

Сидоров Александр Александрович

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫСАДКИ ПОКОВОК
ТИПА СТЕРЖНЯ С ПОЛУСФЕРИЧЕСКИМ ФЛАНЦЕМ С
НАПРАВЛЕННЫМ ВОЛОКНИСТЫМ СТРОЕНИЕМ

Специальность 05.02.09 - Технологии и машины обработки давлением



АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2016 г.

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

Научный руководитель: Семенов Евгений Иванович, доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: Филиппов Юлиан Кириллович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)»

Палтиевич Андрей Романович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2016 года, в __.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.04 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу

105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5 стр.1

Телефон для справок 8(499) 267-09-63

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2016 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

к.т.н., доцент



Семенов В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время горячей штамповкой изготавливают поковки широкой номенклатуры для машиностроения, особенно из конструкционных сталей. Современная тенденция машиностроения – повышение требований к качеству и усложнение формы поковок, получаемых штамповкой, что в свою очередь, в условиях жесткой конкуренции современного рынка ставит перед технологическими службами предприятий задачу получения в сжатые сроки поковок сложной формы при жестких допусках на размеры, с заданными свойствами при малой себестоимости.

Задача увеличения надежности и долговечности штампованных изделий без изменения способа выплавки и обработки жидкого металла при получении исходной заготовки может быть решена путем создания таких технологических процессов штамповки и таких схем течения металла, которые обеспечат в поковках заданную макроструктуру, согласованную с условиями эксплуатации изделий, и требуемую анизотропию физико-механических свойств. Ранее проведенные В.А. Тюриным, Е.И. Семеновым, В.Ю. Лавриненко, И.С. Зиновьевым, О.А. Белокуровым, Y. Zhang и др. исследования показали, что повышение надежности и долговечности штампованных изделий ответственного назначения типа подшипников, шаровых опор автомобилей, коленчатых валов и т.д. в значительной степени связано с распределением волокнистого строения (макроструктуры) материала. Создание в поковках направленного волокнистого строения позволяет повысить до двух и более раз стойкость на истирание и долговечность в местах контакта трущихся деталей.

Поковки типа стержня с полусферическим фланцем получили широкое применение в машиностроении, особенно в автомобилестроении, в частности при производстве деталей кулисно-рычажных механизмов различных соединений с шаровой головкой. Эти детали выходят из строя в основном вследствие значительного изнашивания рабочих контактных поверхностей. Подобные детали получают путем высадки прутковой заготовки на горизонтально-ковочной машине (ГКМ) и другими способами.

Возможность проведения эффективной штамповки поковок типа стержня с полусферическим фланцем и получение направленного волокнистого строения, способствующего повышению надежности и долговечности изготавливаемых из этих поковок деталей, зависит от различных факторов: исходное состояние и механические свойства деформируемого металла, способ перераспределения металла при штамповке, конфигурация инструмента, состояние рабочей поверхности инструмента (шероховатость, наличие смазочного материала и его вид).

В настоящее время технологический процесс получения на ГКМ поковок типа стержня с полусферическим фланцем с направленным волокнистым строением недостаточно изучен. Отсутствуют сформулированные требования к волокнистому строению поковок типа стержня с полусферическим фланцем, критерии оценки волокнистого строения этих поковок, отсутствуют практические рекомендации по проведению штамповки с направленным волокнистым строением.

В этой связи исследования формирования направленного волокнистого строения в поковках типа стержня с полусферическим фланцем имеет большое практическое значение, а разработка новых методик проектирования процессов горячей штамповки на ГКМ поковок типа стержня с полусферическим фланцем с направленным волокнистым строением является актуальной научно-технической задачей.

Объектом исследования в данной работе является технология получения поковок типа стержня с фланцем на ГКМ с направленным волокнистым строением.

Предметом исследования являются параметры технологического процесса высадки на ГKM поковок типа стержня с полусферическим фланцем.

Целью настоящей работы является повышение качества поковок типа стержня с полусферическим фланцем за счет обеспечения в них направленного волокнистого строения.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие **задачи**:

- Проведен анализ существующих способов получения направленного волокнистого строения в поковках, предложена схема штамповки поковок типа стержня с полусферическим фланцем, позволяющая управлять ориентацией волокон, и определены основные конструктивно-технологические факторы, влияющие на ориентацию волокон в поковке;
- Предложены показатели, характеризующие волокнистое строение поковок типа стержня с полусферическим фланцем, получены их математические модели и оценена их адекватности;
- Проведен анализ современных методов расчета сил деформирования при штамповке поковок типа стержня с полусферическим фланцем;
- На основе проведенных исследований разработана методика проектирования процесса высадки поковок типа стержня с полусферическим фланцем с направленным волокнистым строением.

Получены следующие результаты, характеризующиеся **научной новизной**:

- Математические модели показателей ориентации волокон в поковках типа стержня с полусферическим фланцем (β_1 , β_2 и β_{cp}) после снятия припуска на механическую обработку в зависимости от конструктивно-технологических параметров процесса: относительная длина высадки ψ , относительная толщина стенки полусферы γ , угол наклона деформирующей поверхности пуансона на предварительном штамповочном переходе α ;
- Научно обоснованная методика проектирования технологических процессов штамповки поковок типа стержня с полусферическим фланцем, позволяющая изготавливать поковки с заданным распределением волокон, учитывающая влияние величины припуска на механическую обработку на распределение волокон вдоль рабочих контактных поверхностей деталей, изготавливаемых из этих поковок.

Практическую значимость имеют следующие результаты:

Предложена новая технология штамповки поковок типа стержня с полусферическим фланцем, включающая дополнительный наборный переход, который в значительной степени определяет направленное волокнистое строение поковки, и разработан технологический процесс получения направленного волокнистого строения в поковке «Опора шаровая» для автомобиля «Урал» (6361X-2304015) из стали 30ХГСА.

Апробация работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на следующих конференциях и семинарах: семинары кафедры «Технологии обработки давлением» МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2008, 2009, 2015.; IX Конгрессе «Кузнец-2009». Рязань, 2009.; VI Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». М., 2015.

Методы исследований и достоверность результатов:

Экспериментальные исследования проводили на заготовках из алюминиевого сплава АД-0 и стали 45 в горячем состоянии на универсальной испытательной машине Instron 600 DX и на кривошипно-коленном прессе К0034 номинальной силой 2,5 МН, используя разработанную оснастку, моделирующую штамповку на

горизонтально-ковочных машинах (ГКМ). Эксперименты выполняли в лаборатории кафедры «Технологии обработки давлением» (МТ6) МГТУ им. Н.Э.Баумана. Численное моделирование процессов высадки на ГКМ проведено методом конечных элементов с использованием соответствующих математических моделей в программном комплексе Deform и пользовательского программирования в системе Absoft Fortran. Моделирование техпроцессов высадки на ГКМ поковок выполнено с использованием методов факторного планирования для построения математических моделей для расчета показателей ориентации волокон в поковке. Экспериментальные исследования макроструктуры в алюминиевых и стальных поковках выполнены на металлографических установках NEOPHOT 30 и Axiovert 200 M MAT. Для расчета энергосиловых параметров процесса высадки поковки типа стержня с полусферическим фланцем использованы метод верхней оценки и аналитические методы расчета на основе метода пластического течения в сферической системе координат. Таким образом, достоверность научных положений, выводов и рекомендаций базируется на использовании общепринятых в обработке металлов давлением математических методов моделирования с применением апробированных вычислительных программных комплексов и применении современного оборудования при проведении экспериментальных исследований.

Автор защищает: методику и результаты компьютерного моделирования процесса высадки на ГКМ поковок типа стержня с полусферическим фланцем с направленным волокнистым строением; математические модели для расчета углов ориентации волокон в поковках типа стержня с полусферическим фланцем ($\beta_1, \beta_2, \beta_{cp}$) при горячей высадке на ГКМ в зависимости от параметров технологического процесса ψ, γ и α при различных значениях относительной глубины измерения углов выхода волокон δ ; результаты экспериментальных исследований процесса высадки, полученные на алюминиевых и стальных образцах в горячем состоянии, служащие для подтверждения результатов компьютерного моделирования; таблицу волокнистых строений при высадке поковок типа стержня с полусферическим фланцем в зависимости от основных конструктивно-технологических факторов ψ, γ, α , влияющих на ориентацию волокон; новую методику проектирования технологического процесса высадки на ГКМ поковок типа стержня с полусферическим фланцем, включающую в себя анализ ориентации волокон в поковке.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы изложено в 4-х опубликованных научных работах, из них в журналах по перечню ВАК РФ – 4 общим объемом 1.17 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы и приложения. Текст диссертации содержит 135 машинописных страницы, включая 33 таблицы, 70 рисунков и список литературы из 105 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и направление исследований.

В первой главе выполнен анализ существующих способов изготовления обработкой металлов давлением поковок и заготовок с направленным волокнистым строением и обоснована целесообразность получения направленного строения волокон макроструктуры. Рассмотрено влияние волокнистого строения поковок на качество получаемых деталей и факторы, управляющие формированием волокнистого строения в поковках. Проведен анализ существующих методик проектирования поковок с

направленным волокнистым строением и известных исследований процессов штамповки на основе методов моделирования, в том числе высадки на ГКМ.

В процессах обработки металлов давлением в качестве объекта деформирования (заготовки) используют либо слиток, либо заготовку с первичной макроструктурой, приобретенной после операцийковки, прокатки, волочения и других. Вопросы исследования влияния волокнистого строения на свойства заготовок послековки подробно исследовался в работах В.А. Тюрина. Полученная начальная ориентация макроструктуры волокон в исходной заготовке обладает анизотропией (первичной) свойств и сохраняется при последующей термической обработке. Управлять направлением волокон в конечном изделии возможно только последующей деформацией, например, в процессахковки или штамповки путем создания необходимого направленного пластического макротечения металла заготовки. В процессах штамповки волокна первичной макроструктуры (заготовки) могут быть преобразованы в волокна поковок со вторичной макроструктурой, с направленной (параллельной) ориентацией к рабочим поверхностям готового изделия. Лавриненко В.Ю. были проведены исследования, показавшие, что правильная ориентация волокон в детали, работающей на истирание, увеличивает ее стойкость к истиранию на 20-30%. Зиновьевым И.С. были сформулированы общие требования к волокнистому строению в поковках: а. симметричность расположения волокон макроструктуры; б. плавность волокон макроструктуры; в. повторение волокнами макроструктуры рабочего контура детали (выход волокна на рабочую поверхность детали должен быть меньшим 45° , а в идеале близким к 0°).

При штамповке коленчатых валов Майстровым Ю.В. исследовалась возможность управления течением металла на гибочном переходе с целью получения направленной ориентации волокон макроструктуры. Установлено, что в условиях крупносерийного производства целесообразней применение технологии штамповки поковок коленчатых валов с применением гибки в штампе с силовым замыканием шатунных шеек. При этом угол выхода волокон на контактную поверхность шатунных шеек не превышает 10° , что повышает контактную выносливость детали.

Гудовым А.А. установлено, что при высадке на ГКМ поковок типа стержня с фланцем для формирования направленной ориентации волокон макроструктуры управление макротечением можно осуществлять за счет количества наборных переходов, а также путем изменения размеров и форм гравюры штампов.

Согласно технологии, предложенной в работе Семендя В.Л., Акаро И.Л. и Волосова Н.Н. шаровую опору поворотного кулака большегрузных автомобилей штампуют на ГКМ. Оформление полусферического фланца получают за 4 перехода. При моделировании штамповки шаровой опоры на свинцовых заготовках с сеткой установлено, что сочетание глубокой прошивки с раздачей и обратным выдавливанием дает хорошие результаты по оформлению формы поковок. Однако, линии сетки, имитирующие исходное волокно, не огибают поверхности контакта, а выходят под углом не менее 70° на внутреннюю контактную поверхность полусферического фланца. Следует отметить, что задача исследования углов наклона волокон при разработке технологических процессов штамповки не ставилась, а также в технических условиях на поковки отсутствуют требования по ориентации волокон.

В процессе изготовления поковок с полусферическим фланцем используют следующие технологические операции: осадка, наметка, закрытая прошивка, раздача, выдавливание. Указанные операции в совокупности определяют ориентацию волокон в готовых поковках. Известные исследования показывают, что технология штамповки

определяется такими факторами как: объем и масса заготовки, отношение длины высаживаемой части заготовки к ее диаметру l/d , толщиной стенки полусферы. Оказывает влияние также и способ штамповки (штамповка в пуансоне, в матрицах или в пуансоне и матрицах). Важной и актуальной задачей является разработка прямых показателей ориентации волокон и методик их определения. Также необходимо отметить недостаточную изученность технологических факторов, влияющих на макротечение при посадке на ГKM поковок типа стержня с полусферическим фланцем.

При проектировании технологического процесса обработки металлов давлением технолог на основе исходных данных и характеристик изделия должен осуществить ряд этапов проектных работ, таких как: выбор основных операций, сравнение характеристик поковки и детали, определение геометрии очага деформации, конструирование формы заготовок и инструмента, проверку основных характеристик поковки, экономическую оценку технологии. Однако, разработку технологических процессов штамповки поковок типа стержня с полусферическим фланцем проводят, в большинстве случаев, без учета волокнистого строения изготавливаемой детали.

Во второй главе рассмотрен вопрос выбора схемы штамповки и основных технологических параметров, влияющих на волокнистую структуру поковок типа стержня с полусферическим фланцем на основе компьютерного моделирования.

В настоящее время при проектировании технологических процессов ОМД применяют CAD-CAE системы, позволяющие создавать модели объектов исследования и проводить необходимые вычислительные эксперименты. В работе для проведения вычислительного эксперимента с целью получения зависимостей, позволяющих прогнозировать ориентацию волокон в исследуемых изделиях, выбрана система DEFORM-2D.

Созданы компьютерные модели процессов одно- и многопереходной посадки, применяемые в практике штамповки на ГKM поковок типа стержня с полусферическим фланцем, включающие модели заготовок и штамповых инструментов по переходам. Для проведения расчетов задавали: табличные значения реологических моделей используемых алюминиевых и стальных образцов; коэффициент контактного трения по Зибелю (равный 0.3), скорость пуансона (100 мм/сек), температуры заготовок (для алюминиевых сплавов 20⁰С, для стали 1100⁰С, процесс принят изотермическим).

Для оценки ориентации волокон в поковках (Рисунок 1а) предложены три показателя ориентации: углы β_1 и β_2 между касательными, проведенными к образующей пуансона и волокну в точке выхода волокна к поверхности пуансона (Рисунок 1б), и усредненный показатель β_{cp} .

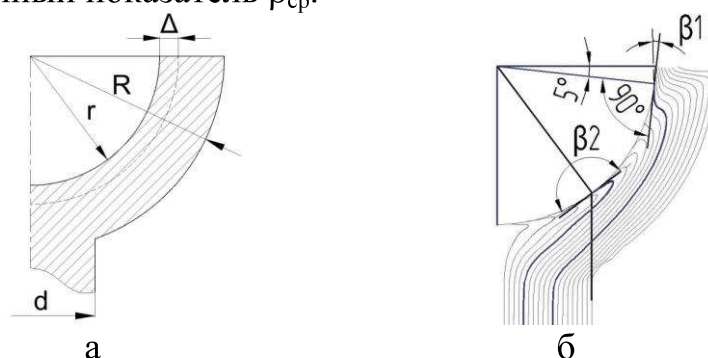


Рисунок 1. Поковка типа стержня с полусферическим фланцем а – принятые обозначения размеров б - схема измерения углов ориентации волокон β_1 и β_2

Угол ориентации волокон $\beta_{\text{ср}}$ вычисляют по формуле:

$$\beta_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n \beta_i, \quad (1)$$

где n – количество волокон в зоне измерений.

Измерение углов проводится на различных относительных глубинах $\delta = \Delta / (R - r)$, где Δ – припуск на механическую обработку, R и r – радиусы внешней и внутренней полусферы соответственно.

Разработана методика определения показателей ориентации волокон, включающая схему измерения углов ориентации и оцифровку данных с помощью оригинальной программы (на языке программирования Fortran 77). Алгоритм определения углов ориентации реализован с применением программы AutoCAD. Укрупненная блок-схема определения углов ориентации волокон представлена на Рисунке 2.



Рисунок 2. Укрупненная блок-схема определения углов ориентации волокон

Для определения технологических факторов, влияющих на ориентацию волокон в поковке типа стержня с полусферическим фланцем, провели компьютерное моделирование процесса высадки на ГKM. Рассмотрены три схемы: высадка полусферы из плоского фланца (Рисунок 3,а), обратное выдавливание полусферы из прутка (Рисунок 3,б) и выдавливание полусферы после предварительного формовочного перехода (Рисунок 3,в).

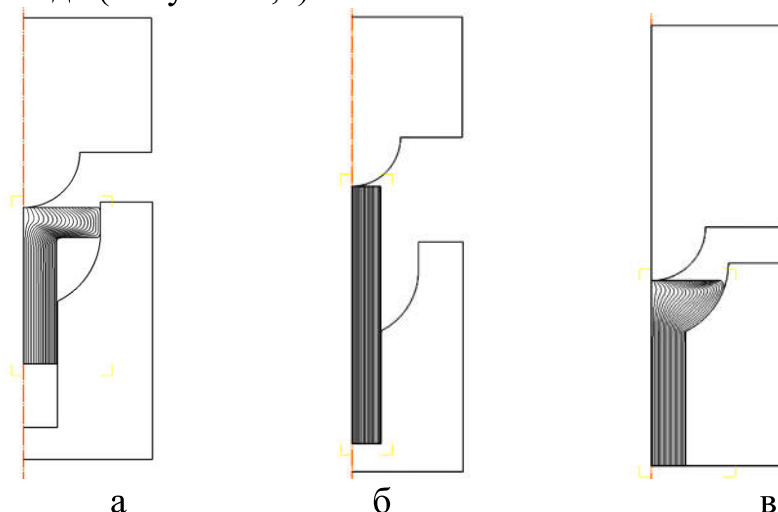


Рисунок 3. Схемы штамповки поковок типа стержня с полусферическим фланцем

Результаты анализа волокнистого строения в поковках типа стержня с полусферическим фланцем полученные при различных схемах штамповки показали, что наилучшее направленное волокнистое строение получали в случае выдавливания полусферы после предварительного формовочного перехода. Ручей формовочного перехода имеет пуансон, деформирующая поверхность которого может иметь угол наклона (Рисунок 4,а и б), что в значительной мере влияет на ориентацию волокон к поверхности пуансона в чистовом ручье (Рисунок 4,в и г).

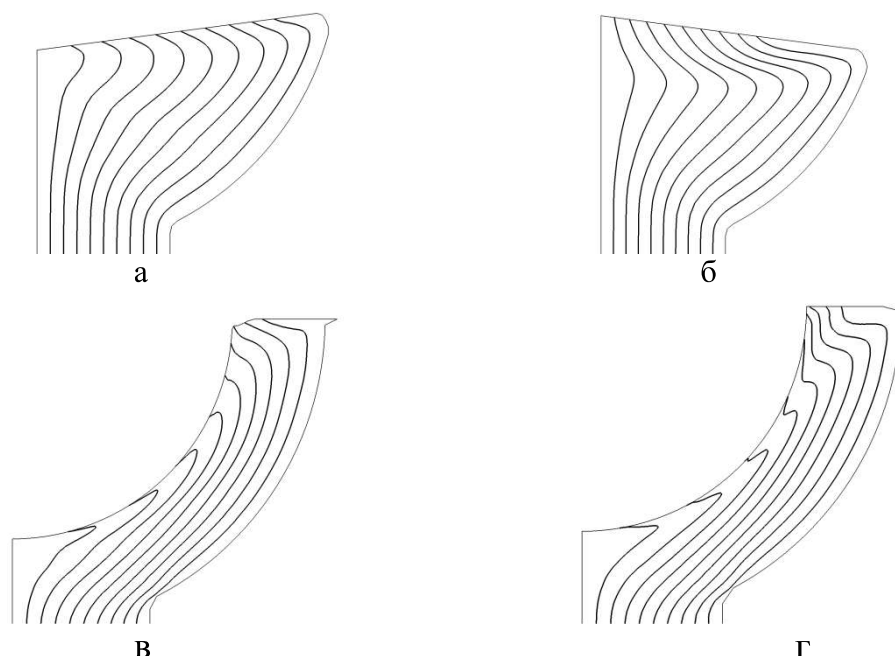


Рисунок 4. Линии Лагранжа линии в поковке: а - после предварительного перехода, б – в готовой поковке

Был проведен анализ поля скоростей частиц металла в окончательном ручье при высадке исследуемых поковок, который показал возможность управления макротечением металла заготовки с целью получения направленного волокнистого строения. Результаты исследований полей скоростей и линий Лагранжа для рассмотренных схем штамповки на ГKM показали, что при штамповке стержня с полусферическим фланцем волокно плавно огибает внешний контур полусферы, в то время как на внутреннюю сферическую поверхность поковки, как правило работающую на истирание, волокно выходит под некоторым углом. Связано это с тем, что скорости частиц металла поковки в приконтактной зоне у пуансона значительно выше скоростей частиц в приконтактной зоне у матрицы.

На основе вычислительного эксперимента в среде DEFORM-2D показана высокая корреляционная зависимость между углами ориентации волокон поковок типа стержня с полусферическим фланцем из стали и алюминия (коэффициент корреляции составил 0.82), что позволяет использовать алюминиевые заготовки как для физического, так и для компьютерного моделирования процессов горячей высадки стальных поковок на ГKM.

Отбор факторов, влияющих на направленное волокнистое строение поковки, проводили на основе компьютерного моделирования процесса высадки поковок типа стержня с полусферическим фланцем из алюминиевого сплава АД0. Определили три фактора и интервалы их варьирования по влиянию на показатели ориентации волокон:

- ψ отношение длины высаживаемой заготовки l к диаметру заготовки d ($\psi=l/d=2.5\dots5.4$);

- γ отношение разности радиуса матрицы R_m и радиуса пуансона r_n к диаметру заготовки d ($\gamma = (R_m - r_n)/d = 0.337...0.475$);

- α угол наклона рабочей поверхности пуансона предлагаемого наборного ручья ($\alpha = -7.5 ... + 7.5^\circ$).

В третьей главе представлены результаты исследования влияния технологических факторов процесса высадки на ориентацию волокон в поковках типа стержня с полусферическим фланцем на основе вычислительного и физического экспериментов, а так же произведен расчет сил деформирования.

Разработана методика полного факторного эксперимента 2^3 для компьютерного моделирования процессов горячей высадки на ГKM стальных поковок типа стержня с полусферическим фланцем.

Для различных значений относительной глубины δ получены уравнения регрессии (Уравнение 2-4) для расчета углов ориентации волокон в поковке (β_1 , β_2 , β_{cp}) для горячей высадки исследуемых поковок из стали 45. Рассчитаны значения коэффициентов b_i , b_{ij} и b_{ijk} для значений $\delta=0-0.2$. Уравнения включают следующие факторы: ψ ; α ; γ и их взаимодействия. Доказана адекватность полученных математических моделей.

$$\beta_1 = b_0 + b_1\Psi + b_2\alpha + b_3\gamma + b_{12}\Psi\alpha + b_{13}\Psi\gamma + b_{23}\alpha\gamma + b_{123}\Psi\alpha\gamma \quad (2)$$

$$\beta_2 = b_0 + b_1\Psi + b_2\alpha + b_3\gamma + b_{12}\Psi\alpha + b_{13}\Psi\gamma + b_{23}\alpha\gamma + b_{123}\Psi\alpha\gamma \quad (4)$$

$$\beta_{cp} = b_0 + b_1\Psi + b_2\alpha + b_3\gamma + b_{12}\Psi\alpha + b_{13}\Psi\gamma + b_{23}\alpha\gamma + b_{123}\Psi\alpha\gamma \quad (5)$$

Полученные уравнения могут быть использованы для прогнозирования ориентации волокон при проектировании технологического процесса высадки на ГKM стальных поковок типа стержня с полусферическим фланцем.

Проведен анализ различных методов оценки энергосиловых параметров при высадке исследуемых поковок.

Анализ энергосиловых параметров при высадке на ГKM поковок типа стержня с полусферическим фланцем выполняли с помощью метода верхней оценки, метода конечных элементов и методами пластического течения с использованием зависимостей полученных в разное время Воронцовым А.Л., Дмитриевым А.М., Семеновым Е.И. и Овчинниковым А.Г.

На Рисунке 5 представлена половина очага деформации из жестких блоков при расчете силы деформирования высадки поковки типа стержня с полусферическим фланцем методом верхней оценки для окончательной стадии заполнения штампового пространства и пример годографа скоростей.

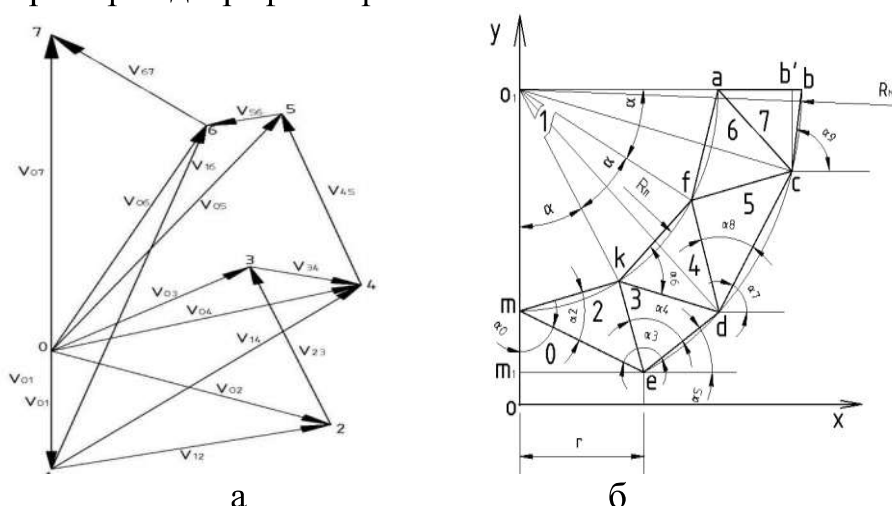


Рисунок 5. Схема дискретизации очага деформации (а) и годографа скоростей (б) при высадке

Т.к. мощности внутренних сил и сил контактного трения обусловлены полем скоростей в очаге деформации, переходя к безразмерному параметру $\frac{q}{\sigma_s}$ получили уравнение для определения силы деформирования:

$$\frac{q}{\sigma_s} = \frac{1}{2f_u v_{01}} \left(\sum_{i,j} v_{i,j} f_{i,j} + \sum_{i,k} 2\mu_{i,k} v_{i,k} f_{i,k} \right), \quad (6)$$

где $q = P/f_u$ – удельная сила деформирования; P – сила деформирования; V_{01} – скорость пуансона; f_u – площадь проекции контактной поверхности заготовки и инструмента; σ_s – предел текучести металла заготовки при высадке; $\mu_{i,k}$ – коэффициент пластического трения по напряжению текучести; $V_{i,j}$ – скорость относительного перемещения блоков на поверхностях разрыва скорости $f_{i,j}$ внутри заготовки; $V_{i,k}$ – скорость относительного перемещения блоков на поверхностях $f_{i,k}$ контакта инструмента и заготовки.

Сумму в скобках в Уравнении 6 после преобразований с учетом длин границ блоков l_{ij} и l_{ik} обозначили через A_v :

$$A_v = \sum_{i,j} v_{i,j} l_{i,j} + \sum_{i,k} 2\mu_{i,k} v_{i,k} l_{i,k} \quad (7)$$

Для исследуемых представителей стальных поковок типа стержень с полусферическим фланцем при скорости пуансона $V=100$ мм/с, $\sigma=140$ МПа, коэффициент трения по напряжению текучести $\mu=0,35$ (напряжение контактного трения $\tau_{к.тр.} \approx 24$ МПа) получены значения параметра A_v , представленные в Таблице 1. Исследуемые типы поковок характеризуются факторами ψ и γ .

Таблица 1.

Размеры исследуемых поковок и расчетное значение параметра A_v					
№	r_n , мм	R_m , мм	Ψ	γ	A_v , мм ² /с
1	11,46	20,95	2,5	0,475	163,02
2	16,00	22,75	2,5	0,337	241,974
3	19,00	28,50	5,4	0,475	263,824
4	25,00	31,73	5,4	0,337	356,046

Аналогичные расчеты проводили для высадки алюминиевых заготовок при $V=2$ мм/с и $\sigma=120$ МПа, что соответствовало условиям проведенного физического моделирования горячей высадки поковок типа стержня с полусферическим фланцем холодной высадкой на испытательной машине Instron 600 DX.

Параллельно определение необходимой силы деформирования при высадке поковок типа стержня с полусферическим фланцем, в соответствии с размерами из Таблицы 1, проводили с помощью метода конечных элементов в программном комплексе Deform и с помощью аналитического расчета в сферической системе координат, по представленным в работе Семенова Е.И., Овчинникова А.Г., Дмитриева А.М. (далее способ №1) и в работе Воронцова А.Л. (далее способ №2) методикам. Расчетные схемы для аналитического расчета приведены на Рисунке 6.

Авторами обоих аналитических методов расчета были получены уравнения для расчета нормальных напряжений σ_r , σ_θ и σ_ϕ и касательных напряжений $\tau_{r\phi}$.

Силу деформирования, действующую на сферическую поверхность пуансона для расчета по способу №1, определяли как:

$$P = \pi r_{\text{п}}^2 \sigma_s q = \pi r_{\text{п}}^2 \sigma_s 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} (-\sigma_p \sin \varphi \cos \varphi + \tau_{p\varphi} \sin^2 \varphi) d\varphi, \quad (8)$$

где $r_{\text{п}}$ – радиус пуансона.

Интегрирование Уравнения 8 проводили встроенными средствами программного обеспечения SMathStudio.

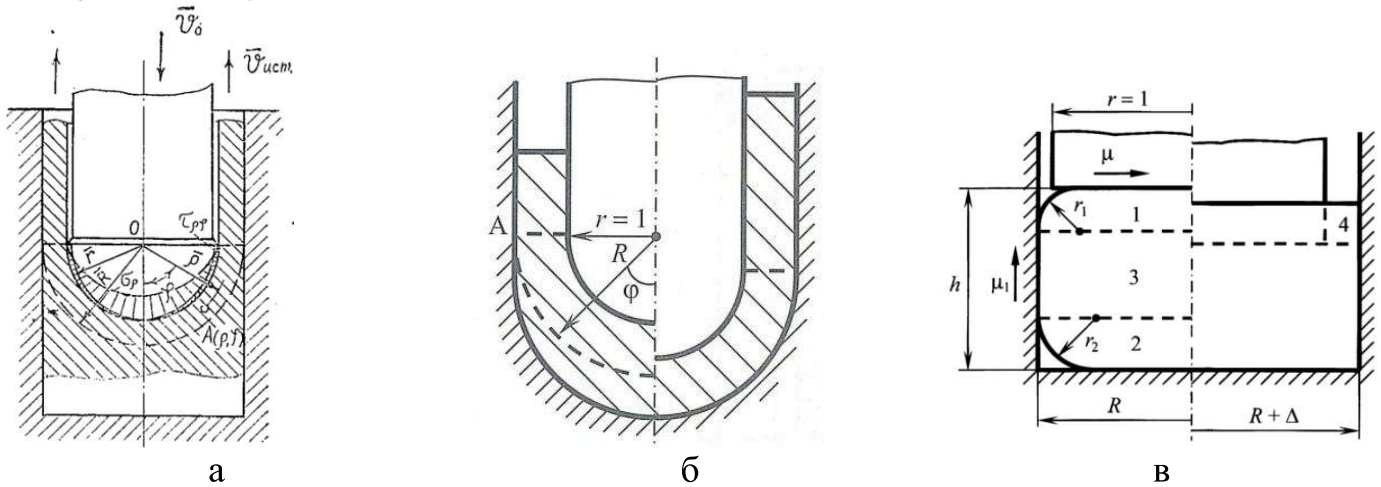


Рисунок 6. Схема для расчета силы при а – внедрении сферического пуансона в заготовку (способ №1), б – внедрении сферического пуансона в заготовку (способ №2), в – стадии окончательного заполнения полости штампа (способ №2)

Силу деформирования, действующую на сферическую и кольцевую поверхности пуансона, согласно методике по способу №2, определяли как:

$$P = \pi r_{\text{п}}^2 \sigma_s q_1 \delta_1 + \pi R_{\text{м}}^2 q_2 \delta_2, \quad (9)$$

где q_1 – удельная сила, действующая на сферическую поверхность пуансона при свободном течении металла (Уравнение 10); q_2 удельная сила, действующая пуансон на стадии окончательного заполнения полости штампа (Уравнение 11); $\delta_1 = 0$ и $\delta_2 = 1$ если рассчитывали силу деформирования с учетом стадии окончательного заполнения полости штампа; $\delta_1 = 1$, и $\delta_2 = 0$ если рассчитывали силу деформирования без учета стадии окончательного заполнения полости штампа.

$$q_1 = 1 + 2 \ln \frac{R+1}{2} + 0,77 \frac{\mu(R^2+R)}{(R-1)}, \quad (10)$$

$$q_2 = 1 + \frac{(\mu+0,5)R}{4 \left(\frac{R_{\text{м}} - r_{\text{п}}}{4r_{\text{п}}} \right)}, \quad (11)$$

где $R_{\text{м}}$ и $r_{\text{п}}$ – радиусы матрицы и пуансона соответственно, R – относительный внешний радиус полусферы $R = R_{\text{м}}/r_{\text{п}}$.

Аналитические расчеты проводили при скоростях, напряжениях течения и параметрах трения аналогичных тем, что использовались при расчетах методом верхней оценки.

Необходимо отметить, что расчеты по методу верхней оценки и по способу №1 аналитической методики не позволяют учесть стадию окончательного заполнения полости штампа, на которой сила деформирования, в случае высадки в закрытом штампе, резко возрастает. Для того, что бы производить оценку силы деформирования на стадии окончательного заполнения полости закрытого штампа, в Уравнения 6 и 8 необходимо вводить дополнительный поправочный коэффициент $k=2-4$. Этот коэффициент может, также учитывать возрастание силы за счет сжатия поверхностей верхнего и нижнего штампов.

Сравнение результатов расчета силы высадки заготовок из алюминия марки АД0, полученных в программном комплексе Deform, по методу верхней оценки, с помощью аналитических расчетов и в ходе физического моделирования представлены в Таблице 2.

Таблица 2.

Сравнение результатов расчета сил деформирования по четырем рассмотренным методам для алюминия АД0

№	Сила деформирования, рассчитанная методом верхней оценки. Р, Н	Сила деформирования, рассчитанная методом конечных элементов. Р, Н		Сила деформирования, рассчитанная аналитически (способ 1). Р, Н	Сила деформирования, рассчитанная аналитически (способ 2). Р, Н
		$\sigma_s=f(\dot{\epsilon}, \epsilon)$	$\sigma_s=120$ МПа		
	Без учета стадии окончательного заполнения полости штампа				
1	1.37×10^5	1.24×10^5	1.42×10^5	0.68×10^5	1.31×10^5
2	2.19×10^5	2.41×10^5 $(2.38 \times 10^5)*$	2.62×10^5	1.93×10^5	2.54×10^5
3	2.97×10^5	3.21×10^5	3.66×10^5	2.5×10^5	3.54×10^5
4	4.56×10^5	6.42×10^5 $(5.8 \times 10^5)*$	7.28×10^5	5.7×10^5	6.8×10^5
	С учетом стадии окончательного заполнения полости штампа				
1	-	4.72×10^5	4.74×10^5	-	4.2×10^5
2	-	6.64×10^5 $(5.8 \times 10^5)*$	6.75×10^5	-	6.5×10^5
3	-	10.32×10^5	10.56×10^5	-	9.49×10^5
4	-	17.01×10^5	17.87×10^5	-	16.32×10^5
* в скобках приведены результаты замера силы деформирования, полученные при экспериментальных исследованиях высадки алюминиевых заготовок на испытательной машине Instron 600 DX					

Из Таблицы 2 видно, что все четыре метода дают относительно близкие по значениям расчетные значения силы деформирования. Наименее точным, но наиболее простым способом оценки силы деформирования при высадке поковок типа стержня с полусферическим фланцем является метод верхней оценки, с учетом полученных зависимостей параметра A_v . Наименьшая, по сравнению с остальными тремя методиками, точность метода верхней оценки связана с тем, что при расчете принимали допущение о плоскостности деформированного состояния. Необходимо так же отметить, что аналитический расчет по способу №1 разрабатывался авторами для поковок со значительно меньшей относительной толщиной стенки полусферы, по сравнению с поковками, рассматриваемыми в настоящей работе. Поэтому наиболее точными и физически обоснованными методами расчета силы деформирования

поковок типа стержня с полусферическим фланцем, рассматриваемыми в настоящей работе, являются аналитический расчет по способу №2 и расчет методом конечных элементов.

Аналогичные расчеты, но без сравнения с экспериментальными данными, были сделаны для высадки заготовок из стали 45.

Задачами экспериментальных исследований являлось изучение влияния разработанного способа высадки поковок типа стержня с полусферическим фланцем на волокнистое строение в поковках и проверка сходимости результатов физического и численного моделирования. В экспериментах использовали заготовки из сплава алюминия марки АД-0 и стали 45. Температуры высадки составляли соответственно 20⁰С для АД0 и 1100⁰С для стали 45.

Алюминиевые заготовки деформировали в штампах на испытательной машине Instron 600 DX в лаборатории кафедры МТ6 МГТУ им. Н.Э.Баумана. Скорость деформирования составляла 2 мм/с. Размеры заготовок, поковок, параметры Ψ , γ и α при физическом моделировании представлены в Таблице 3.

Таблица 3.

№	Размеры заготовок, поковок и инструмента						
	R _м , мм	R _п , мм	l, мм	Ψ	γ	d, мм	α , градус
1	22,75	16	50	2,5	0,337	20	0
2	31,73	25	108	5,4	0,337	20	0

Разработана и изготовлена из стали 45Х штамповая оснастка для высадки заготовок. Конструкция оснастки, за счет применения вставок, позволяет получать поковки различных размеров.

В результате проведенных экспериментов, были получены поковки типа стержня с полусферическим фланцем (Рисунок 7).



а



б



в

Рисунок 7. Полученные в результате физического моделирования высадки поковки из сплава АД-0 (а – $\Psi = 2,5$ б – $\Psi = 5,4$) и стали 45 (в – $\Psi = 2,5$)

Для оценки ориентации волокон применяли глубокое травление и фотосъемку поверхности макрошлифа на установке НЕОРНОТ 30. Результаты анализа ориентации волокон в алюминиевых образцах (Рисунок 7,а и б) по разработанной методике показали следующее: в контролируемых сечениях волокна практически огибают внутреннюю контактную поверхность полусферического фланца, соответственно углы β_1 и β_2 равны 177-180⁰.

Опытную штамповку поковок из стали 45 (Рисунок 7,в) в горячем состоянии выполняли на кривошипно-коленном прессе К0034 номинальной силой 2,5 МН.

Нагрев заготовок до температуры 1100 °С производили в печи ПЛ20/12,5. Размеры исходной заготовки, поковок и инструмента соответствуют размерам образца №1 из Таблицы 3. Для выявления макроструктуры стальных образцов проводили глубокое травление (Рисунок 8). В состав реактива для травления входила хлорная кислота HClO_4 , перед травлением проводилось электрополирование поверхности при температуре 0° С и напряжении 25 В.

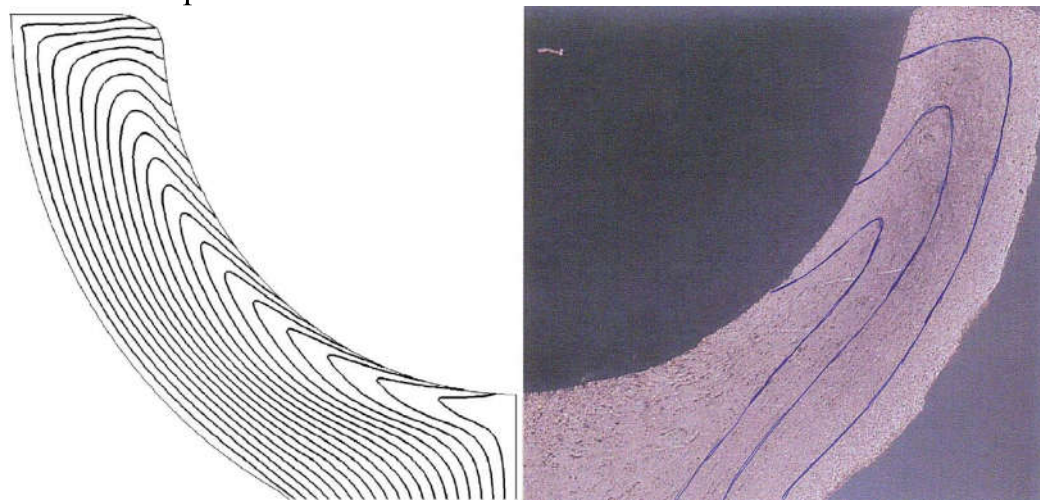


Рисунок 8. Волокнистое строение поковки из стали 45 по внутренней поверхности полусферического фланца

Замер углов ориентации волокон проводили согласно разработанной методике. Результаты измерений и результаты расчета по Уравнениям 2 – 4 приведены в Таблице 4. Отличие между расчетными и замеренными значениями углов не превышает 10%.

Таблица 4.

Результаты измерений и расчета углов ориентации волокон для стальных поковок

Угол ориентации волокна при $\delta=0$	β_1	β_2	$\beta_{\text{ср}}$
по результатам измерений, градус	117	165	145
по результатам расчета, градус	106,53	170,66	140,90

В четвертой главе разработана методика проектирования технологического процесса высадки поковок типа стержня с полусферическим фланцем с направленным волокнистым строением и показан пример ее применения для совершенствования технологии штамповки поковки «опора шаровая» для автомобиля «Урал».

Методика проектирования технологического процесса высадки на ГKM поковок типа стержня с полусферическим фланцем для обеспечения направленного волокнистого строения поковки представлена в виде укрупненной блок-схемы, показанной на Рисунке 9.

Для обеспечения направленного волокнистого строения в поковке при проектировании технологического процесса методика предусматривает либо применение компьютерного моделирования с помощью САЕ систем (Deform, Qform и др.) и построения линий Лагранжа, иллюстрирующих ориентацию волокон, либо использование уравнений математических моделей для расчета показателей ориентации волокон – углов β_1 , β_2 и $\beta_{\text{ср}}$, в том числе полученными в представленной работе для исследуемой номенклатуры поковок из стали 45.

Сформированный при компьютерном моделировании массив значений показателей ориентации волокон для различных схем течения металла в штампах или рассчитанные по разработанным уравнениям углы β_1 , β_2 и $\beta_{\text{ср}}$ можно использовать для

оценки на соответствие требованиям направленности волокон в поковке. Если требования по ориентации волокон не выполняются, то необходимо произвести коррекцию угла наклона пуансона на предварительном штамповочном переходе (угла α) либо коррекцию чертежа поковки (увеличение припуска на механическую обработку Δ), что повлечет за собой изменение факторов Ψ и γ , а так же изменение относительной глубины δ . Если же ориентация волокон удовлетворяет предъявляемым требованиям, то необходимо произвести расчет энергосиловых параметров процесса высадки поковок.

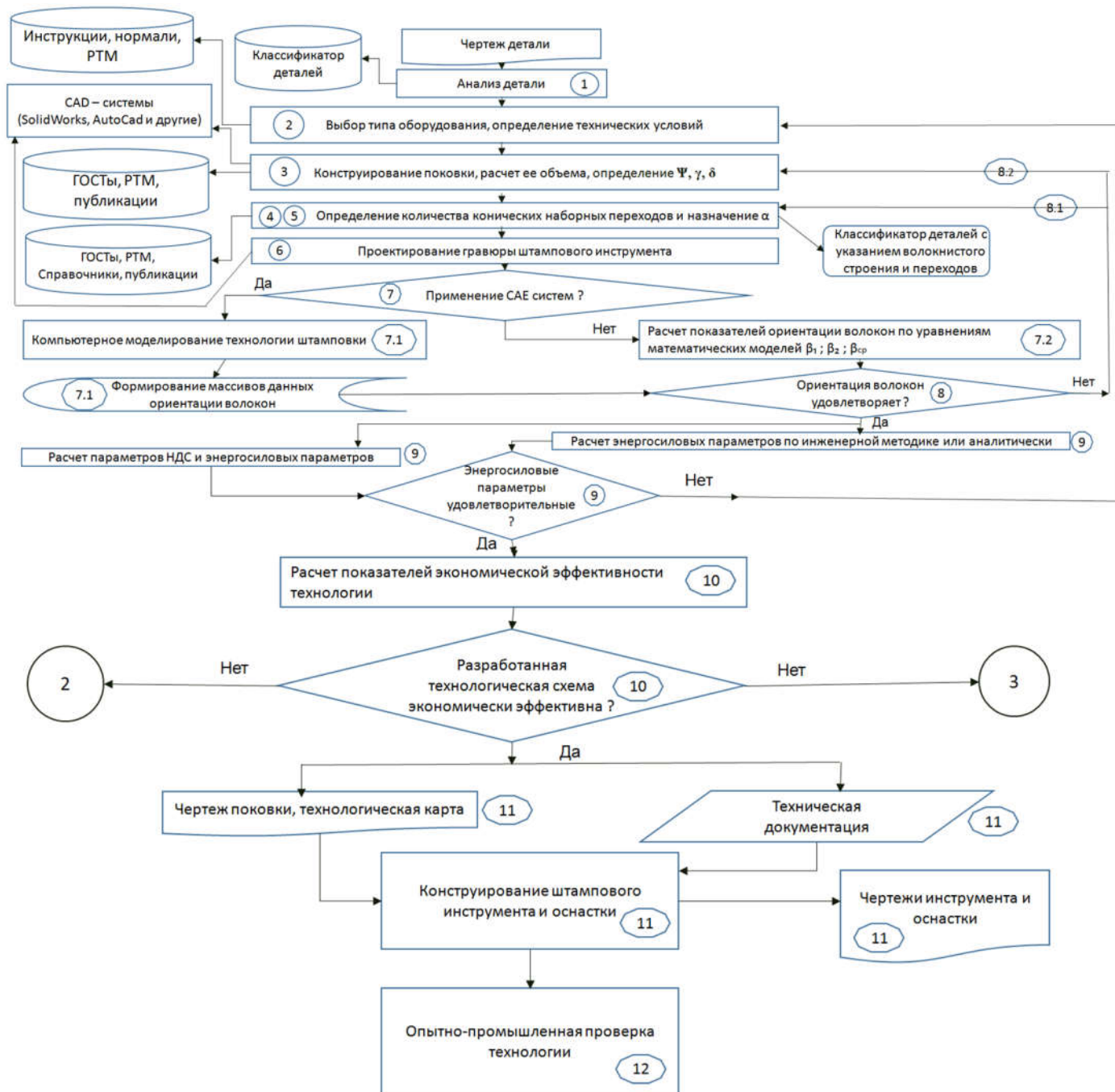


Рисунок 9. Укрупненная блок-схема методики проектирования технологического процесса высадки поковок типа стержня с полусферическим фланцем с направленным волокнистым строением

При компьютерном моделировании технологического процесса штамповки для расчета энергосиловых параметров и параметров напряженного и деформированного состояний проектировщик может использовать стандартные процедуры САЕ систем. Кроме того, предлагаемая методика проектирования позволяет воспользоваться для

определения силы штамповки рассмотренными аналитическими зависимостями. Рассчитанные значения силы штамповки дают возможность оценить правильность выбора типа оборудования или схемы техпроцесса.

Разработанная методика проектирования была применена для совершенствования технологии штамповки поковки «опора шаровая» для автомобиля «Урал» (6361Х-2304015) из стали 30ХГСА.

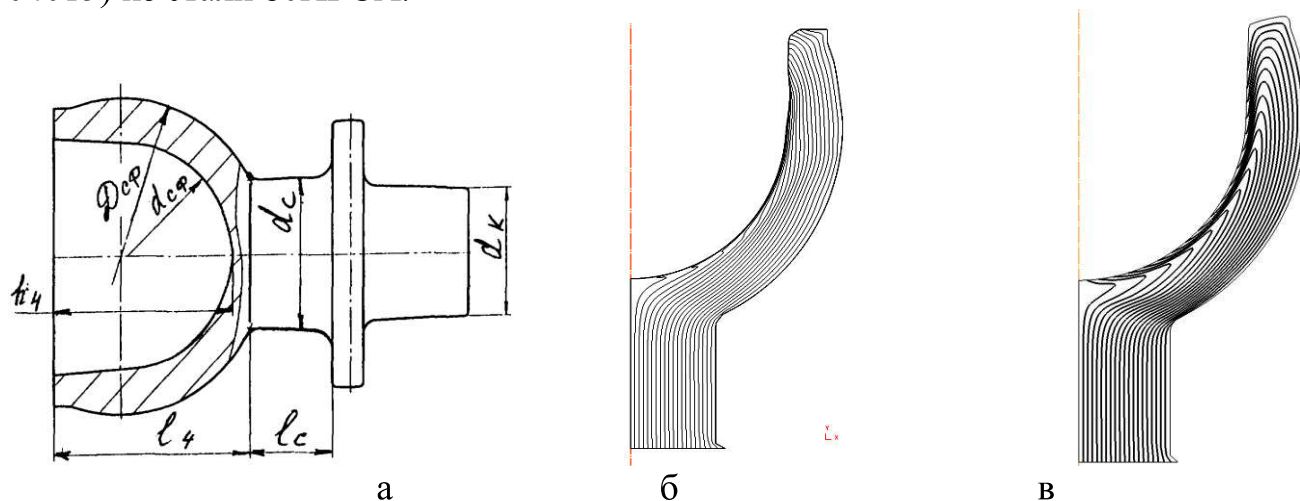


Рисунок 10. Поковка «опора шаровая» для автомобиля «Урал»: а – схема поковки, б – волокнистое строение поковки при штамповке по существующей технологии, в – волокнистое строение при штамповке по предлагаемой технологии

Согласно разработанной методике проектирования, в программном комплексе DEFORM были смоделированы операции штамповки по заводской технологии. Значения углов β_1 и β_2 и β_{cp} ориентации волокон на глубине снятия припуска на механическую обработку $\Delta=1.9$ мм оказались соответственно равны 76.8° , 87.7° и 65.6° (Рисунок 10,б). Полученное волокнистое строение было признано неудовлетворительным (все значения углов выхода волокон близки к 90°).

Далее, с учетом полученной неудовлетворительной ориентации волокон, была произведена процедура усовершенствования технологического процесса, состоящая из следующей последовательности действий (руководствуясь приведенной на Рисунке 9 блок-схемой):

- Была выбрана новая схема штамповки, включающая в себя один наборный переход в коническом пуансоне, предварительный штамповочный переход при $\alpha=0^\circ$ (плоский торец пуансона) и окончательный штамповочный переход. Значения углов β_1 и β_2 и β_{cp} ориентации волокон после последнего перехода на глубине снятия припуска на механическую обработку $\Delta=1.9$ мм стали соответственно равны 161.4° , 165.3° и 165.6° . Данные показатели могут быть признаны удовлетворительными, однако, с учетом, что показатели этих углов все же далеки от оптимальных, дальнейшее улучшение волокнистого строения в этой поковке было признано целесообразным.
- Далее на двух уровнях варьировали формой предварительного штамповочного перехода, приняв $\alpha=7.5^\circ$ (выпуклый пуансон) и $\alpha=-7.5^\circ$ (вогнутый пуансон). Все остальные параметры технологического процесса были оставлены без изменений. Значения углов β_1 и β_2 и β_{cp} ориентации волокон при $\alpha=7.5^\circ$ соответственно равны 134.2° , 49.7° и 94.75° , а при $\alpha=-7.5^\circ$ соответственно равны 132.36° , 176.77° и 34.83° . Вариант, когда угол $\alpha=-7.5^\circ$ (Рисунок 10,в) является наилучшим из трех рассмотренных вариантов, т.к. специфика работы детали такова, что она не работает на истирание в области измерения угла β_1 , а работает на истирание только в области

измерения угла β_2 . Т.к. угол β_2 в этом случае близок к 180° , данная схема признается оптимальной с точки зрения волокнистого строения.

Общие выводы

1. На основе проведенного анализа существующих способов получения направленного волокнистого строения предложен технологический процесс штамповки поковок типа стержня с полусферическим фланцем, позволяющий управлять ориентацией волокон при следующих конструктивно-технологических параметрах: относительная длина высадки $\psi=2.5...5.4$, относительная толщина стенки полусферы $\gamma=0.337...0.475$, угол наклона деформирующей поверхности пуансона на предварительном штамповочном переходе $\alpha = -7.5^0...+7.5^0$.

2. Разработанные регрессионные модели, описывающие взаимосвязь между предложенными показателями ориентации волокон β_1 , β_2 , β_{cp} при различных значениях относительной величины припуска на механическую обработку δ и конструктивно-технологическими параметрами, позволяют оценивать характер волокнистого строения в детали с точностью $\pm 10\%$, что подтверждено экспериментальными исследованиями.

3. Анализ современных методов расчета сил деформирования показал, что наиболее рациональными методами расчета сил деформирования при высадке поковок типа стержня с полусферическим фланцем являются метод конечных элементов и аналитический метод расчета, основанный на методе пластического течения, позволяющие рассчитывать силу высадки с точностью $\pm 20\%$.

4. Разработанная методика проектирования позволяет определять конструктивно-технологические параметры высадки на ГKM поковок типа стержня с полусферическим фланцем, применение которых позволяет улучшать показатели ориентации волокон β_1 , β_2 , β_{cp} в детали и повышать её относительную стойкость к истиранию до 20%.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Определение волокнистого строения поковок типа стержня с фланцем / А.А. Сидоров [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 1. С. 21-23. (0,35 п. л. / 0,09 п. л.).

2. Способ изготовления поковок типа стержня с фланцем: пат. 2419505 РФ / Семёнов Е. И., Белокуров О.А., Гудов А. А., Иванюк А. В., Лавриненко В.Ю., Сидоров, А. А.; заявл. 05.10.2009; опубл. 27.05.2011. Бюлл. №15. (0,92 п. л. / 0,15 п. л.).

3. Сидоров А. А. Определение волокнистого строения в поковках типа стержня с полусферическим фланцем // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. №. 5. С. 25-29. (0,58 п. л. / 0,58 п. л.).

4. Сидоров А. А., Белокуров О.А. Определение потребной силы деформирования при штамповке поковок типа стержня с полусферическим фланцем // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. №. 6. С. 991-997. (0,69 п. л. / 0,35 п. л.).