

1551269

На правах рукописи

КАТЯКОВА ЕВГЕНИЯ ВАСИЛЬЕВНА

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ШТАМПОВКИ ЗУБЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОПЕРЕЧНЫМ ВЫДАВЛИВАНИЕМ

Специальность 05.03.05 – Процессы и машины обработки
давлением

Е. Каткова

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1996

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

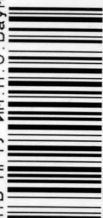
Научный руководитель - профессор Кондратенко В.Г.

Научный консультант - доктор технических наук Абдуллаев Ф.С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Алюшин Ю.А.
кандидат технических наук
Ильинич М.А.

Ведущая организация: НПП "Темп"

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1551269

Каткова Е. В. Исследование

Защита состоится "15" мая 1996 г. в _____ час.
на заседании диссертационного Совета К 053.15.13. при
МГТУ им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская
ул. д.5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный
печатью, просим присылать по адресу: 107005, Москва, 2-я
Бауманская ул. д.5.

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

Автореферат разослан "_____" _____ 1996 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
к.т.н., доцент

Шубин И.Н.

Подп. к печати 11.04.96. Объем 1 п.л.
Типография МГТУ им. Н.Э.Баумана

Зак 127. Тир. 100 экз.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1531269

Актуальность. В станкостроении, автомобильной, тракторной и инструментальной промышленности широко применяют детали типа колец и втулок с наружным рабочим профилем (зубчатые колеса, звездочки, фасонные втулки, полые шлицевые втулки, насадки, фрезы, развертки и т.д.), которые все еще изготавливают резанием из проката или штампованной заготовки с низким коэффициентом использования материала. Процесс производства заготовки под механическую обработку связан с многопереходной штамповкой, обуславливающими значительные отходы металла и энергетические затраты. Трудоемкость процесса зубообработки резанием составляет 40-60% всей трудоемкости получения колес. Значительное снижение этих затрат может быть достигнуто путем формообразования колес с зубьями методами обработки давлением. Среди них широко известным является способ накатки. Однако накатной инструмент требует многократной корректировки профиля, что приводит к снижению эффективности процесса. В последнее время среди технологий формообразования внешнего профиля деталей, значительное место стали занимать техпроцессы, основанные на прямом и обратном выдавливании. Экономия металла при штамповке шестерен с зубьями (ШЗ) и связанное с этим уменьшение объема механообработки делает процесс штамповки этих изделий в закрытых штампах перспективным. Определить целесообразность применения этого процесса можно только с учетом стойкости инструмента-штампа, которая зависит от контактного трения, температурных условий штамповки и в значительной степени от величины удельной деформирующей силы. Появление и развитие новых методов изготовления инструмента, таких как выдавливание и литье позволяет уменьшить расходы металла на штамповую оснастку и, тем самым, расширить область целесообразного применения радиального выдавливания деталей с зубьями. Широкое использование этих процессов в промышленности сдерживает ряд причин. К их числу относят отсутствие надежных рекомендаций по проектированию, включающих методику расчета энергосиловых параметров процесса, учитывающую особенности течения металла при заполнении полостей ступицы и зубьев различного профиля. В связи с этим исследование технологического процесса штамповки радиальным выдавливанием поковок с зубьями является актуальной задачей.

Цель и задачи работы. Цель работы - разработка методики проектирования технологических процессов штамповки в

закрытых штампах поперечным выдавливанием деталей типа зубчатых колес.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучение закономерностей течения металла при штамповке в закрытых штампах поперечным выдавливанием деталей типа зубчатых колес.

2. Теоретическое исследование напряженного состояния в различных зонах очага пластической деформации в процессе штамповки деталей типа зубчатых колес.

3. Экспериментальные исследования для оценки достоверности и надежности предложенной математической модели и анализ влияния размеров деталей на энергосиловые параметры процесса штамповки.

4. Разработка методики проектирования технологического процесса штамповки деталей типа зубчатых колес.

5. Опытное опробование разработанного технологического процесса в промышленности и методики его проектирования в технологической практике.

Научная новизна. Разработана научно-обоснованная методика расчета энергосиловых параметров процесса радиального выдавливания деталей типа шестерен с зубьями.

На основе метода верхней оценки предложена схематизация процесса выдавливания и аналитические соотношения для расчета энергосиловых параметров на всех стадиях процесса с учетом формы профиля выдавливаемых зубьев.

Получены теоретические и экспериментальные зависимости энергосиловых параметров процесса от соотношений размеров выдавливаемых поковок.

Автор защищает:

- математические модели процесса формоизменения заготовки при радиальном выдавливании деталей типа шестерен с зубьями на различных этапах деформирования;
- результаты экспериментальных и теоретических исследований, позволившие установить влияние соотношений размеров поковок на энергосиловые параметры процесса и деформированное состояние заготовки;
- методику проектирования технологического процесса выдавливания деталей с зубьями различного профиля.

Практическая ценность. Предложенная методика дает возмож-

ность производить выбор технологического оборудования по усилию и работе деформации для штамповки поковок типа цилиндрических деталей с зубьями различного профиля.

Разработанная методика проектирования, представленная в виде совокупности программ на языке Фортран и реализованная на персональных компьютерах, позволяет проектировать малоотходные технологические процессы выдавливания деталей с зубьями, штамповую оснастку для их изготовления и давать рекомендации для вновь проектируемого кузнечно-прессового оборудования - прессов двойного действия.

Достоверность результатов, полученных в ходе теоретических исследований подтверждена использованием фундаментальных исходных уравнений, сходимостью расчетных и экспериментальных данных в пределах 20%. Экспериментальные данные получены с использованием современных приборов и средств измерений.

Использование результатов. Разработанная методика проектирования была использована в технологической практике НИИТАВТОПРОМ, АО "БЕЦЕМА", Узбекского металлургического комбината.

Апробация работы. Основные положения диссертации были доложены на научных семинарах кафедры Обработки металлов давлением Ташкентского государственного технического университета в 1992, 1995 г.г., на Республиканских научно-технических конференциях "Проблемные вопросы развития и повышение эффективности внедрения автоматических производственных комплексов с разной степенью технологической гибкости (г.Ташкент, 1989г.), "Проблемные вопросы создания и внедрения экологически чистых технологий на предприятиях машиностроения республики Узбекистан" (г.Ташкент, 1992г.), Межвузовской научно-теоретической конференции молодых ученых и преподавателей (г. Ташкент, 1987).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 4 печатных работы.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 122 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех разделов, общих выводов, списка литературы и приложения, содержит 42 рисунка, 4 таблицы, список литературы из 106 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе приведены существующие конструкции зубчатых деталей с фланцем и различные профили зубьев. Изложен обзор существующих методов изготовления зубчатых деталей. Традиционным является способ горячей штамповки полуфабрикатов зубчатых колес без зубьев с последующей их нарезкой механообработкой. Существенными недостатками этого метода являются большие отходы металла и перерезание волокон в материале на контактной поверхности зуба. Рассмотрены работы, посвященные изготовлению зубчатых колес методами накатки. Распространенными дефектами при горячей накатке зубчатых колес являются образование гребешков на торцах и вершинах зубьев шестерен, закаты. Точность размеров зубчатых колес, изготавливаемых горячей накаткой заметно ниже по сравнению с горячей штамповкой.

Создание технологических процессов и разработка инструмента для штамповки шестерен с зубьями отражена в работах Алифанова А.В., Вахтера А.А., Кондратенко В.Г., Меркина С.А., Овчинникова А.Г., Орлова А.В., Савельева А.В., Согрипина Ю.П., Федорова Л.И., Челышева А.П. и других авторов. Широкое распространение получил разработанный сотрудниками НИИТАВТОПРОМа способ изготовления инструмента для штамповки зубчатых колес литьем в корковые формы.

Кратко рассмотрены методы теоретического анализа процессов объемной штамповки. К их числу следует отнести инженерный метод, метод линий скольжения, метод верхней оценки, метод конечных элементов. Теоретическому анализу процессов радиального выдавливания посвящены работы Абдуллаева Ф.С., Алиева И.С., Блинова М.В., Быкова И.А., Григоренко А.С., Илинича М.А., Кондратенко В.Г., Овчинникова А.Г., Полякова И.С., Цхондия А.Г. и ряда других специалистов. Теоретическому анализу процессов выдавливания поковок типа шестерен с зубьями посвящено крайне ограниченное число работ, к которым относятся труды Григоренко А.С. с соавторами, в которых задачу решали методом верхней оценки. Однако в этих работах отсутствует учет формы профиля выдавливаемых зубьев, учет деформаций материала в области его затекания в зубья и течение металла рассмотрено лишь для конечного момента деформирования, что дает информацию лишь о максимальной деформирующей силе и не позволяет определить работу деформации, а значит и рассчитать мощность привода используемого оборудования.

Приведен обзор методов экспериментального определения де-

формированного состояния заготовки, силовых и кинематических параметров процесса. Для анализа формоизменения заготовок приняты методы сеток, метод анализа течения по макроструктуре и метод фоторегистрации. Для регистрации силовых параметров наиболее предпочтительным является метод тензометрирования. Сформулированы задачи исследования.

Во втором разделе изложена методика проведения теоретических и экспериментальных исследований. Предложена схематизация процесса радиального выдавливания цилиндрических деталей с зубьями на четыре этапа: 1) осаживание заготовки (свободного и стесненного); 2) радиального выдавливания металла в кольцевую щель, пока наружный диаметр фланца не станет равным диаметру впадин зубчатого колеса (диаметру выступов матрицы); 3) заполнение полостей зубьев и частичного дозаполнения верхнего угла фланца; 4) доштамповка, заключающаяся в дозаполнении углов фланца и зубьев. В качестве основного метода теоретического анализа принят метод верхней оценки. Изложены фундаментальные основы метода. При анализе принимали следующие допущения: материал заготовки в условиях горячей деформации идеальный жестко-пластический; касательные напряжения на контактных поверхностях постоянными и пропорциональными напряжению текучести, а на поверхностях разрыва скоростей течения равными $0,5 \sigma_s$.

Описана методика изучения формоизменения заготовок на основе метода сеток. Его применяли на заключительных этапах процесса изготовления зубчатых колес. Для этого использовали составные образцы (поверхность разреза включала ось заготовки), которые в процессе деформирования устанавливали так, что поверхность разделения совпадала с осью зуба или серединой образующей впадины. Сетки, нанесенные на исходном образце и полученные в процессе деформации, регистрировали фотораграфированием.

Метод макроструктурных исследований использовали только для определения зон раздела течения в плоскости под зуб и оценки неравномерности течения по высоте образующегося бурта. Изменение формы профиля заготовки в процессе выдавливания в кольцевую щель регистрировали фотосъемкой. Для проведения экспериментального исследования была спроектирована штамповая оснастка, которая состояла из двух полуматриц, имеющих запорное устройство в виде 3-х динамометрических винтов, расположенных под 120° . В нижнюю полуматрицу на проставку устанавливали сменные матрицы, которые позволяли изменять высоту, модуль, коли-

чество зубьев и диаметр зубчатого колеса. Пуансон, перемещаясь в верхней полуматрице, выдавливал металл в полость образованную рабочей матрицей. Для регистрации деформирующей силы штамповки использовали мессдозу. Материал заготовок для исследуемого процесса свинец GI и отожженный алюминий АД-I.

В третьем разделе выполнен теоретический анализ процесса радиального выдавливания деталей типа шестерен с зубьями. Этап осаживания заготовки вносит небольшой вклад в энергетику процесса деформирования, поэтому при его рассмотрении ограничились использованием известных формул для расчета деформирующей силы открытой и стесненной осадки. Анализ последующих этапов штамповки проводили на основе метода верхней оценки. Расчетная схема для этапа свободного радиального выдавливания металла в кольцевую жель показана на рис.1. Зоны I и IV считали жесткими. В зоне I:

$U_z = U_0$; $U_p = 0$; в зоне IV: $U_z = U_p = 0$. Для зон II и III принимали следующие поля скоростей:

$$\text{Зона II. } U_z = -U_0 \frac{z(a+h_2)}{h_2(a+z)} ; \text{ где } h_2 = h_0 + \frac{B-h_0}{R_M} \rho .$$

Из условия несжимаемости

$$U_p = U_0 \frac{a^2}{(a+z)^2} \left[\frac{1}{b} + \frac{\rho}{2a} - \frac{h_0}{b^2 \rho} \ln \left(1 + \frac{b\rho}{h_0} \right) \right], \text{ где } b = \frac{B-h_0}{R_M} ;$$

$$a = b \left(0,03 + 0,5 \left(\frac{b}{R_M} - 0,42 \right) \right) \text{ при } 0,42 \leq \frac{b}{R_M} < 0,72$$

$$a = 0,18b \text{ при } \frac{b}{R_M} \geq 0,72$$

$$\text{Зона III. } U_p = U_0 \frac{R_0^2}{2\rho h_3}, \text{ где } h_3 = b - \frac{B-h_1}{R_T-R_M} (\rho - R_M).$$

Из условия несжимаемости

$$U_z = -U_0 \frac{R_M^2}{2} \frac{(B-h_1)(R_T-R_M)z}{[B(R_T-\rho) - h_1(R_M-\rho)]^2 \rho} .$$

Компоненты тензора скоростей деформаций вычисляли подстановкой выражений для проекций скоростей в соотношения Коши. Интенсивность скоростей деформаций для получения решения в упрощенном виде выражали в виде

$$\dot{\epsilon} = I, I|\dot{\epsilon}|_{\max} .$$

Мощность пластической деформации записывали в виде интеграла

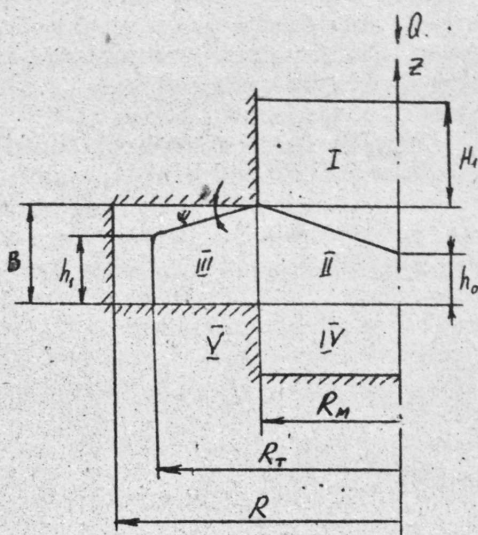


Рис. 71. Схема процесса на стадии свободного поперечного выдавливания в кольцевую щель

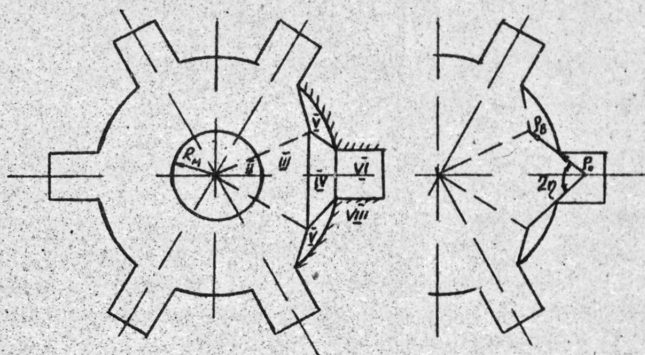


Рис. 2. Разделение очага пластической деформации при заполнении шлицев на зоны перпендикулярно оси поковки

$$W_{II} = \sigma_s \int_V \varepsilon \, dV ,$$

в зоне II

$$W_2^{(c)} = \sigma_s \int_0^M \int_0^{h_0} \int_0^a I_1 U_0 \frac{a}{(a+z)^2} \frac{(a+h_0+B\rho)}{(h_0+B\rho)} \rho d\rho d\varphi dz \cong I_1 \pi \sigma_s U_0 R_M^2 .$$

в зоне III

$$W_3^{(c)} \cong I_1 \pi \sigma_s U_0 R_M^2 \ln \frac{R_T h_1}{R_M B} .$$

Мощность касательных напряжений для разрыва скоростей [U] на поверхности S

$$W_{сДВ} = \int_S \tau_s [U] ds .$$

Между зонами I и II эта мощность равна

$$W_{12}^{(c)} = \pi \sigma_s U_0 \frac{a^2 R_M^3}{(B-h_0)^3} \sqrt{1 + \left(\frac{B-h_0}{R_M} \right)^2} \left[\frac{B^2 - h_0^2}{2a(a+B)} + \frac{h_0 B}{a(a+B)} \ln \frac{h_0}{B} \right] .$$

Между зонами II и IV

$$W_{24}^{(c)} = \pi \sigma_s U_0 R_M^3 \left[\frac{1}{6a} + \frac{B+h_0}{2(B-h_0)^2} + \frac{h_0 B}{(B-h_0)} \ln \frac{h_0}{B} \right] .$$

Между зонами II и III

$$W_{23}^{(c)} = \pi \sigma_s U_0 R_M \left[a+B - \frac{(B-h_1)R_M}{4(R_T-R_M)} - a \left(\frac{a}{B} + 1 \right) \ln \left(1 + \frac{B}{a} \right) \right] .$$

Мощность сил контактного трения находили в виде

$$W_T = \mu \sigma_s \int_S [U] ds .$$

Именуя для удобства матрицу зоной V, выражения для мощностей трения в зонах I и III записывали в виде

$$W_{15}^{(c)} = 2\pi \mu \sigma_s h_1 U_0 R_M ; \quad W_{35}^{(c)} = \mu \pi \sigma_s U_0 R_M^2 \left[\frac{R_T - R_M}{h_1 - B} \right] \ln \frac{h_1}{B} .$$

Суммарную мощность и усилие деформирования для этого этапа находили по формулам

$$W^{(c)} = W_2^{(c)} + W_3^{(c)} + W_{12}^{(c)} + W_{24}^{(c)} + W_{23}^{(c)} + W_{15}^{(c)} + W_{35}^{(c)} ; \quad Q = W^{(c)} / U_0 .$$

Анализ этапа заполнения металлом полостей зубьев. Первоначаль-

но рассмотрим заполнение шлицевых зубьев. Расчетная схема для него показана на рис.2. За исключением зоны II, соотношения для которой заимствуем из предыдущего этапа, для остальных зон примем схему плоской деформации $U_z = 0$. Из условия неразрывности получили:

Зона III

$$U_p = U_0 \frac{R_M^2}{2B\rho}$$

Зона IV

$$U_p = \frac{U_B \rho_B}{\rho}, \quad \text{где } U_B = U_0 \frac{\pi D_M^2}{8\rho_B z \sin \eta_B}, \quad z - \text{число зубьев (шлицев)}$$

Зоны V и VI считали жесткими. В зоне V $U_p = 0$.

$$\text{Зона VI} \quad U = U_0 \frac{\pi D_M^2}{4z AB} = \text{const.}$$

Далее получили:

Зона III

$$W_3^{(III)} = 2\pi \sigma_s B \int_{R_M}^{R_N} 2/\sqrt{3} U_0 \frac{R_M^2}{2B\rho^2} \rho d\rho = 2\pi/\sqrt{3} \sigma_s U_0 R_M^2 \ln \frac{R_N}{R_M}$$

Зона IV

$$W_4^{(IV)} = \int_{\rho_0}^{\rho_B} \sigma_s \frac{2U_B \rho_B}{\rho^2} 2\rho \eta_B d\rho = 4/\sqrt{3} \sigma_s \eta_B U_B \rho_B \ln \frac{\rho_B}{\rho_0}$$

Мощность сдвига между зонами IV и V

$$W_{45}^{(IV)} = \int_{\rho_0}^{\rho_B} \sigma_s \frac{U_B \rho_B}{\rho} B d\rho = \sigma_s U_B \rho_B B \ln \frac{\rho_B}{\rho_0}$$

Мощность трения по торцевым поверхностям зоны IV и поверхностям шлицев

$$W_{48}^{(IV)} = 4\mu \sigma_s U_B \rho_B \eta (\rho_B - \rho_0); \quad W_{68}^{(IV)} = \pi \mu \sigma_s U_0 h_K D_M^2 \frac{A+B}{2z AB}$$

Суммарную мощность на этом этапе находили, складывая полученные выражения мощностей с учетом количества шлицев. Для случая эвольвентных, либо трапециевидальных зубьев мощность пластической деформации в зоне VI (см.рис.2) отлична от нуля. Задачу ее определения рассматривали в общей постановке, представляя криволинейный профиль полости зуба совокупностью отрезков прямых (см.рис.3). При анализе использовали подход Б.Авицура с соавторами для пластического течения между двумя наклонными плоскостями и рассматривали одну половину зуба. Для каждой зоны $(k+1/2)$

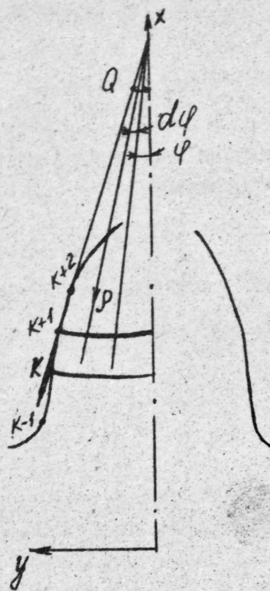


Рис.3. Выбор полярной системы координат в плоскости зуба

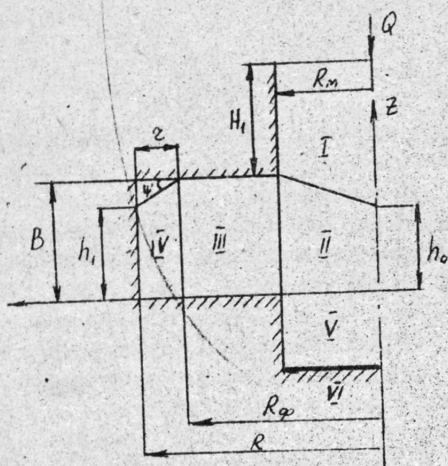


Рис.4. Схема процесса на этапе подштамповки

между точками профиля с номерами k , $k+1$ принимали следующее поле скоростей

$$U_p = -U_k^* \frac{\rho_k}{\rho} \cos \varphi,$$

где U_k^* - скорость в направлении ρ при $\varphi = 0$ при $\rho = \rho_k$, которую находили из условия постоянства расхода металла, выдавливаемого пуансоном и затекающего в полости зубьев

$$U_k^* = \frac{\pi D_0^2}{8z B \rho_k \sin \Theta_{k+1/2}} U_0.$$

Мощность пластической деформации в зоне $k+1/2$

$$W_{k+1/2} = 2/\sqrt{3} \sigma_s B U_k^* \rho_k \ln \frac{\rho_k}{\rho_{k+1}} \left| \int_0^{\Theta_{k+1/2}} \sqrt{1 - 3.4 \sin^2 \varphi} d\varphi \right|.$$

Интеграл вычисляли численно методом трапеций.

Мощность пластического деформирования находили суммированием $W_{k+1/2}$ по всем зонам.

Мощность сдвига между зонами $k-1/2, k+1/2$, как и выше вычисляли через интеграл разрыва скорости по поверхности их раздела. Указанный разрыв находили, считая, что абсолютное значение скорости U_p непрерывно на границе, однако происходит изменение его направления вследствие отличия центров кривизны соседних зон. Разрыв скорости на границе можно представить в следующем виде

$$\Delta U = U_{k+1/2}^{+(k)} - U_{k-1/2}^{+(k)}$$

Его абсолютное значение выразили соотношением

$$|\Delta U_k| = U_k^* \sqrt{(\cos^2 \varphi_{k+1/2} - \cos^2 \varphi_{k-1/2})^2 + (\cos \varphi_{k+1/2} \sin \varphi_{k+1/2} - \cos \varphi_{k-1/2} \sin \varphi_{k-1/2})^2}$$

Интеграл разрыва скорости по поверхности раздела соседних зон находили численно методом трапеций. Полную мощность сдвига между зонами находили суммированием их по всем поверхностям. Мощность трения по боковой и торцевой поверхности вычисляли следующим образом

$$W_{\text{тр.бок.}} = \mu \sigma_s B \sum_{k=1}^{K-1} U_k \rho_k \cos \Theta_{k+1/2} \ln \frac{\rho_k}{\rho_{k+1}};$$

$$W_{\text{тр.торц.}} = 2\mu \sigma_s \sum_{k=1}^{K-1} (U_k^* \rho_k (\rho_k - \rho_{k+1}) \sin \Theta_{k+1/2}).$$

Суммируя полученные выражения мощностей пластической деформации, сдвига и трения и удваивая полученный результат (т.к. при анализе рассматривали половину зуба), им заменяли величину

$w_{68}^{(III)}$, рассматриваемую при заполнении шлицев.

Этап доштамповки схематизировали осесимметричным течением прямой фаски в угол, как это показано на рис. 4. Угол наклона фаски к оси ρ считали неизменным в процессе доштамповки и равным его величине в конце этапа свободного радиального выдавливания. Скорость движения фаски в точке А находили из условия равенства расходов металла

$$U_r = \frac{R_M^2 U_0}{2r(2R-r)\operatorname{tg}\varphi}.$$

Поле скоростей записывали в следующем виде

Зона I. $U_\rho = 0$; $U_z = -U_0$.

Зона II. $U_z = -U_0 \frac{z}{h}$; $U_\rho = U_0 \frac{1}{b} \left(b - \frac{h_0}{\rho} \ln \left(1 + \frac{b \rho}{h_0} \right) \right)$.

Зона III. $U_\rho = U_0 \frac{R_M^2}{2B\rho}$; $U_z = 0$.

Зона IV. $U_\rho = U_r \frac{z}{B} \frac{(R-\rho)}{R-R_\Phi}$; $U_z = U_r \operatorname{tg}\varphi \frac{z}{B-r\operatorname{tg}\varphi} \frac{(\rho-R_\Phi)}{(R-R_\Phi)}$.

Интенсивности скоростей деформации и мощности пластической деформации для соответствующих зон записали следующим образом:

В зоне II

$$w_2^{(II)} = \sigma_s 2\pi \int_0^{R_M} \int_0^h 1,1 U_0 \frac{1}{h_0 + b\rho} \rho \, d\rho \, dz = 1,1 \pi \sigma_s U_0 R_M^2.$$

В зоне III

$$w_3^{(III)} = \sigma_s 2\pi \int_{R_M}^{\Phi} \int_0^B 1,1 U_0 \frac{R_M^2}{2B\rho^2} \rho \, d\rho \, dz = 1,1 \pi \sigma_s U_0 R_M^2 \ln \frac{R_\Phi}{R_M}.$$

В зоне IV выбор максимальной деформации представляется не столь однозначным. Поэтому сочли целесообразным использовать общее выражение для интенсивности скоростей деформаций. Для простоты в него вместо выражений компонент тензора скоростей деформаций их средние значения, полагая $z = B/2$, $\rho = R - r/2$. Тогда мощность пластической деформации определили в виде

$$w_4^{(IV)} = \varepsilon_1^{(CP)} v_4, \text{ где } v_4 = \pi r \left[(2R-r)B - (R-r/3)r \operatorname{tg}\varphi \right].$$

Мощность сдвига между соответствующими зонами

$$w_{12}^{(I)} = \sigma_s U_0 \pi \sqrt{1 + \left(\frac{B-h_0}{R_M} \right)^2} \frac{R_M^2}{(B-h_0)^2} \times \\ \times \left[\frac{(B-h_0)R_M}{2} - \frac{h_0 R_M B}{(B-h_0)} \ln \frac{B}{h_0} + h_0 R_M \right].$$

$$W_{26}^{(D)} = \pi \sigma_s U_0 \frac{R_M^2}{(B - h_0)^2} \left[\frac{(B - h_0) R_M}{2} - \frac{h_0 B R_M}{(B - h_0)} \ln \frac{B}{h_0} + h_0 R_M \right].$$

$$W_{23}^{(D)} = 0,5 \sigma_s 2\pi \int_0^B U_0 \frac{z}{B} R_M dz d\varphi = \pi \sigma_s U_0 \frac{R_M B}{2}.$$

Мощность сдвига между зонами III и IV равна нулю, поскольку отсутствует разрыв скорости на границе $W_{34}^{(D)} = 0$.

Мощность сил контактного трения между соответствующими зонами заготовки и матрицей (обозначим ее зоной VI)

$$W_{16}^{(D)} = 2\pi \sigma_s U_0 H_1 R_M; \quad W_{36}^{(D)} = 4\mu \sigma_s \pi U_0 \frac{R_M^2 (R_\Phi - R_M)}{B}$$

$$W_{46}^{(D)} = \pi \mu \sigma_s U_r R (B - r \operatorname{tg} \varphi) \operatorname{tg} \varphi.$$

Мощность трения металла в зоне IV по нижней торцевой поверхности равна нулю, поскольку у при $z = 0$ $U_\varphi = 0$.

Формулу для расчета распорных усилий получили путем интегрирования эпюры нормальных напряжений σ_z , полученной профессором Л.И. Живовым, по кольцевой поверхности фланца.

В работе предложено для получения косозубых цилиндрических колес осуществлять скручивание прямозубых путем проталкивания через скручивающую матрицу. Силу, необходимую для скручивания определяли в виде суммы усилия скручивания без трения, выражаемого через скручивающий момент из условия равенства работ, и силы трения, которую находили, считая трение максимальным. Момент скручивания определяли в предположении, что все сечение находится в пластическом состоянии. Из анализа полученных соотношений установлено, что момент скручивания зубчатого вала, отнесенный к моменту скручивания цилиндрического вала с наружным диаметром, равным диаметру делительной окружности, убывает с увеличением числа зубьев при фиксированном отношении внутреннего и наружного диаметра и возрастает с увеличением этого отношения при заданном количестве зубьев.

В четвертом разделе и.ложены результаты экспериментальных исследований и теоретического анализа. Экспериментальные данные, полученные на промежуточных стадиях процесса, явились основой его схематизации названными выше этапами. Исследования очага деформации, выполненные методом сеток и методом анализа макроструктуры, позволили обоснованно разделить его на зоны и

принять в них кинематически возможные поля скоростей, схожие с реальной картиной течения металла. Получено, что максимальные деформации имеют место в нижней центральной части фланца. Для этапа свободного радиального выдавливания в кольцевую щель представлены результаты фоторегистрации наружного профиля по ходу процесса. Установлено, что по ходу процесса угол ϕ уменьшается.

Теоретические и экспериментальные исследования кривой усилия по ходу показали, что на этапе свободного радиального выдавливания деформирующая сила остается практически неизменным. С увеличением относительной высоты ступицы B/P_M в диапазоне 0,3-0,5 она снижается примерно на треть. Дальнейшее увеличение относительной высоты фланца не оказывает заметного влияния на деформирующую силу. Вклад этапа свободного радиального выдавливания в энергетику процесса определяется разностью $R-R_M$. В исследуемом диапазоне размеров он составляет 30-40% от полной работы деформации. При радиальном выдавливании концевой части заготовки деформирующая сила оказалась примерно на 15% ниже, чем при выдавливании средней части заготовки.

Отмечено, что на этапе заполнения полостей зубьев происходит частичное дозаполнение верхнего угла фланца. При этом рост деформирующей силы по ходу процесса происходит практически линейно, что позволяет при проведении расчетов рассмотреть лишь конечный момент затекания металла в зуб, аппроксимировав промежуточные этапы по линейному закону. Вклад этапа заполнения зубьев в полное усилие штамповки возрастает с увеличением степени обжатия материала в полости зуба, количества зубьев, высоты зубьев. Указанный этап вносит наибольший вклад в энергетику процесса деформирования. В целом расхождения расчетных и экспериментальных кривых деформирующих сил превышают 20%. Максимальная деформирующая сила имеет место при дозаполнении верхних углов фланца и зубьев. Однако вклад этапа доштамповки в энергетику процесса незначителен.

Изложена методика проектирования процесса радиального выдавливания деталей типа шестерен с зубьями. Диаметр контейнера целесообразно выбирать равным диаметру ступицы выдавливаемой шестерни. При отсутствии ступицы его следует выбирать равным диаметру впадин поковки, что позволяет сократить энергозатраты и уменьшить деформации заготовки. Силовые расчеты рекомендовано начинать с определения мощности заполнения зубчатого венца,

а затем производить расчеты этапов осаживания, свободного радиального выдавливания. На третьем этапе, когда металл одновременно течет в полости зубьев и в верхний угол фланца, предложено определять уровень запоточения фланца, исходя из равенства мощностей течения металла в зубчатый венец и в угол фланца. На основании этого определяли перемещение пуансона в конце рассматриваемого этапа. Далее следует проводить расчет этапа доштамповки. При этом целесообразно ограничить процесс величиной фаски, соответствующей допустимому радиусу скругления угла по ГОСТ 7505-74. Описанная выше методика реализована на персональном компьютере в виде комплекса программ на алгоритмическом языке Фортран.

Результаты работы в виде методики проектирования технологических процессов выдавливания деталей типа шестерен с зубьями использованы в технологической практике АО "БЕЦЕ-МА", Узбекского металлургического комбината.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Предложена схематизация процесса радиального выдавливания деталей типа шестерен с зубьями, разделяющая процесс на четыре этапа: осаживание заготовки до заполнения металлом радиального зазора между начальным диаметром заготовки и диаметром контейнера матрицы; открытое радиальное выдавливание в кольцевую щель до контакта наружного диаметра выдавливаемого фланца с цилиндрической поверхностью выступов матрицы, соответствующей окружности впадин зубьев; заполнение полостей для оформления зубьев и частичного затекания металла в верхний угол фланца; дозаполнения верхних углов полости фланца и зубьев. На основе метода верхней оценки разработаны математические модели трех последних этапов, позволяющие с единых позиций рассматривать процессы истечения металла в шлицевые, трапецеидальные, криволинейные (в том числе эвольвентные) зубья.

2. На этапе свободного радиального выдавливания деформирующая сила остается практически неизменной. С увеличением относительной высоты ступицы B/D_M в диапазоне 0,3-0,5 она снижается примерно на треть. Дальнейшее увеличение относительной высоты фланца не оказывает заметного влияния на деформирующую силу. Этап свободного радиального выдавливания составляет 30-40% от полной работы деформации. При радиальном выдавливании концевой части заготовки деформирующая сила примерно на 15% ниже та-

кового при выдавливании средней части заготовки.

3. На этапе заполнения полостей зубьев и частичного заполнения верхнего угла фланца рост деформирующей силы по ходу процесса происходит практически линейно. Вклад затекания металла в полость зубьев в усилие процесса возрастает с увеличением степени обжатия материала в полости зуба, количества зубьев, высоты зубьев. Данный этап вносит наибольший вклад в энергетику процесса деформирования.

4. Максимальное значение деформирующей силы имеет место при дозаполнении верхних углов фланца и зубьев. Однако вклад этапа доштамповки в энергетику процесса незначителен. Максимальные деформации имеют место в нижней центральной области фланца.

5. Разработана методика проектирования технологического процесса горячего радиального выдавливания поковок типа шестерен с зубьями, позволяющая с отклонениями не более 20% определить его энергосиловые параметры. Указанная методика используется в практике проектирования следующих организаций:

АО "БЕЦЕМА", Узбекский металлургический комбинат.

Основное содержание диссертации опубликовано

в следующих работах:

1. Абдуллаев Ф.С., Катикова Е.В. Исследование эффективных способов штамповки труднодеформируемых материалов // Проблемные вопросы развития и повышение эффективности внедрения автоматических производственных комплексов с разной степенью технологической гибкости: Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции. - Ташкент, 1989. - С.101-102.
2. Абдуллаев Ф.С., Катикова Е.В. Исследование процесса штамповки шестерен // Проблемные вопросы создания и внедрения экологически чистых технологий на предприятиях машиностроения республики Узбекистан: Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции. - Ташкент, 1992. - С.58-59.
3. Катикова Е.В. Исследование технологических процессов точной штамповки // Межвузовская научно-теоретическая конференция молодых ученых и преподавателей: Тезисы докладов. - Ташкент, 1987. - С.43-44.
4. Абдуллаев Ф.С., Катикова Е.В., Загишулин Р.Ф. Обработка металлов давлением: Учебное пособие. - Ташкент: ТашГТУ, 1993. - 30 с.