так как отражают многолетний производственный опыт. Однако, они дают только общее представление о границах, порой весьма широких, возможной точности поковок. Применяемые методы расчета точности являются эмпирическими и учитывают только случайные погрешности и не учитывают влияния на точность такого элемента технологической системы (ТС) как жесткость штампуемых поковок.

Применив системный подход при анализе жесткости прессов для объемной штамповки Е.Н. Ланской создал предпосылки для разработки методики анализа точности операций объемной штамповки. Однако, такая методика не приобрела характера целостности и законченности. Элементы системного подхода к анализу штамповки на КГШП и ГКМ применили в своих работах Л.Б. Аксенов, Э.Ф. Богданов и А.П. Патрин.

Обзор литературных источников показал, что, к сожалению, при исследовании точности операций ХОШ не применялись математические методы планирования многофакторных экспериментов, которые являются надежным инструментом системного анализа. Их эффективность доказана значительным количеством работ, позволивших успешно решить разнообразные сложные задачи технологии листовой и объемной штамповки. Приведенный анализ позволяет сделать вывод, что в настоящее время отсутствуют научно обоснованные рекомендации, необходимые для повышения точности высотных размеров поковок, изготавливаемых ХОШ. Это объясняется, наряду с другими причинами, отсутствием методики анализа и прогнозирования точности ХОШ, которая позволила бы раскрыть закономерности влияния всех элементов ТС пресс-штамп-поковка на точность высотных размеров поковок с учетом особенностей технологических операций, а также характера и величины исходных погрешностей.

Во второй главе изложена методика анализа и расчета точности высотных размеров поковок с учетом особенностей технологических операций ХОШ. Приведены результаты анализа для выявления факторов, влияющих на точность операций осадки-калибровки, штамповки в закрытых штампах и обратного выдавливания стаканов. С помощью разработанной методики исследован характер влияния жесткости упругих звеньев ТС и жесткости штампуемых поковок на погрешности их высотных размеров, обусловленные влиянием как случайных, так и систематической постоянной погрешности наладки – погрешности регулирования

штамповой высоты.

С позиций системного подхода к ТС, очевидно, что оценка точности штамповки должна определяться в результате совместного анализа реализуемого технологического процесса и выбранного для этой цели кривошипного пресса.

Теоретической основой исследования точности операций ХОШ является теория параметрической чувствительности систем. Ключевым моментом ее приложения к различным объектам является математическое моделирование, как практическая основа реализации системного анализа. Применение теории чувствительности позволяет получить функции чувствительности (ФЧ), характеризующие степень влияния погрешностей входных параметров ТС на ее выходной параметр – высотный размер штампуемых поковок.

Рассмотрим систему кривошипный пресс-штамп-поковка, принимая во внимание те ее характеристики и особенности, которые должны быть учтены в исходной расчетной модели. Она может быть представлена функцией, отражающей совместное деформирование поковки и упругих звеньев ТС. Так как ТС на базе кривошипного пресса присущ координатный тип связи, то в конечный момент деформирования поковки взаимное положение подвижной и неподвижной частей штампа, а значит и высота поковки, устанавливаются равенством силы сопротивления поковки деформированию и силы, вызывающей упругую деформацию пресса со штампом.

Важнейшим признаком, влияющим на структуру и вид исходной математической модели, является особенность деформирования поковки в штампе. Для объемной штамповки характерны два случая. В первом, деформирование поковки осуществляется при сохранении всего ее объема либо в полости закрытого штампа, либо между деформирующими поверхностями штампа для осадки. При этом погрешности объема поковки приводят к изменению не только ее высоты, но и компенсационного размера, связанного с высотой условием постоянства объема. Изменение этих размеров вызывает соответствующее изменение силы сопротивления поковки деформированию, что влияет на точность. Во втором случае, при деформировании поковки без сохранения ее объема в рабочей полости избыточный объем исходной заготовки вытесняется из полости штампа, например, в стержень или в стенку при выдавливании, не оказывая влияния на высотный размер поковки, оформляемый взаимным расположением подвижной и неподвижной частями штампа.

Отмеченные варианты существенно влияют на величину и характер изменения силы сопротивления поковки деформированию, а значит, и на достижимую точность.

Операции с сохранением объема исходной заготовки в полости штампа.

В этом случае математическая модель деформирования упругой связи ТС представляется уравнением равновесия сил, действующих на систему пресс-штамп и пластически деформируемую поковку:

$$C(x_1 - H) - P(x_1, x_m \ldots, x_i, \ldots, x_n) = 0 \qquad (1)$$

и дополняется условием постоянства объема заготовки в полости штампа:

$$V = V(x_1, x_m) \qquad (2)$$

где C – коэффициент жесткости системы пресс-штамп; H – размер, получающийся при выборе зазоров в упругих звеньях ТС и обеспечивающий получе-

ние высотного размера поковки x_1; $x_1, x_m \ldots, x_i, \ldots, x_n$ – геометрические параметры поковки, механические характеристики ее материала, коэффициент контактного трения и другие параметры, влияющие на силу сопротивления поковки деформированию и имеющие варьируемость в ограниченном диапазоне. x_1, x_m – соответственно высота поковки и ее компенсационный размер, связанные условием (2). Для случая штамповки в закрытом штампе x_m – величина радиуса на внешних кромках поковки, а при осадке – диаметр поковки.

Уравнения (1) и (2) устанавливают связь между исходными параметрами ТС и ее выходными параметрами – x_1, x_m. Связь между погрешностями параметров ТС устанавливается линеаризацией (1) и (2) путем разложением в ряд Тейлора, либо аналитическим дифференцированием.

Полагаем, что функции (1) и (2) непрерывны и дифференцируемы, а погрешности параметров взаимонезависимы и достаточно малы ($\Delta x_i << x_i$). После дифференцирования (1) и (2) и перехода от дифференциалов к конечным приращениям ($dx_i = \Delta x_i$), получим систему линейных уравнений, связывающих погрешности исходных и выходных параметров ТС:

$$\begin{cases} \left(C - \dfrac{\partial P}{\partial x_1}\right)\Delta x_1 - \dfrac{\partial P}{\partial x_m}\Delta x_m = \dfrac{\partial P}{\partial x_i}\Delta x_i + \ldots \dfrac{\partial P}{\partial x_n}\Delta x_n + C\Delta H \\ \dfrac{\partial V}{\partial x_1}\Delta x_1 + \dfrac{\partial V}{\partial x_m}\Delta x_m = \Delta V \end{cases} \qquad (3)$$

Следует отметить, что в уравнениях системы (3) все частные производные берутся для номинальных, средних значений параметров.

В реальных условиях правые части системы уравнений (3) не равны нулю и для подавляющего большинства процессов объемной штамповки $\dfrac{\partial P}{\partial x_1} < 0$.

Для существования единственного решения системы (3) должно выполняться условие:

$$D = \begin{vmatrix} C - \dfrac{\partial P}{\partial x_1} & -\dfrac{\partial P}{\partial x_m} \\ \dfrac{\partial V}{\partial x_1} & \dfrac{\partial V}{\partial x_m} \end{vmatrix} = \left(C - \frac{\partial P}{\partial x_1}\right)\frac{\partial V}{\partial x_m} + \frac{\partial P}{\partial x_m}\frac{\partial V}{\partial x_1} \neq 0 .$$

Анализ показывает, что такое условие для реальных процессов объемной штамповки выполняется всегда.

Так как $D \neq 0$, поэтому система линейных уравнений (3) имеет единственное решение, определяемое формулой Г. Крамера:

$$\Delta x_{1i} = \frac{Dx_i}{D}\Delta x_i \ , \qquad (4)$$

где D – определитель основной матрицы системы (3); Dx_i – определитель полученный из D заменой элементов первого столбца для x_1 на столбец из свободных членов. Последние можно найти исходя из принципа независимости погрешностей параметров, последовательно приравняв все погрешности, кроме одной, к нулю.

В (4) $\frac{Dx_i}{D}$ - абсолютные функции чувствительности (ФЧ) выходной характеристики. Их удобно применять, когда все исходные параметры имеют одинаковую размерность. При различных размерностях применяют относительные ФЧ.

Тогда для любой случайной погрешности, вызванной параметром x_i, за исключением погрешности регулирования, получим:

$$K_i = \frac{\delta x_1}{\delta x_i} = \frac{Dx_i}{D}\frac{x_i}{x_1}; \qquad (5)$$

Для систематической постоянной погрешности наладки величину коэффициента K_H определяет соотношение абсолютных погрешностей :

$$K_H = \frac{\Delta x_1}{\Delta H} = \frac{Dx_H}{D}\frac{1}{\Delta H}. \qquad (6)$$

K_i и K_H – коэффициенты преобразования погрешностей исходных параметров в погрешность выходного параметра x_1.

Применительно к анализу точности ХОШ численные значения ФЧ показывают, какая часть относительной исходной погрешности преобразуется в относительную погрешность высоты поковки. Исходя из такого определения коэффициент K_i как и K_H называют коэффициентами преобразования.

На основании (5) и (6) можно получить выражения для ФЧ – коэффициентов преобразования относительных и абсолютных погрешностей для технологических операций с выполнением условия сохранения объема. В частности для высотного размера поковки x_1 – коэффициенты преобразования случайных погрешностей, исключая ΔV, получат вид:

$$K_i = \frac{\delta x_1}{\delta x_i} = \frac{\frac{\partial P}{\partial x_i}\frac{x_i}{x_1}}{C - \frac{\partial P}{\partial x_1} + \frac{\partial P}{\partial x_m}\frac{\partial V}{\partial x_1}\frac{1}{\partial V/\partial x_m}}, \qquad (7)$$

коэффициенты преобразования погрешностей ΔV и ΔH:

$$K_V = \frac{\delta x_1}{\delta V} = \frac{\frac{\partial P}{\partial x_m}\frac{1}{\partial V/\partial x_m}\frac{V}{x_1}}{C - \frac{\partial P}{\partial x_1} + \frac{\partial P}{\partial x_m}\frac{\partial V}{\partial x_1}\frac{1}{\partial V/\partial x_m}} \qquad (8)$$

$$K_H = \frac{\Delta x_1}{\Delta H} = \frac{C}{C - \frac{\partial P}{\partial x_1} + \frac{\partial P}{\partial x_m}\frac{\partial V}{\partial x_1}\frac{1}{\partial V/\partial x_m}} \qquad (9)$$

В знаменателе выражений для коэффициентов преобразований присутствует дополнительное слагаемое - $\frac{\partial P}{\partial x_m}\frac{\partial V}{\partial x_1}\frac{1}{\partial V}\frac{}{\partial x_m}$, которое принято называть приведенной объемной жесткостью по компенсационному размеру.

Влияние погрешностей исходных параметров на изменение другой выходной характеристики ТС – компенсационного размера x_m определяется соответствующими ФЧ следующим образом:

$$\Delta x_{mi} = \frac{Dx_m}{D}\Delta x_i, \qquad (10)$$

где Dx_m - определитель основной матрицы системы (3) с заменой второго столбца для x_m столбцом из свободных коэффициентов системы.

Пользуясь правилом Г. Крамера, определим зависимость диапазона изменения компенсационного размера, вызванного любой погрешностью Δx_i, исключая ΔV и ΔH:

$$\Delta x_{mi} = -\frac{\frac{\partial P}{\partial x_i}\frac{\partial V}{\partial x_1}\frac{1}{\partial V}\frac{}{\partial x_m}}{\left(C - \frac{\partial P}{\partial x_1}\right) + \frac{\partial P}{\partial x_m}\frac{\partial V}{\partial x_1}\frac{1}{\partial V}\frac{}{\partial x_m}}\Delta x_i. \qquad (11)$$

Диапазон изменения компенсационного размера x_m, вызванный погрешностями ΔV и ΔH:

$$\Delta x_{mV} = -\frac{\left(C - \frac{\partial P}{\partial x_1}\right)\frac{1}{\partial V}\frac{}{\partial x_m}}{\left(C - \frac{\partial P}{\partial x_1}\right) + \frac{\partial P}{\partial x_m}\frac{\partial V}{\partial x_1}\frac{1}{\partial V}\frac{}{\partial x_m}}\Delta V; \qquad (12)$$

$$\Delta x_{mH} = -\frac{C\frac{\partial V}{\partial x_1}\frac{1}{\partial V}\frac{}{\partial x_m}}{\left(C - \frac{\partial P}{\partial x_1}\right) + \frac{\partial P}{\partial x_m}\frac{\partial V}{\partial x_1}\frac{1}{\partial V}\frac{}{\partial x_m}}\Delta H. \qquad (13)$$

Операции без сохранения объема исходной заготовки в полости штампа.

Для этого типа операций математическая модель деформирования ТС представляется только уравнением (1) системы уравнений (3):

$$C(x_1 - H) - P(x_1, x_2, x_i, \ldots, x_n) = 0 \qquad (14)$$

где x_1 – высотный размер поковки – выходной параметр ТС.

Используя примененный выше подход, определим выражения для коэффи-

циентов преобразования случайных (K_i) и систематической погрешности наладки (K_H):

$$K_i = \frac{\delta x_1}{\delta x_i} = \frac{\dfrac{\partial P}{\partial x_i}}{C - \dfrac{\partial P}{\partial x_1}} \frac{x_i}{x_1}; \tag{15}$$

$$K_H = \frac{\Delta x_1}{\Delta H} = \frac{C}{C - \dfrac{\partial P}{\partial x_1}} . \tag{16}$$

Для анализа точности операций ХОШ с использованием ФЧ – коэффициентов преобразования необходимо в каждом конкретном случае решать вопрос о выборе аналитической функции для определения силы сопротивления поковки деформированию. Точность результатов теоретического анализа в значительной степени будет зависеть от того, насколько эта функция адекватно отражает физическую сущность процесса. В большинстве случаев предпочтение может быть отдано функциональным зависимостям, приводимым в справочной литературе.

Анализ факторов, влияющих на точность осадки-калибровки.

Примем, что сила осадки определяется по формуле Э. Зибеля:

$$P = \sigma_S \frac{\pi d^2}{4}\left(1 + \mu \frac{d}{3h}\right). \tag{17}$$

где σ_S – напряжение текучести упрочняемого материала поковки с учетом интенсивности деформации; d и h – соответственно диаметр и высота поковки; μ - коэффициент контактного трения.

Пренебрегая бочкообразностью осаживаемых поковок, условие постоянства объема может быть представлено в виде:

$$V = \frac{\pi d^2}{4} h . \tag{18}$$

Тогда формулы для коэффициентов преобразования (7), (8) и (9) с учетом (17) и (18) получат вид:

$$K\sigma = \frac{\delta h}{\delta \sigma_S} = \frac{\sigma_S \dfrac{\pi d^2}{4h}\left(1 + \mu \dfrac{d}{3h}\right)}{C + \sigma_S \dfrac{\pi d^2}{4h}\left(1 + 2.5\mu \dfrac{d}{3h}\right)} \tag{19}$$

$$K\mu = \frac{\delta h}{\delta \mu} = \frac{\sigma_S \dfrac{\pi d^2}{4h} \mu \dfrac{d}{3h}}{C + \sigma_S \dfrac{\pi d^2}{4h}\left(1 + 2.5\mu \dfrac{d}{3h}\right)}, \tag{20}$$

$$K_V = \frac{\delta h}{\delta V} = \frac{\sigma_S \frac{\pi d^2}{4h}\left(1+\mu\frac{d}{2h}\right)}{C+\sigma_S \frac{\pi d^2}{4h}\left(1+2.5\mu\frac{d}{3h}\right)}, \qquad (21)$$

$$K_H = \frac{\Delta h}{\Delta H} = \frac{C}{C+\sigma_S \frac{\pi d^2}{4h}\left(1+2.5\mu\frac{d}{3h}\right)}. \qquad (22)$$

Как следует из анализа формул для коэффициентов преобразования K_σ, K_V, K_μ и K_H, влияние погрешностей исходных параметров на точность высотных размеров зависит как от жесткости системы пресс-штамп, так и от жесткости осаживаемой поковки, которая определяется с учетом приведенной объемной жесткости по компенсационному размеру - $\sigma_S \frac{\pi d^2}{4h}\left(1+2.5\mu\frac{d}{3h}\right)$. Видно, что увеличение напряжения текучести материала поковок, отношения d/h и коэффициента μ приводит к увеличению жесткости осаживаемых поковок.

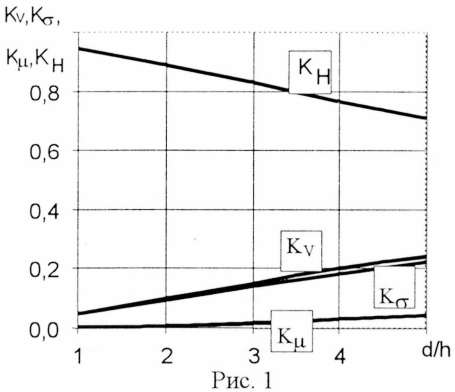


Рис. 1

На рис. 1 показана зависимость коэффициентов преобразования от отношения d/h при осадке стальных поковок диаметром 32 мм (σ_S=600 МПа, μ=0,15) на кривошипном прессе с номинальной силой 1000 кН, жесткость которого со штампом составляет 300 кН/мм. Из рисунка видно, что с увеличением жесткости поковок, например, за счет увеличения d/h, коэффициенты преобразования случайных погрешностей увеличиваются, а коэффициент K_H уменьшается. При осадке жесткость поковок почти на порядок меньше жесткости упругих звеньев ТС, и это объясняет высокую чувствительность высоты поковок к погрешности наладки. Выполненный анализ показывает, что относительно высокая чувствительность к возможному рассеянию механических характеристик (σ_S) приводит к тому, что с повышением прочности материала поковки (ее жесткости) возрастает величина коэффициентов преобразования K_σ, K_V, K_μ и уменьшается величина коэффициента K_H. Коэффициенты преобразования отражают только чувствительность ТС и численно связывают погрешность высоты поковок с исходными погрешностями. Таким образом, располагая коэффициентами преобразования, о величине единичных погрешностей высоты поковки можно судить, зная величину исходных погрешностей. Основываясь на

данных, содержащихся в справочной литературе, можно для целей анализа принять: $\delta\sigma_S$=10%, δV =2% и $\delta\mu$=5%. Погрешность наладки, как известно, зависит от технологического назначения пресса. У специальных прессов для холодного выдавливания и чеканочных она составляет 0,1 мм, а у универсальных – 0,5 мм. Для указанных погрешностей (ΔH=0,1 мм) выполнен расчет относительной величины элементарных погрешностей осаживаемых стальных поковок диаметром 32 мм и высотой 16 мм. Из графиков на рис. 2 следует, что доминирующей погрешностью при осадке является погрешность высоты поковки, обусловленная рассеянием механических характеристик. Эта погрешность более чем в 5 раз превышает другие случайные погрешности. Существенный вклад в суммарную погрешность высоты вносит погрешность наладки δh_H. Кроме того, из рис. 2 видно, что увеличение жесткости системы пресс-штамп применением более жесткого пресса приводит к существенному уменьшению случайной погрешности $\delta\sigma_S$ и увеличению влияния погрешности наладки.

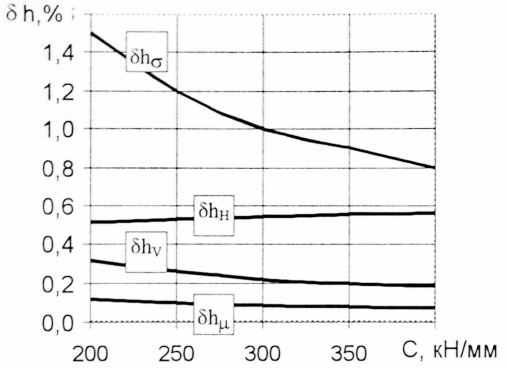


Рис. 2

Анализ точности высоты поковок, штампуемых в закрытых штампах.

Примем, что сила сопротивления поковки деформированию в закрытом штампе определяется по формуле Л.А. Шофмана:

$$P = \sigma_S \frac{\pi d^2}{4}\left[1.5\ln\frac{d}{2r} - 0.5\left(1 - \frac{2r}{d}\right)\right], \qquad (23)$$

где d, h и r – соответственно диаметр, высота поковки и радиус на ее кромках; σ_S - напряжение текучести материала поковки с учетом интенсивности деформации.

Для относительно низких поковок (d/h<1) радиусы на верхних и нижних кромках равны, поэтому условие сохранения объема исходной заготовки в закрытом штампе может быть представлено зависимостью:

$$V = \frac{\pi d^2}{4}h - \pi r^2 d, \qquad (24)$$

Формулы для коэффициентов преобразования (7), (8) и (9) с учетом (23) и (24) получат вид:

$$K_V = \frac{\delta h}{\delta V} = \frac{\sigma_S \frac{\pi d^2}{4h}\left(1 - 1.5\frac{d}{r}\right)\frac{1}{(-8r)}}{C + \sigma_S \frac{\pi d^2}{4}\left(1 - 1.5\frac{d}{r}\right)\frac{1}{(-8r)}} \quad (25)$$

$$K\sigma = \frac{\delta h}{\delta \sigma_S} = \frac{\sigma_S \frac{\pi d^2}{4h}\left[1.5\ln\frac{d}{2r} - 0.5\left(1 - \frac{2r}{d}\right)\right]}{C + \sigma_S \frac{\pi d^2}{4}\left(1 - 1.5\frac{d}{r}\right)\frac{1}{(-8r)}} \quad (26)$$

$$K_H = \frac{\Delta h}{\Delta H} = 1 - K_V . \quad (27)$$

Изменения компенсационного размера Δr, обусловленные погрешностями исходных параметров, определим, используя зависимости (11), (12) и (13), которые с учетом (23) и (24) получат вид:

$$\Delta r_V = K_H \frac{\Delta V}{(-2r\pi d)} = (1 - K_V)\frac{\Delta V}{(-2r\pi d)}; \quad (28)$$

$$\Delta r_\sigma = \Delta h_\sigma \frac{d}{8r} = K_\sigma h \delta\sigma_S \frac{d}{8r}; \quad (29)$$

$$\Delta r_H = K_H \frac{d}{8r}\Delta H = (1 - K_V)\frac{d}{8r}\Delta H . \quad (30)$$

Анализ формулы (23) и выражений для полученных коэффициентов преобразований показывает, что сила деформирования, как и жесткость поковки, определяется прежде всего отношением ***d/2r***, однако, для поковки с заданными диаметром и высотой она зависит от абсолютной величины радиуса ***r***. Для анализа точности рассмотрим поковку диаметром 25 мм, высотой 12 мм, штампуемую из меди М1 (σ_S=320 МПа) на кривошипном прессе с номинальной силой 1000 кН,

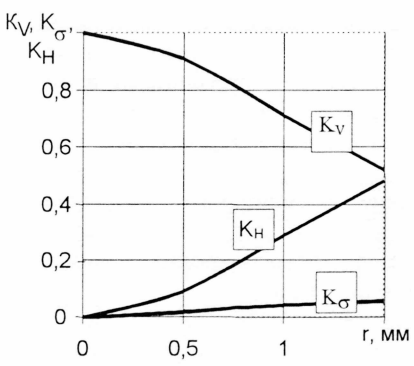


Рис. 3

жесткость которого со штампом равна 300 кН/мм. Жесткость такой поковки с учетом приведенной объемной жесткости по компенсационному размеру при ***r***=1,5 мм будет равна 322 кН/мм, а при ***r***=1,0 мм и ***r***=0,5 мм соответственно 700 кН/мм и 2977 кН/мм. Из этого примера следует, что при закрытой штамповке жесткость поковок изменяется в широком диапазоне и численно либо соизмерима с жесткостью упругих звеньев ТС, либо на порядок превышает ее. Таким образом, даже незначительное изменение номинальной величины радиуса ***r*** может суще-

ственно изменить показатели точности.

На рис. 3 приведены графики зависимости коэффициентов K_V, K_σ, и K_H от величины радиуса r, определяющего жесткость поковки. Видно, что с увеличением жесткости поковки возрастает чувствительность ее высоты к доминирующей погрешности объема исходных заготовок (K_V) и уменьшается чувствительность к погрешности наладки (K_H). Из графиков следует, что процесс закрытой штамповки практически не чувствителен к погрешности механических характеристик материала поковки (K_σ). Таким образом, конструктивно-технологический параметр поковки – r может быть рассмотрен как фактор управления точностью ее высоты наряду с жесткостью системы пресс-штамп. Однако, влияние последнего фактора зависит от жесткости поковки. С ее уменьшением влияние жесткости упругих звеньев на точность высоты поковок увеличивается. В случае, если объем естественного компенсатора – незаполненные углы закрытого штампа – меньше погрешности объема заготовки, тогда применение пресса с большой жесткостью может привести к вытеснению избыточного объема в торцевой заусенец, что недопустимо. Это ограничивает как верхний уровень жесткости системы пресс-штамп, так и при известной жесткости системы и величине радиуса r ограничивает величину погрешностей объема исходных заготовок. Используя полученные зависимости изменения компенсационного размера Δr_V от погрешности объема можно решить задачу выбора пресса с максимально допустимой жесткостью при заданной погрешности объема и минимально допустимом радиусе r_{min}. Кроме того, задав диапазон изменения радиуса, можно определить допустимую погрешность объема в зависимости от принятой жесткости системы пресс-штамп. Представленные на рис. 4 графики отражают зависимость максимально допустимой погрешности объема заготовок от жесткости системы пресс-штамп и номинальной величины радиуса на кромках поковки r (r_{min}=0,2 мм).

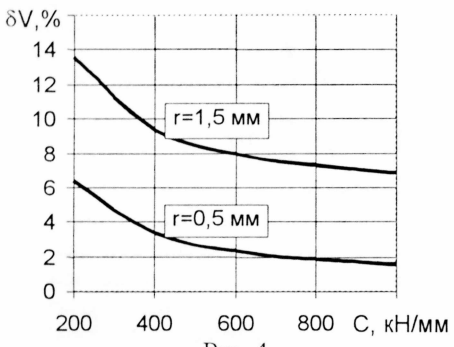


Рис. 4

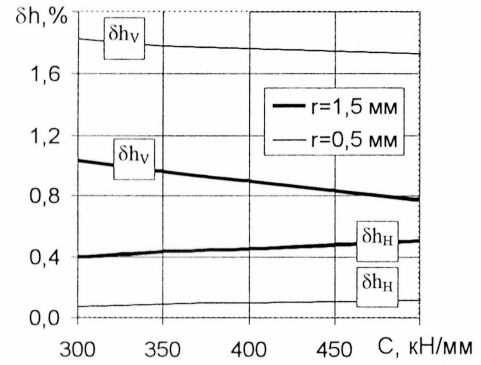


Рис.5

Для того, чтобы оценить соотношение элементарных погрешностей, используя для этой цели коэффициенты преобразования, примем следующие величины исходных погрешностей: δV=2% и ΔH=0,1 мм.

На рис. 5 представлены графики, отражающие влияние жесткости системы пресс-штамп и жесткости

штампуемых поковок (r) на соотношение элементарных погрешностей высоты поковок. Из графиков видно, что с увеличением жесткости поковок возрастает влияние погрешности объема и уменьшается влияние погрешности наладки. Жесткость поковки определяет также характер влияния на точность ее высоты жесткости упругих звеньев ТС. Для поковки с относительно малой жесткостью (r=1,5 мм) такое влияние заметно. В частности уменьшается влияние погрешности объема и увеличивается влияние погрешности наладки. Напротив, с увеличением жесткости поковки (r=0,5 мм) на порядок превышающей жесткость системы пресс-штамп увеличение последней практически не оказывает влияния на уменьшение как случайной, так и систематической погрешностей.

Анализ точности размеров толщины дна выдавливаемых стаканов.

Силу, необходимую для обратного выдавливания стакана определим в соответствии с формулой Е.А. Попова:

$$P = \sigma_S \frac{\pi d^2}{4}\left(2 + \mu\frac{d}{3t} + \mu\frac{t}{2S} + \frac{t}{4S}\right) \tag{31}$$

где d, S и t – соответственно диаметр полости, толщина стенки и толщина дна стакана; σ_S - напряжение текучести упрочняемого материала с учетом интенсивности деформации.

Коэффициенты преобразования для толщины дна стакана (15) и (16) с учетом (31):

$$K\sigma = \frac{\delta t}{\delta\sigma_S} = \frac{\sigma_S \frac{\pi d^2}{4t}\left(2 + \mu\frac{d}{3t} + \mu\frac{t}{2S} + \frac{t}{4S}\right)}{C + \sigma_S \frac{\pi d^2}{4}\left(\mu\frac{d}{3t^2} - \frac{\mu}{2S} - \frac{1}{4S}\right)} \tag{32}$$

$$K\mu = \frac{\delta t}{\delta\mu} = \frac{\sigma_S \frac{\pi d^2}{4t}\left(\mu\frac{d}{3t} + \mu\frac{t}{2S}\right)}{C + \sigma_S \frac{\pi d^2}{4}\left(\mu\frac{d}{3t^2} - \frac{\mu}{2S} - \frac{1}{4S}\right)} \tag{33}$$

$$K_H = \frac{\Delta t}{\Delta H} = \frac{C}{C + \sigma_S \frac{\pi d^2}{4}\left(\mu\frac{d}{3t^2} - \frac{\mu}{2S} - \frac{1}{4S}\right)} \tag{34}$$

Отметим следующие особенности силового режима обратного выдавливания стаканов, оказывающие влияние на точность толщины их дна.

Жесткость поковок на стационарной стадии близка к нулю, а на заключительной – нестационарной, когда t=S, их жесткость зависит от величины напряжения текучести материала, относительной степени деформации (ψ=d^2/D^2), толщины дна и коэффициента контактного трения. Для поковок с относительной степенью деформации ψ<0,8 даже на заключительной нестационарной стадии выдавливания их жесткость мала, почти на порядок меньше жесткости системы

пресс-штамп. Например, для стакана с размерами d=21,5 мм; t=S=1,75 мм из стали (σ_S=600 МПа, μ=0,15) сила выдавливания составит 637 кН, а жесткость поковки 36 кН/мм. Для выдавливания аналогичного стакана из сплава АД1 (σ_S=150 МПа, μ=0,3) необходимая сила равна 205 кН, жесткость поковки – 26 кН/мм. Только при ψ>0,85 жесткость поковок резко возрастает и может достигать 50...70% жесткости системы пресс-штамп (C=300 кН/мм). Из приведенных примеров и анализа формулы (34) видно, что для стаканов, выдавливаемых при ψ<0,8 величина коэффициента K_H близка к его предельной величине – 1,0. Кроме того, анализ, выполненный с использованием коэффициентов преобразования показывает, что наибольшую чувствительность выходной параметр ТС проявляет также к рассеянию механических характеристик материала стакана, поэтому соответствующий коэффициент преобразования у стального стакана почти в три раза больше, чем у стакана из сплава АД1. Повышение прочности сплава увеличивает жесткость стакана и, вследствие этого, уменьшается величина коэффициента K_H и возрастает величина коэффициентов K_σ и K_μ. Выполненные расчеты показывают, что при увеличении ψ от 0,5 до 0,75, а значит при увеличении жесткости поковки за счет указанного параметра, уменьшается величина коэффициента K_H и возрастает величина коэффициентов K_σ и K_μ.

Выполненный анализ позволяет сделать вывод о влиянии толщины дна выдавливаемых стаканов. Во всех случаях уменьшение его размера приводит к увеличению жесткости стакана, в результате чего уменьшается величина коэффициента преобразования погрешности наладки и возрастает величина коэффициентов преобразования случайных погрешностей. Таким образом, толщина дна стакана может быть рассмотрена как фактор управления точностью наряду с жесткостью системы пресса-штамп. Для перехода от критериев точности – коэффициентов преобразования к погрешностям толщины дна стаканов примем разброс напряжения текучести материала стаканов – 10%, погрешность, вызванную изменением условий контактного трения – 5%, погрешность наладки – ΔH=0,1 мм. Рассмотрим выдавливание стального стакана и стакана из стали АД1 с параметрами, указанными выше.

На рис. 6 и 7 представлены зависимости элементарных погрешностей тол-

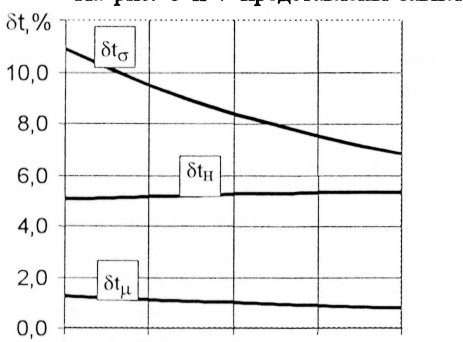


Рис.6

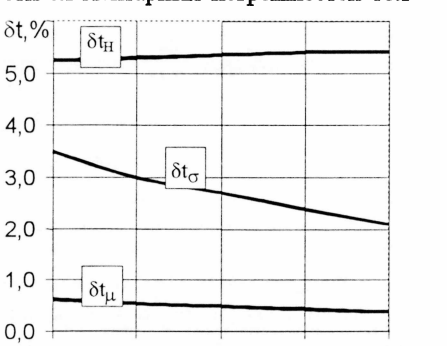


Рис. 7

щины дна стаканов от жесткости системы пресс-штамп для стального и алюминиевого стаканов соответственно. Из графиков видно, что в обоих случаях доминирующими погрешностями являются погрешности, обусловленные разбросом механических характеристик δ_{σ} и погрешностью наладки - δ_{H}, погрешностью δ_{μ} можно пренебречь в силу ее малости.

Однако, существенное отличие прочности материала стаканов приводит к тому, что при выдавливании стальных стаканов доминирует погрешность толщины дна, вызванная разбросом механических характеристик, а при выдавливании алюминиевых стаканов – погрешность толщины дна, обусловленная погрешностью наладки.

Третья глава посвящена исследованию точности операций ХОШ с помощью планирования и реализации полных факторных экспериментов (ПФЭ) типа 2^K. Полученные на их основе математические модели подвергали регрессионному и дисперсионному анализам, для более объективной оценки вклада различных технологических факторов в погрешность высотных размеров поковок. Ставилась задача выявить доминирующие погрешности при выполнении различных технологических операций, а также определить факторы, с помощью которых можно достаточно эффективно управлять указанной точностью.

В ПФЭ 2^3 определяли относительную погрешность высоты поковок δh, штампуемых в закрытом штампе в зависимости от относительной погрешности их объема (δV=4,6 и 3,3%), жесткости поковок, которая задавалась величиной радиуса r на их кромках (r=1,5 и 0,5 мм), а также жесткости системы пресс-штамп (C=380 и 200 кН/мм). Параметры поковок: d=25 мм, h=12 мм, материал – медь М1(σ_s =320 МПа). Адекватность полученной модели проверяли по критерию Фишера. В результате обработки ПФЭ была получена следующая адекватная модель регрессионного анализа с нормализованным масштабом уровней факторов:

$$y(\delta h,\%)=3{,}49 + 0{,}61\,\delta V - 0{,}14C - 0{,}26r - 0.09Cr \qquad (35)$$

Из (35) следует, что влияние погрешности δV на отклик (δh) в 2,5 раза сильнее влияния жесткости поковок (r) и более, чем в 4 раза сильнее влияния жесткости упругих звеньев ТС. Дисперсионным анализом установлено, что 78% дисперсии отклика вызвано погрешностью объема, 15% - влиянием жесткости поковки и лишь 5% - жесткостью системы пресс-штамп. Значительный эффект взаимодействия факторов C и r означает, что влияние жесткости упругих звеньев зависит от уровня жесткости поковки. Взаимодействие этих двух факторов представляет наибольший интерес для возможного управления точностью. Такое взаимодействие представляется следующей адекватной моделью (δV = 3,3 %):

$$y(\delta h,\%)=2{,}88 - 0{,}12\,C - 0{,}27r - 0{,}07Cr \qquad (36)$$

Из (36) следует, что влияние жесткости поковки (r) на отклик в 2,25 раза сильнее влияния фактора C. Влияние последнего на отклик, как следует из эффекта взаимодействия факторов, зависит от жесткости поковки. Это иллюстрируется частными моделями погрешности высоты поковки:

1680419
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

r= 1,5 мм $y(\delta h,\%)=3{,}22 + 0{,}62\delta V - 0{,}22C - 0{,}03\delta V\,C$ (37)

r= 0,5 мм $y(\delta h,\%)=3{,}75 + 0{,}62\delta V - 0{,}05C - 0{,}03\delta V\,C$ (38)

Сравнение (37) и (38) показывает, что при увеличении радиуса с 0,5 до 1,5 мм существенно, почти в 4 раза, возрастает влияние жесткости пресса со штампом на уменьшение погрешности высоты поковки. Это подтверждает ранее сделанный вывод, что управление точностью поковок эффективно осуществлять уменьшая их жесткость за счет конструктивно-технологического элемента поковки – радиуса r. Результаты, полученные экспериментальным путем, с достаточной точностью соответствуют результатам теоретического анализа (расхождение не превышает 8,3%).

При исследовании точности операции осадки-калибровки семь факторов варьировали на двух уровнях, которые в натуральном и нормализованном масштабах представлены в табл. 1. Там же приведены результаты дисперсионного анализа, основанного на оценке вклада каждого фактора в дисперсию отклика – относительную погрешность высоты осаживаемых поковок. В выполненных экспериментах наряду с другими погрешностями исследовали также влияние относительных погрешностей объема исходных заготовок, вызванных как погрешностью их диаметра - δV_d, так и погрешностью высоты – δV_h. Полученное в результате реализации ПФЭ 2^6 уравнение регрессионного анализа позволило установить, что наиболее сильное влияние на отклик (δh) оказывает возможное рассеяние механических характеристик (HB). Влияние этого фактора в 2,3 раза сильнее влияния погрешности δV_h и в 3,7 сильнее влияния погрешности δV_d. Установлено, что повышение точности высоты поковок может быть обеспечено выбором пресса большей жесткости (C) и увеличением степени деформации исходных заготовок. Для этого рассмотрена модель управления точностью высоты поковок:

Таблица 1

N	Факторы	Уровни факторов			Вклад в дисперсию отклика, %
		+1	0	-1	
1	HB, МПа	240	210	180	27,8
2	δV_h, %	10	7,5	5	5,27
3	δV_d, %	10	7,5	5	2,0
4	d / h	3	2,25	1,5	30,3
5	$\varepsilon = \Delta h / h_0$	0,36	0,23	0,1	3,6
6	C, МН/м	180	135	90	20,75
7	μ	0,3	0,15	0,1	-

$$y(\delta h,\%)=2{,}25 - 0{,}3\varepsilon + 0{,}81 d/h - 0{,}57C - 0{,}09\varepsilon\, d/h - 0{,}12 C d/h - 0{,}16\,\varepsilon\, C\, d/h \quad (37)$$

Анализ (37) показывает, что влияние фактора C на отклик (δh) почти в два раза сильнее степени осадки исходных заготовок (ε). Однако, значительная величина коэффициента регрессии при эффектах взаимодействия факторов свидетельствует, что влияние факторов C и ε существенно зависит от того, на каком уровне устанавливается фактор d/h, характеризующий жесткость поковок. Для этого рассмотрены модели для относительно высоких (d/h=1,5) и относительно низких поковок (d/h=3,0):

d/h=1,5 $y(\delta h,\%)=1{,}12 + 0{,}14\delta V_h + 0{,}09\delta V_d + 0{,}38 HB - 0{,}06\varepsilon$ (38)

d/h=3,0 $y(\delta h,\%)=2{,}48 + 0{,}33\delta V_h + 0{,}24\delta V_d + 0{,}74 HB - 0{,}42\varepsilon$ (39)

Сравнение (38) и (39) раскрывает принципиальное отличие осадки низких и

высоких поковок с позиции точности. При осадке низких поковок заметно возрастает влияние фактора ε. Если при осадке высоких поковок влияние фактора HB на отклик в 6 раз сильнее фактора ε, то при осадке низких – это соотношение уменьшается до 1,75 раза. Вместе с тем, увеличение влияния фактора ε способствует уменьшению влияния погрешности δV_h. Дисперсионный анализ свидетельствует, что 60% дисперсии отклика вызваны влиянием погрешности механических характеристик материала (HB), 12% - погрешностью δV_h, и 6% - погрешностью δV_d. Для относительно низких поковок вклад степени осадки составляет 20%, что позволяет рассматривать ее как фактор управления точностью высоты таких поковок.

При исследовании точности толщины дна выдавливаемых стаканов в план ПФЭ включили 6 факторов, уровни которых указаны в табл. 2.

Таблица 2

N	Факторы	Уровни факторов			Вклад в дисперсию отклика, %
		+1	0	-1	
1	HB, МПа	240	210	180	31
2	μ	0,3	0,2	0,1	19,6
3	t, мм	h_0	$0,75\,h_0$	$0,5\,h_0$	12,8
4	D/d	1,38	1,265	1,15	11
5	C, кН / мм	300	225	150	5.6
6	δV, %	15	12,5	10	0,27

На первом этапе для выделения наиболее значимых факторов ПФЭ 2^6 использовали как отсеивающий эксперимент, позволивший исключить фактор погрешности объема как статистически незначимый.

На основании результатов ПФЭ 2^5 была получена адекватная модель регрессионного анализа, на основании которой установлено, что наиболее сильное влияние на отклик – относительную погрешность толщины дна стакана (δt) оказывает рассеяние его механических характеристик (HB). Это влияние в 1,35 раза сильнее возможного изменения условий трения (μ). Этот фактор устанавливался на качественных уровнях: со смазкой и без применения смазки. Определено также, что конструктивные параметры стаканов – толщина их дна t и отношение D/d оказывают одинаковое по силе влияние на погрешность толщины дна. Кроме того, эти факторы оказываются среди наиболее значимых эффектов взаимодействия. Это диктует необходимость анализировать отдельно стаканы с относительно толстой (D/d=1,36) и относительно тонкой стенкой (D/d=1,15), а фактором управления точностью рассматривать толщину их дна, сопоставляя ее с глубиной очага деформации под торцом пуансона (h_O). В частности для тонкостенных и толстостенных стаканов получены соответствующие модели погрешности толщины их дна:

$$y(\delta t,\%) = 19,5 + 11,4\,HB + 8,5\,\mu - 6,5\,t - 3,44\,HB\,t - 3,15\,\mu\,t + 1,4\,HB\,\mu \qquad (40)$$

$$y(\delta t,\%) = 7,4 + 4,45\,HB + 2,0\,\mu - 3,87\,t - 1,72\,HB\,t - 1,4\,\mu\,t \qquad (41)$$

В первом случае (40) – при относительно тонкой стенке – определено, что влияние на отклик δt погрешности механических характеристик (HB) в 1,34 раза сильнее влияния фактора трения и в 1,75 раза сильнее влияния толщины дна. Переход этого фактора с нижнего уровня на верхний уменьшает влияние факторов HB и μ. Дисперсионный анализ показывает, что 48% дисперсии отклика вызваны фактором HB, 27% - фактором трения и 16% - толщиной дна. Из сравнения (40) и

(41) видно, что при выдавливании толстостенных стаканов существенно возрастает влияние на отклик (δt) толщины дна и уменьшается влияние фактора трения. Дисперсионный анализ (41) свидетельствует о том, что 45% дисперсии отклика вызвано погрешностью механических свойств, 10% - влиянием фактора трения и 34% - толщиной дна.

Эксперименты по определению влияния случайных погрешностей на точность высотных размеров поковок дополнены также ПФЭ 2^2 по определению влияния погрешности регулирования штамповой высоты на погрешность высоты поковки при осадке-калибровке. В эксперименте в качестве отклика фиксировали погрешность высоты поковки и коэффициент преобразования K_H. Варьировали жесткость поковки из сплава АД1 (d/h=3,0 и 1,5) и погрешность регулирования (ΔH=1,58 и 0,54 мм). В результате дисперсионного анализа выявлено, что наибольшее влияние на отклик оказывает жесткость поковки, определяемая отношением d/h. Влияние этого фактора на отклик в 3,0 раза сильнее влияния погрешности регулирования. Оценка дисперсионного анализа совпадает с оценкой регрессионного и результаты эксперимента с достаточной для практических целей точностью совпадают с результатами расчета по методике, предложенной в ГЛАВЕ 2. Таким образом, выполненные исследования показали, что факторные эксперименты являются эффективным инструментом реализации системного анализа, позволяющим не только осуществить проверку соответствия теоретических решений экспериментальным данным, но и на основе анализа полученных математических моделей определить возможные эффективные способы повышения точности высотных размеров поковок.

В четвертой главе изложены результаты статистических исследований, выполненных на промышленных предприятиях при реализации предложенных технологических решений, направленных на повышение точности высотных размеров штампуемых поковок.

При проектировании поковок прогнозирование точности их размеров должно опираться на достоверные данные о величине исходных погрешностей. Анализ производственных данных показывает, что при переходе от одного бунта проволоки к другому, от одной сертифицированной партии прутков к другой их геометрические параметры, весовые показатели, а также механические характеристики претерпевают изменения. Причем разброс перечисленных показателей в пределах таких условных групп заготовок значительно меньше допускаемого соответствующими стандартами.

Одним из возможных путей уменьшения исходных погрешностей является проведение подналадки технологической системы для каждой из таких групп с учетом фактического партионного рассеяния исходных случайных погрешностей. Статистические исследования их величины выполняли на основе анализа репрезентативных выборок достаточно большого объема (n>100). Выборочные оценки величины случайных погрешностей определяли с помощью доверительных интервалов с учетом объемов выборок и заданной доверительной вероятности (P=0,997). Для применения вероятностного подхода к оценке величины исходных случайных погрешностей выполняли идентификацию закона их распределения с помощью критериев Пирсона и Колмогорова, что обеспечивало обоснован-

ный выбор квантильных коэффициентов, связывающих границы доверительного интервала со средним квадратическим отклонением исследуемой случайной погрешности. Объектом выборочных исследований были исходные заготовки, отрезаемые во втулочных штампах или на лентопильных станках от калиброванных прутков нормальной точности диаметром от 14 до 32 мм. Материал прутков – медные сплавы М1 и М2 и алюминиевые – АД1, АД31, АМГ и АМЦ.

Рассеяние механических характеристик исходных заготовок определяли по величине напряжения текучести разупрочненных сплавов в процессе испытания на сжатие цилиндрических образцов с торцовыми выточками при построении диаграмм истинных напряжений. Для каждой степени осадки ($\varepsilon=\Delta h/h_O$), кратной 0,1 в диапазоне от 0,1 до 0,7, получали выборки, каждая объемом 120 наблюдений. Для каждой выборки определяли выборочные оценки – среднего арифметического и дисперсии. В результате определено, что для меди М1 относительная величина доверительной погрешности напряжения текучести в пределах указанных степеней деформации изменяется от 10,2% (ε=0,1) до 3,2% (ε=0,7). Установлено, что для всех степеней деформации дисперсии случайной величины (σ_S) однородны. Соответствующую гипотезу проверяли по критерию Кохрана. Однородность дисперсий дает основание считать погрешность функции $\sigma_S=f(\varepsilon)$ аддитивной. Тогда ее абсолютная погрешность, как и ширина полосы неопределенности одинакова для всех степеней деформации (13,3 МПа) и характеризуется средним квадратическим отклонением – 2,19 МПа. Аналогичные показатели для сплава АД1 составили: относительная погрешность напряжения текучести от 8,2% (ε=0,1) до 5,2% (ε=0,6); ширина полосы неопределенности – 6,97 МПа, среднее квадратическое отклонение – 1,16 МПа. Выполненные исследования для сплавов М2, АД1, АД31, АМГ и АМЦ показывают, что для степеней деформации от 0,3 до 0,5, фактическое партионное рассеяние напряжения текучести почти в 2 раза меньше установленного соответствующими стандартами. Выполненными исследованиями определено, что распределение случайной величины - σ_S соответствует закону нормального распределения.

Выборочные исследования показали, что мгновенное поле рассеяния диаметров калиброванных прутков нормальной точности (Ø14…32 мм) не превышает 30…45% величины поля допуска, регламентируемого соответствующим стандартом.

Исследования взвешиванием исходных заготовок, отрезаемых во втулочных штампах, позволили определить доверительную погрешность их объема и выявить баланс составляющих этой погрешности. В частности определено, что относительная погрешность объема составляет 2,3% (Ø14…18 мм) и 1,37…1,7% у прутков Ø22…32 мм. При этом 80% погрешности объема заготовок определяется погрешностью площади их поперечного сечения, остальное – погрешностью длины (l/d=1,5). Установлено, что распределение погрешности объема соответствует нормальному распределению.

В этой главе также на основе общих положений теории вероятностей и математической статистики получены зависимости для определения статистических и метрологических параметров настройки (наладки) штамповой высоты кривошипного пресса по пробным заготовкам с использованием универсального мери-

тельного инструмента. Предложены зависимости для определения погрешности и допуска наладки с учетом коэффициентов преобразования погрешности наладки (K_H) в зависимости от характера технологической операции.

Глава 5. При проектировании технологических процессов ХОШ важнейшей задачей является выбор кривошипного пресса для их реализации. Оптимальное сочетание параметров технологического процесса с характеристиками выбираемого пресса позволяет не только достичь требуемой точности поковок, но и обеспечить условия для эффективной эксплуатации пресса со штампом. Наличие жесткой кинематической связи у кривошипных прессов приводит к тому, что под действием исходных погрешностей отклонения высотных размеров поковок от номинальных вызывают равные им по величине упругие деформации системы пресс-штамп. Таким образом, погрешности поковок определяют возможный диапазон рассеяния силы пресса и, вследствие этого, вероятность возникновения перегрузки по величине его номинальной силы. При выборе пресса по показателю его жесткости с целью повышения точности поковок необходимо учитывать неоднозначное влияние жесткости системы пресс-штамп на величину случайных и систематической погрешности наладки, а также на силовой режим деформирования технологической системы. При увеличении жесткости пресса в зависимости от жесткости поковки в той или иной степени уменьшается влияние случайных погрешностей. Одновременно с этим увеличивается влияние погрешности наладки. С другой стороны, увеличение жесткости пресса приводит к увеличению диапазона рассеяния силы, деформирующей упругие звенья ТС, что может быть причиной его перегрузки или даже заклинивания.

Известно, что кривошипные прессы наиболее чувствительны к перегрузке по номинальной силе, и их выбирают с определенным запасом по этому параметру. В то же время, неполное использование силы пресса приводит к значительным издержкам производства.

Кроме стремления исключить перегрузку пресса по номинальной силе необходимо обеспечить энергетический баланс в процессе его эксплуатации с учетом расхода энергии на преодоление полезного сопротивления поковки. Это не менее важно, особенно для весьма энергоемких операций холодной объемной штамповки.

Перегрузки выбираемого кривошипного пресса по величине его номинальной силы не произойдет, если среднее расчетное значение силы сопротивления поковки деформированию P будет меньше номинальной силы пресса P_H на величину ее приращения ΔP под влиянием как случайной доминирующей, так и систематической погрешности наладки. В частности, для выдавливания стаканов:

$$P = P_H - \Delta P = P_H - \Delta t_\Sigma C \qquad (42)$$

где Δt_Σ - суммарная погрешность толщины дна стакана:

$$\Delta t_\Sigma = K_\sigma t\ \delta_\sigma + K_H \Delta H \qquad (43)$$

С учетом (42) и (43) определяется максимально допустимая величина коэффициента использования номинальной силы пресса, исключающая его возможную перегрузку:

$$K = \frac{P}{P_H} = 1 - \frac{C(K_\sigma t \delta\sigma + K_H \Delta H)}{P_H} \quad . \qquad (44)$$

Из (44) видно, что коэффициент использования номинальной силы пресса зависит от жесткости системы пресс-штамп и величины случайной и систематической погрешности.

Выполнен анализ операций с различной жесткостью поковок – обратного выдавливания и штамповки в закрытом штампе – для определения характера и степени влияния указанных погрешностей, а также жесткости системы пресс-штамп на величину коэффициента ***K***. Установлено, что, исходя из условий эффективного использования кривошипных прессов, для штамповки в закрытом штампе относительно жестких поковок с низкими компенсационными возможностями (***d/2r***=0,02) целесообразно применять менее жесткие универсальные кривошипные прессы. В этом случае относительно высокий коэффициент использования их номинальной силы обеспечивается относительно невысокой точностью наладки. Напротив, менее жесткие поковки с большим радиусом на кромках (***d/2r***=0,06) по критерию точности их высоты следует штамповать на более жестких прессах, например, для холодного выдавливания с малой погрешностью наладки и, вследствие этого, достигая высокого значения коэффициента ***K***.

При анализе операции выдавливания тонкостенных стаканов (***D/d***=1,15) из малоуглеродистой стали и из сплава АД1 установлено, что влияние случайной погрешности существенно зависит от прочности материла, а влияние погрешности наладки практически не зависит от этой характеристики. Поэтому, погрешность толщины дна стальных стаканов почти в 2 раза больше, чем у алюминиевых. У стальных стаканов случайная составляющая погрешности толщины их дна в 1,3 раза больше погрешности наладки, а у алюминиевых стаканов наоборот, - погрешность наладки в 2 раза больше случайной составляющей.

В обоих случаях целесообразно точность толщины дна стаканов повышать не только применением более жестких специальных прессов для холодного выдавливания, а, в первую очередь, за счет повышения точности их наладки. Только при этом условии может быть достигнуто высокое значение коэффициента использования номинальной силы пресса (44).

Выполненный анализ показывает также, что при выполнении операций ХОШ с относительно низкой жесткостью поковок (осадка-калибровка высоких поковок, выдавливание стаканов с ψ<0,8) применение более жестких прессов для повышения точности поковок должно сопровождаться уменьшением погрешности наладки для обеспечения эффективного использования номинальной силы пресса.

Шестая глава посвящена сравнительному анализу точности высотных размеров поковок для трех вариантов выполнения технологических операций: на универсальных кривошипных прессах с относительно невысокой жесткостью, на специальных более жестких прессах и на универсальных с применением упоров. Увеличение жесткости системы пресс-штамп для повышения точности поковок может быть обеспечено в основном за счет выбора пресса с большей жесткостью. Применение с этой целью специальных прессов для холодного выдавливания или

чеканочных, жесткость которых в 2...3 раза больше жесткости универсальных, повышает жесткость упругих звеньев ТС не более чем в 1,3...1,5 раза. Однако, увеличение жесткости системы пресс-штамп наряду с уменьшением влияния случайных погрешностей приводит к росту влияния погрешности наладки. Пользуясь коэффициентами преобразования случайных погрешностей K_i можно определить соотношение погрешностей высотных размеров поковок, вызванных этими погрешностями при штамповке на универсальных (Δh_y) и специальных (Δh_C) прессах:

$$\frac{\Delta h_y}{\Delta h_C} = \frac{C_C + C_П}{C_y + C_П}, \qquad (45)$$

где C_C и C_y – соответственно жесткость системы пресс-штамп специального и универсального прессов; $C_П$ – жесткость поковки.

Аналогичным образом, используя коэффициенты преобразования K_H, определяется соотношение погрешностей высоты поковки, обусловленных погрешностью наладки:

$$\frac{\Delta h_C}{\Delta h_y} = \frac{1 + C_П / C_y}{1 + C_П / C_C}. \qquad (46)$$

Из (45) и (46) видно, что приведенные соотношения зависят от жесткости штампуемых поковок.

В тех случаях, когда применение специальных прессов технически или экономически неэффективно, может применяться штамповка с упором. Анализируемые схемы применения упоров предусматривают, что их высота определяется, когда высота поковки и сила сопротивления ее деформированию достигают максимально возможной величины. При этом упор «фиксирует» максимальную величину упругой деформации пресса со штампом (осадка-калибровка) или пресса (обратное выдавливание, штамповка в закрытом штампе). Нагрузка на упор передается при упругой разгрузке пресса со штампом или пресса, только в том случае, когда сила сопротивления поковки деформированию становится меньше ее максимальной величины.

Возможны две схемы соединения упругих элементов, включая упор, и поковку в ТС в зависимости от особенностей технологической операции и конструкции штампа. При осадке-калибровке с упором уравнение (1) системы (3) получит вид:

$$C(x_1 - H) - C_y(H_y - x_1) - P(x_1, x_m, x_i, \ldots, x_n) = 0,$$

где C_y и H_y – соответственно жесткость и высота упора.

В результате изменения исходной функции изменяются выражения для соответствующих коэффициентов преобразования (19), (20, (21), (22). В их знаменателе добавляется дополнительное слагаемое – C_y. Таким образом, введение упора в ТС позволяет уменьшить влияние на погрешность высоты осаживаемых поковок не только случайных погрешностей, но и погрешности наладки.

Повышение точности высотных размеров поковок при осадке-калибровке с применением упоров можно оценить величиной коэффициента эффективности

упора, отражающего соотношение погрешностей высоты поковки, штампуемой без упора и с упором. Используя соответствующие коэффициенты преобразования, получим:

$$K_y = \frac{\Delta h}{\Delta h_y} = 1 + \frac{C_y}{C + C_П}. \qquad (47)$$

Из (47) видно, что с уменьшением жесткости осаживаемой поковки величина коэффициента K_y возрастает, кроме того, выполненные расчеты показывают, что рациональная жесткость упора сопоставима с жесткостью штампа, а применение упоров наиболее эффективно на менее жестких универсальных прессах.

Для операции обратного выдавливания и штамповки в закрытых штампах с использованием функций преобразования получено выражение для коэффициента эффективности упора:

$$K_y = \frac{\Delta h}{\Delta h_y} = \frac{1}{\dfrac{C}{C_Ш} + \dfrac{C}{C_{ПР} + C_y + \dfrac{C_Ш C_П}{C_Ш + C_П}}}, \qquad (48)$$

где $C_Ш$ и $C_{ПР}$ – соответственно жесткость штампа и жесткость пресса.

Из (48) следует, что величина коэффициента K_y зависит от жесткости отдельных элементов ТС. При этом увеличение жесткости упора и поковки приводят к увеличению K_y.

На основе анализа точности поковок, изготавливаемых по трем вариантам, установлено, что по сравнению с универсальными прессами применение более жестких специальных позволяет уменьшить погрешность высотных размеров поковок в 1,1...1,5 раза в зависимости от характера технологической операции и жесткости поковок. При штамповке с применением упоров на универсальных прессах этот показатель достигает 3,0 при осадке калибровке и 1,5...2,0 при обратном выдавливании стаканов и штамповке поковок в закрытых штампах.

В главах 2 и 3 было показано, что точностью поковок можно управлять уменьшая их жесткость. При этом уменьшается влияние на их высоту случайных погрешностей и возрастает влияние погрешности наладки. Наиболее эффективно управлять жесткостью поковок штампуемых в закрытых штампах путем незначительного уменьшения величины радиуса r.

Выполненный анализ и экспериментальные исследования показали, что повышение точности высотных размеров поковок может быть достигнуто выполнением формоизменения поковки в закрытом штампе за два перехода, введением предварительного, на котором более высокая точность достигается уменьшением жесткости поковки путем увеличения величины радиусов на ее кромках. Наряду с уменьшением погрешности высоты в 1,25...1,7 раза величина деформирующей силы уменьшается на 25...35% по сравнению с одноперехоной штамповкой. На первом переходе на торцевых поверхностях поковки формируются кольцевые выступы – естественные компенсаторы с большим радиусом. На втором переходе точность высоты поковки, достигнутая на первом переходе не изменяется так как поковка выполняет функцию естественного упора. Это обеспечивается тем, что

сила деформирования кольцевого выступа для заполнения углов закрытого штампа не превышает 40…45% этого показателя на первом переходе.

В седьмой главе изложены результаты практического применения предложенной методики анализа и расчета точности высотных размеров поковок при выборе наиболее эффективных вариантов повышения точности. Приведены примеры реализации спроектированных технологических процессов ХОШ в производственных условиях. Для выбора наиболее эффективного технологического решения в каждом конкретном случае должны учитываться реальные производственные условия и особенности технологической операции. Принятию решения предшествует получение модели управления точностью. Например, для операции обратного выдавливания тонкостенных алюминиевых стаканов анализируется следующие факторы: жесткость системы пресс-штамп, величина доминирующей случайной погрешности и погрешность наладки, обусловленная технологическим назначением пресса. К перечисленным факторам в некоторых случаях может быть добавлена жесткость штампуемой поковки. Определяются уровни факторов, затем планируется и выполняется численный ПФЭ типа 2^K. Для расчета отклика – ожидаемой суммарной погрешности высоты поковки – в каждом опыте применяются коэффициенты преобразования случайных и систематической погрешности. В результате обработки численного эксперимента была получена модель регрессионного анализа:

$$\Delta t = 0{,}22 + 0{,}02\,\delta\sigma_S + 0{,}1\,\Delta H - 0{,}11\,C.$$

Дисперсионный анализ результатов ПФЭ показывает, что 47% дисперсии отклика определяется влиянием жесткости системы пресс-штамп (универсальный пресс – специальный пресс); 43% - погрешностью наладки (0,5 и 0,1 мм) и 10% погрешностью $\delta\sigma_S$ (10% и 5%). Если производственные условия исключают применение специального пресса для холодного выдавливания, может быть получена регрессионная модель для двух факторов. В этом случае результаты дисперсионного анализа показывают, что при выдавливании на универсальных прессах алюминиевых стаканов почти 90% дисперсии отклика (Δt) определяется погрешностью наладки, а 10% - погрешностью $\delta\sigma_S$. В этом случае точность толщины дна стаканов может быть повышена уменьшением погрешности наладки. При выдавливании на специальном прессе 74% погрешности толщины дна зависят от погрешности наладки и 26% - от погрешности механических характеристик. Так как в отличии от универсальных прессов возможности уменьшения погрешностей наладки у специальных прессов ограничены, тогда повышение точности толщины дна поковок может быть обеспечено применением партионной наладки, уменьшающей величину случайной погрешности.

Выполненные по предложенной методике расчеты показывают, что в результате уменьшения погрешности наладки и погрешности $\delta\sigma_S$, путем приведения ее к партионной погрешности, допуск толщины дна уменьшился с 16 до 14 квалитета при штамповке на универсальном прессе и до 13 квалитета точности на специальном для выдавливания.

В результате применения предложенной методики и на основе реализации технологических процессов штамповки поковок в закрытых штампах установле-

но, что наиболее эффективным фактором управления точностью поковок является уменьшение их жесткости путем увеличения естественного компенсатора. В частности, в результате реализации технологических мероприятий повышена точность высоты поковок при штамповке на универсальных прессах с 15 до 11 квалитета точности. Рассмотрен пример реализации в производственных условиях технологического процесса обратного выдавливания прямоугольных коробок из алюминиевых сплавов. Применение предложенной методики позволило определить условия выполнения технологического процесса, способствующие повышению точности толщины дна выдавливаемых коробок с 17 до 12 квалитета точности.

Приведены также результаты статистического анализа показателей точности технологических процессов – коэффициенты точности и коэффициенты уровня настроенности, величина которых свидетельствует о надежности технологических процессов по показателю их точности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В представленной работе содержатся научно обоснованные технологические решения, состоящие в повышении эффективности технологических процессов ХОШ за счет повышения точности штампуемых поковок, способствующие развитию промышленности, что выражается в повышении производительности труда и уменьшении металлоемкости выпускаемой продукции.
2. На основе системного анализа с применением математического моделирования и теории чувствительности систем разработана методика расчета и анализа точности высотных размеров поковок. Критериями точности являются коэффициенты преобразования исходных погрешностей в погрешность высоты поковок. Они позволяют не только количественно оценить величину ожидаемой погрешности, но и установить степень влияния жесткости системы пресс-штамп и жесткости штампуемых поковок на указанную погрешность с учетом особенностей технологической операции и характера действующих погрешностей.
3. На основе анализа с применением коэффициентов преобразования определено, что повышение жесткости системы пресс-штамп применением прессов с большей жесткостью уменьшает влияние случайных погрешностей и увеличивает влияние систематической постоянной погрешности наладки. Степень такого влияния зависит от жесткости штампуемых поковок, с увеличением которой возрастает влияние на погрешность высоты поковок случайных погрешностей и уменьшается влияние погрешности наладки.
4. В результате выполненного анализа и экспериментальных исследований установлено, что при осадке-калибровке и обратном выдавливании стаканов доминируют погрешности, вызванные рассеянием механических характеристик поковок и погрешностью наладки. При выполнении этих операций на менее жестких универсальных прессах повышение точности может быть обеспечено, в первую очередь, уменьшением погрешности наладки. При

штамповке на более жестких специальных прессах – применением партионной наладки для уменьшения величины исходных случайных погрешностей.

5. В результате выполненного анализа и экспериментальных исследований установлено, что при штамповке в закрытых штампах доминирующая погрешность обусловлена погрешностью объема исходных заготовок, а влияние рассеяния их механических характеристик пренебрежимо мало. Точность высоты поковок зависит от их жесткости. Так, если жесткость поковок более чем в два раза превышает жесткость системы пресс-штамп, тогда точность их высоты не зависит от жесткости упругих звеньев и может быть повышена уменьшением величины случайной погрешности, например, применением партионной наладки.

6. На основе выполненных многофакторных экспериментов с применением регрессионного и дисперсионного анализов выявлено влияние погрешностей исходных заготовок и технологического процесса, а также жесткости системы пресс-штамп на точность поковок. Установлено, что наряду с применением более жесткого пресса и уменьшением величины исходных погрешностей, точность может быть повышена уменьшением жесткости штампуемых поковок. Определено, что при осадке-калибровке относительно низких поковок это достигается увеличением степени осадки исходных заготовок, при обратном выдавливании стаканов – увеличением толщины их дна, а при штамповке в закрытых штампах – увеличением радиусов на кромках поковки.

7. На основе анализа с использованием коэффициентов преобразования установлено, что соотношение погрешностей высотных размеров поковок, штампуемых на универсальных и более жестких специальных прессах, достигает 3,0…3,5, так как точность наладки специальных прессов в 5 раз выше, чем универсальных. Если для указанных типов прессов обеспечивается одинаково высокая точность наладки, характерная для специальных прессов, тогда соотношение погрешностей высотных размеров при осадке-калибровке и обратном выдавливании стаканов составляет 1,3…1,5, и при штамповке в закрытых штампах – 1,1…1,25.

8. На основе анализа с использованием коэффициентов преобразования определено, что установка упоров при штамповке на универсальных прессах позволяет уменьшить влияние на погрешность высоты поковок как случайных погрешностей, так и систематической погрешности наладки. Установлено, что применение упоров на универсальных прессах позволяет уменьшить погрешность высотных размеров поковок при осадке-калибровке в 3 раза, и при выдавливании стаканов и штамповке в закрытых штампах в 1,5…2,0 раза по сравнению со штамповкой без упоров.

9. На основе анализа с использованием коэффициентов преобразования установлено, что эффективное использование номинальной силы кривошипного пресса, исключающее его возможную перегрузку по этому параметру, определяется величиной диапазона колебания деформирующей силы под влиянием случайных и систематической погрешностей наладки. Увеличение последней при применении пресса с большей жесткостью приводит к увеличе-

нию диапазона колебания силы деформирования и, вследствие этого, к уменьшению коэффициента использования номинальной силы пресса. Установлено, что увеличение жесткости применяемого пресса должно сопровождаться уменьшением погрешности наладки для повышения эффективности использования его номинальной силы.

10. Разработаны функциональные зависимости для расчета технологических параметров процесса штамповки поковок в закрытом штампе введением предварительного перехода, на котором повышение точности высоты поковок в 1,25...1,7 раза (по сравнению с однопереходной штамповкой) обеспечивается уменьшением жесткости поковок за счет увеличения радиусов на их внешних кромках. На втором переходе точность высоты, достигнутая на предварительном, не изменяется, так как поковка выполняет функцию естественного упора при заполнении углов закрытого штампа.
11. Представленные в работе технологические процессы, технологические решения и организационно-технические мероприятия применяются на машиностроительных предприятиях. При этом обеспечивается повышение точности высотных размеров поковок, изготавливаемых ХОШ на 3...6 квалитетов точности. Основные результаты работы используются в курсе лекций «Малоотходные технологии изготовления заготовок», читаемом в КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ:

1. Антонюк Ф.И. Верхняя оценка удельных усилий закрытой штамповки низких поковок // Технология, организация и экономика машиностроительного производства: Сб. НИИМАШ.– 1981. – Вып.8. – С. 3-5.
2. Антонюк Ф.И. Расчет усилий обратного выдавливания // Технология, организация и экономика машиностроительного производства: Сб. ВНИИТЭМР.– 1985. – Вып.7.– С. 10–12.
3. Антонюк Ф.И Оптимизация конструкции пуансонов для обратного выдавливания // Технология и оборудование кузнечно-штамповочного производства: Сб. ВНИИТЭМР.– 1987. – Вып.5. – С. 2–5.
4. Антонюк Ф.И. Анализ силовых параметров двустороннего комбинированного выдавливания // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – №1.– С.133–135.
5. Антонюк Ф.И. Верхняя оценка усилий обратного выдавливания полых заготовок коническим пуансоном с плоским торцом // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – №6. – С.96–98.
6. Антонюк Ф.И. Формоизменения и усилия двустороннего комбинированного выдавливания // Известия вузов. Машиностроение. – 1989. –№11.–С.129–131.
7. Антонюк Ф.И. Исследование факторов, влияющих на точность осадки осесимметричных поковок // Создание прогрессивных технологий, конструкций и систем и социально–экономические проблемы производства: Труды Всероссийской науч.-техн. конф. – Калуга, 1998. – С. 384.

8. Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г. Применение многофакторного эксперимента для анализа точности обратного выдавливания // Прогрессивные технологии и системы в приборо– и машиностроении: Труды Всероссийской науч.-техн. конф. – Калуга, 1998. – С. 164.
9. Вяткин А.Г., Антонюк Ф.И. Анализ факторов, влияющих на точность холодной плоской осадки // Прогрессивные технологии и системы в приборо– и машиностроении: Труды Всероссийской науч.-техн. конф. – Калуга, 1999. – С. 58.
10. Антонюк Ф.И. Выбор кривошипного пресса для холодной объемной штамповки в закрытых штампах // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 1999. – №1. – С.40-49.
11. Антонюк Ф.И., Сорокина И.И. Влияние способа наладки на точность штамповки // Прогрессивные технологии и системы в приборо– и машиностроении: Труды Всероссийской науч.-техн. конф. – Калуга, 2000. – С. 184.
12. Антонюк Ф.И. Анализ факторов, влияющих на точность холодной объемной штамповки в закрытом штампе // КШП. ОМД. – 2000. – №1. – С. 3–5.
13. Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г. Выбор пресса для холодной объемной штамповки по критерию точности поковок // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 2000. – №4. – С.15-24.
14. Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г. Сравнительный анализ точности холодной объемной штамповки на кривошипных и гидравлических прессах // Труды МГТУ. – 2000. – №578. – С.3-8.
15. Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г. Точность холодной осадки цилиндрических заготовок // КШП. ОМД. – 2000. – №10. – С. 16–21.
16. Вяткин А.Г., Антонюк Ф.И. Управление точностью холодной осадки на гидравлических прессах // Труды МГТУ. – 2000. – №578. – С.10-12.
17. Ланской Е.Н., Антонюк Ф.И. Анализ точности холодного выдавливания полых поковок статистическими методами // КШП. ОМД. – 2001. – №1. – С. 14–20.
18. Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г. Анализ точности операций объемной штамповки с использованием функций чувствительности // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо– и машиностроении: Труды Всероссийской науч.– техн. конф. – М., 2001. – Т. 1.– С. 36-38.
19. Антонюк Ф.И., Малышев А.Н. Верхняя оценка силы выдавливания стаканов с внутренними наклонными стенками // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо– и машиностроении: Труды Всероссийской науч.–техн. конф. – М., 2001. – Т. 1.– С. 41-42.
20. Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г. Зависимость погрешности наладки прессов от жесткости штампуемой поковки // Труды МГТУ. – 2001. – №581. –С.123-125.
21. Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г. Влияние погрешности наладки гидравлических прессов на точность холодной осадки // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо– и машиностроении: Труды Всероссийской науч.–техн. конф. – М., 2001. – Т. 1.– С. 39-40.
22. Вяткин А.Г., Антонюк Ф.И. Влияние контактного трения на процесс деформирования при осадке цилиндрических поковок // Труды МГТУ. – 2001. – №581. – С.154-157.

23. Антонюк Ф.И., Малышев А.Н. Исследование влияния погрешности исходной заготовки на геометрические параметры поковки // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо– и машиностроении: Труды Всероссийской науч.-техн. конф. – М., 2002. – С. 139-140.
24. Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г. Влияние погрешности наладки кривошипного пресса на точность поковок, штампуемых в закрытых штампах // Труды МГТУ. – 2002. – №584. – С.42-45.
25. Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г. Влияние погрешности наладки кривошипных и гидравлических прессов на точность поковок, получаемых холодной объемной штамповкой // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 2002. – №2. – С.115-126.
26. Ланской Е.Н., Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г. Точность поковок, изготавливаемых холодной объемной штамповкой на кривошипных и гидравлических прессах // КШП. ОМД. – 2002. – №1. – С. 25–29.
27. Антонюк Ф.И., Малышев А.Н. Определение силы обратного выдавливания на основе метода единичных деформируемых областей // Труды МГТУ. – 2003. – №587. – С.39-41.
28. Антонюк Ф.И., Космынина Е.В. Сравнение эффективности способов повышения точности поковок // Труды МГТУ. – 2003. – №587. – С.42-44.
29. Антонюк Ф.И., Малышев А.Н. Анализ точности операции обратного выдавливания стаканов с внутренними наклонными стенками на основе функций чувствительности // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо– и машиностроении: Труды Всероссийской науч.-техн. конф. – М., 2003. – Т.1. – С. 23-24.
30. Антонюк Ф.И., Ланской Е.Н. Точность холодной объемной штамповки на кривошипных прессах в штампах с упорами и без упоров. Часть 1. Осадка–калибровка // КШП. ОМД. – 2003. – №11. – С. 18–25.
31. Антонюк Ф.И., Ланской Е.Н. Точность холодной объемной штамповки на кривошипных прессах в штампах с упорами и без упоров. Часть 2. Обратное выдавливание и штамповка в закрытом штампе // КШП. ОМД. – 2004. – №1. – С. 19–29.