

На правах рукописи

ПАРАМОНОВ Владислав Викторович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ И РЕЖИМОВ
ШТАМПОВКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПОКОВОК
ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Специальность 05.16.05 – "Обработка металлов давлением"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в научно-исследовательской лаборатории деформации сверхпластических материалов Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета).

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор Ершов Андрей Николаевич
кандидат технических наук, доцент Лисунец Николай Леонидович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Сосенушкин Евгений Николаевич
кандидат технических наук Синельников Сергей Иванович

Ведущая организация:

ОАО «НИИТавтопром»

Защита диссертации состоится «27» декабря 2006 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.09 при Московском государственном институте стали и сплавов

по адресу: 199049, Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан «___» _____ 2006 года.

Справки по телефону: 955-01-27

Ученый секретарь диссертационного совета,
Профессор

Ионов С.М.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Одной из основных задач, стоящих перед современным автомобилестроением, является снижение массы автомобиля, что позволяет сократить расход топлива и объем выхлопных газов и, следовательно, уменьшить расходы на эксплуатацию автомобиля и его вредное влияние на окружающую среду. За последние двадцать лет среднестатистический легковой автомобиль стал на 150 кг тяжелее, что объясняется как увеличением габаритов автомашин, так и повышением их безопасности и комфорта. Существенные резервы снижения массы автомобиля заключаются в использовании новых материалов, в частности алюминия и его сплавов.

В автомобильной промышленности используются сплавы алюминия с легированием различными химическими элементами - кремнием (Si), магнием (Mg), марганцем (Mn), цинком (Zn), никелем (Ni), титаном (Ti), хромом (Cr) и т.д. Добавляя их в алюминий, удастся получить сплавы с требуемыми характеристиками. Большой интерес автомобилестроителей к алюминиевым сплавам объясняется тем, что они легкие и прочные, имеют более высокие, чем сталь, теплопроводность, электропроводность и, главное, коррозионную стойкость. Поэтому их применение при изготовлении автомобильных деталей дает двойной выигрыш: снижается масса автомобиля в целом и увеличивается его надежность и долговечность, что способствует уменьшению расхода топлива и попутно токсичности отработавших газов.

В настоящий момент из алюминиевых сплавов изготавливают такие детали автомобилей, как детали двигателя, радиаторы, коллекторы, детали тормозной системы, кузова и их компоненты, детали ходовой части и подвески, диски колес. Для изготовления заготовок автомобильных деталей используются наиболее распространенные технологии: литье, ковка, прессование (экструзия), холодная листовая и объемная штамповка, горячая объемная штамповка и ряд других специальных процессов обработки давлением конструкционных и композиционных материалов, таких как изотермическая штамповка, порошковая и гранульная металлургия (спекание, холодная и горячая экструзия, изостатическое прессование и компактирование), сверхпластическая формовка, объемная штамповка в состоянии сверхпластичности, штамповка кристаллизующегося металла (тиксотропная штамповка).

В связи с изложенным, совершенствование и разработка эффективной, ресурсосберегающей технологии обработки металлов давлением (ОМД) для производства автомобильных деталей из алюминиевых сплавов является актуальной научно-технической задачей, решению которой посвящена настоящая работа. Целью работы является обоснованный выбор и разработка рациональных технологических схем и режимов для изготовления деталей автомобиля из алюминиевых сплавов методами объемной штамповки.

Автором выносятся на защиту: результаты анализа конструкции деталей из алюминиевых сплавов для автомобиля и возможных способов их изготовления методами обработки давлением; данные и рекомендации по выбору наиболее перспективных технологий и методов производства; методика определения количественных характеристик реологических свойств исследуемых алюминиевых сплавов в интервале температур горячей деформации, включая область жидкой и твердожидкой фаз; результаты разработки трехмерных моделей деталей, поковок и заготовок для моделирования проектируемой технологии; результаты расчетов температурных полей и моделирования формоизменения для получения автомобильных деталей в процессах штамповки кристаллизующегося металла (ШКМ) и горячей объемной штамповки, технологические режимы и рекомендации для производства поковок из алюминиевых сплавов для автомобилей; результаты опытного опробования технологий штамповки поковок для ряда автомобильных деталей и исследования их качества и работоспособности; предварительные оценки эффективности применения алюминиевых сплавов в автомобилестроении.

Работа выполнена по плану госбюджетных работ МИСиС (ТУ) и в соответствии с программой «Алюминиевый автомобиль» в научно-исследовательской лаборатории Деформации сверхпластичных материалов Московского государственного института стали и сплавов (Технологического университета) при научной и методической консультации д.т.н. проф. Ю.П. Кирдеева (МГТУ СТАНКИН) и к.т.н., с.н.с. М.А. Цепина.

Целью работы является научно обоснованный выбор и разработка эффективных технологических схем и режимов для изготовления поковок деталей автомобиля из алюминиевых сплавов методами объемной штамповки.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Провести анализ номенклатуры автомобильных деталей из алюминиевых сплавов и выбрать наиболее перспективные способы их изготовления методами обработки давлением для совершенствования технологий производства, включающих штамповку кристаллизующегося металла (ШКМ).

2. На основе использования информационных компьютерных технологий разработать методику расчетов количественных характеристик реологических параметров деформируемых алюминиевых сплавов в интервале температур горячей деформации, включая экстраполяцию в области температур твердожидкой и жидкой фаз.

3. Разработать трехмерные твердотельные модели для выбранных типовых автомобильных деталей, поковок, заготовок и штампового инструмента для проведения математического моделирования проектируемой технологии с использованием САПР.

4. Выполнить моделирование формоизменения заготовок при получении поковок автомобильных деталей из алюминиевых сплавов штамповкой кристаллизующегося металла и горячей объемной штамповкой. Произвести расчеты технологических параметров деформирования.

5. Разработать технологические схемы, режимы и технические рекомендации для технологий производства автомобильных поковок из алюминиевых сплавов с использованием штамповки кристаллизующегося металла.

6. На основе результатов опытного опробования технологий штамповки поковок автомобильных деталей исследовать их качество и по данным моделирования и испытаний оценить их работоспособность.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Установлены количественные зависимости реологических характеристик (напряжений течения от степени, скорости и температуры горячей деформации) и реологических коэффициентов (показателей скоростного и деформационного упрочнения) для описания высокотемпературной деформации сплавов АВВ, АК6 и АД31.

2. Для расчетов формоизменения при штамповке сложнопрофильных поковок определены значения сдвиговой вязкости для указанных сплавов в широком диапазоне температур горячей деформации с их экстраполяцией в область твердожидкой и жидкой фаз.

3. Разработаны математические модели для описания малых упругопластических деформаций штампового инструмента в виде экспоненциальных, линейных, степенных и логарифмических уравнений, устанавливающих температурную зависимость механических и теплофизических свойств штамповых сталей.

4. Разработана методика оценки работоспособности деталей двигателя при их циклических испытаниях на растяжение-сжатие и изгиб на основе определения величины и распределения напряжений и деформаций при максимальных нагрузках, задаваемых при испытаниях на усталостную прочность с помощью моделирования объемных упругопластических деформаций.

Практическая полезность работы.

1. Разработаны и опробованы в условиях опытного и промышленного производства рациональные технологические схемы, термомеханические режимы и технические рекомендации для совершенствования технологий изготовления автомобильных поковок из алюминиевых сплавов с применением процесса штамповки кристаллизующегося металла, которые могут быть рекомендованы для использования как в условиях малых предприятий, так и в серийном автомобилестроении.

2. Разработанная комплексная методика проектирования процессов штамповки использована при построении твердотельных моделей типовых деталей, поковок и штампового инструмента, определении численных параметров моделей реологических свойств материалов заготовки и инструмента, расчетов горячего формоизменения при штамповке поковок, имитации условий работы деталей. Это позволяет на стадии подготовки производства не только сократить затраты и сроки при проектировании новой технологии, но и прогнозировать технологические показатели штамповки автомобильных поковок, оценивать качество и работоспособность получаемых готовых деталей.

3. Разработаны технические рекомендации для ШКМ алюминиевых автомобильных поковок, которые предложены для использования при проектировании новых технологий ОМД.

Методы исследования.

В качестве основного метода исследования был выбран метод математического моделирования с использованием компьютерных вычислительных систем и экспериментальной проверкой результатов в условиях опытного производства на натуральных материалах и поковках реальных деталей.

В работе были использованы компьютерные методы построения плоских графических (чертежных) и трехмерных (твердотельных) моделей с помощью САПР «AutoCAD» и «SolidWorks». Моделирование процессов объемной штамповки проводили с помощью САПР Q-form и CAD системы DEFORM-3D. Оценку работоспособности деталей под действием внешней нагрузки проводили с помощью модулей CAD системы COSMOS-DStar.

Также применяли экспериментальные методы металлографического анализа структуры, механических испытаний (в том числе измерение твердости), стендовых испытаний на циклические нагрузки

Достоверность результатов и обоснованность положений и выводов

Достоверность результатов моделирования подтверждена при проведении штамповки опытных и мелкосерийных партий поковок реальных деталей и при экспериментальных исследованиях на опытном участке ШКМ учебно-научного центра МИСиС (ТУ) кафедры ОМД и в производственных условиях на промышленных предприятиях ОАО «ЗиЛ», ОАО «СМК» и ГП «ММЗ» (г. Минск).

Для оценки свойств и качества полученных деталей и заготовок применяли стандартные виды испытаний и современные методы статистической обработки данных.

Реализация результатов работы.

В результате проведенных работ разработан базовый вариант технологии производства автомобильных поковок из алюминиевых сплавов АВВ и АД31, которые могут быть предложены на коммерческой основе для внедрения ряду производственных российских фирм.

Результаты теоретических исследований используются в учебном процессе на кафедре ОМД и НИЛ ДСПМ МИСиС (ТУ) при выполнении курсовых и дипломных работ студентов, обучающихся по специальности 1106 «Обработка металлов давлением».

Апробация работы. Результаты работы докладывались на Третьей Международной научно-технической конференции, Воронеж, 2002 г.; международных конгрессах Союза Кузнецов 2003 и 2005 г.г.; Всероссийской научно-технической конференции «Наука – производство – технология – экология», Киров, 2003 г.

Публикации. По теме работы опубликовано 6 статей в сборниках материалов международных конгрессов и всероссийских научно-технических конференций и в журнале Цветные металлы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, содержит 209 страниц, в том числе включает 124 страницы машинописного текста, библиографический список из 113 наименований литературных источников, 110 рисунков, 28 таблиц и 2 приложения.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, определено направление исследований и сформулированы основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе выполнен анализ состояния и перспектив использования алюминия и его сплавов в автомобильной промышленности, а также процессов получения деталей из алюминиевых сплавов методами ОМД.

Кратко охарактеризованы основные промышленные алюминиевые сплавы, отражены их составы и механические свойства. Рассмотрены виды полуфабрикатов и заготовок из алюминиевых сплавов, используемых для изготовления деталей автомобилей. Проанализированы процессы обработки металлов давлением, гранульной и порошковой металлургии, используемые для получения различных алюминиевых автомобильных заготовок, такие как: литье, ковка, прессование (экструзия), холодная листовая и объемная штамповка, горячая и изотермическая объемная штамповка. Отмечены особенности современных методов разработки технологии ОМД с использованием компьютерных ВС, позволяющих моделировать деформации упругопластических, жесткопластических, вязких и вязкопластических сред, которые рассматриваются в теории ОМД.

Анализ тенденций развития мировой автомобильной промышленности показывает, что ведущие автомобилестроительные фирмы постоянно увеличивают долю алюминиевых сплавов в основных узлах и конструктивных элементах корпуса, двигателя и ходовой части автомобилей, используя различные виды заготовок из литейных

и деформируемых термически упрочняемых алюминиевых сплавов – отливки, поковки, сортовой и листовой прокат, прессованные и гнутые профили.

Сопоставление достоинств и недостатков разных способов ОМД при производстве заготовок алюминиевых автомобильных деталей показало, что одним из перспективных процессов для производства заготовок сложно-профильных объемных алюминиевых деталей являются процессы штамповки кристаллизующегося металла, совмещающие достоинства литья под давлением и горячей объемной штамповки. Начиная с середины XX века существенный вклад в развитие процессов штамповки кристаллизующегося металла был внесен известными советскими и российскими учеными Бардиным И.П., Пляцким И.М., Батышевым А.И. и Кирдеевым Ю.П.

Из анализа научно-технической литературы было показано, что в связи с ростом автомобильной промышленности и возросшей конкуренцией резко выросли объемы проектно-конструкторских и проектно-технологических работ и, увеличилась их сложность. Поэтому при производстве новых моделей используют компьютерные и информационные технологии на всех этапах, начиная от дизайна внешнего вида, проработки всех узлов и деталей автомобиля, и кончая проектированием технологии производства и имитации поведения всего автомобиля и его узлов при статических и динамических испытаниях, а также в аварийных ситуациях. Для этих целей используются специально созданные высокопроизводительные компьютерные САД системы или САПР (системы автоматизированного проектирования – вычислительные системы - ВС).

Во второй главе рассмотрена общая методика проведения исследований.

В качестве объектов исследований по конструктивному признаку были выбраны поковки таких автомобильных деталей, как поршень бензинового двигателя внутреннего сгорания (ДВС), шатун кривошипно-шатунного механизма дизельного ДВС грузового автомобиля марки ЗИЛ, а также диски колес размером 5,5' для гоночного карта.

Основными объектами исследования по технологическому признаку были выбраны такие процессы ОМД, как объемная штамповка кристаллизующегося металла на гидравлическом прессе и горячая объемная штамповка на КГШП.

В качестве основного метода исследования формообразования в процессе деформации при разработке технологии объемной штамповки был выбран метод мате-

математического моделирования с использованием профессиональных компьютерных вычислительных систем и стандартных пакетов прикладных программ.

Математическое моделирование включало в себя:

- построение твердотельных моделей деталей, поковок, заготовок и инструмента с учетом физических и механических свойств;
- определение количественных характеристик реологических свойств и параметров горячей деформации алюминиевых сплавов на основе данных литературных источников;
- исследование формоизменения заготовки в неизотермических условиях на основе теории вязкопластических деформаций – теории течения Леви-Мизеса, теории теплообмена и теплопередачи в известных решениях дискретизации сплошной среды методом конечных элементов для задачи в перемещениях при смешанных граничных условиях;
- проведение испытаний детали из алюминиевого сплава на усталостную прочность при максимальных нагрузках для циклического нагружения на основе теории упругопластических деформаций.

В работе были использованы компьютерные методы построения плоских графических и трехмерных (твердотельных) моделей с помощью САПР «AutoCAD» и «SolidWorks». Моделирование процессов объемной штамповки проводили с помощью САПР Qform и CAD системы DEFORM-3D. Оценку работоспособности деталей под действием внешней нагрузки выполняли с использованием модулей CAD системы COSMOS-DStar.

Для проверки достоверности результатов моделирования проводили экспериментальные и опытные штамповки поковок в лабораторных или производственных условиях. Для оценки свойств и качества полученных деталей и заготовок применялись методы механических испытаний (в том числе измерения твердости) и металлографических исследований. Экономические оценки применения деталей из алюминиевых сплавов в автомобилях выполняли с использованием данных литературных источников.

Для математического моделирования ШКМ, лабораторных экспериментов и опытных штамповок были выбраны алюминиевые сплавы следующих марок – АВВ для поршня бензинового ДВС, АД31 для дисков колес спортивных гоночных автомо-

билей, АК6 – для шатуна дизельного ДВС. В качестве теоретической основы для выбора температурных режимов выплавки, нагрева, штамповки, закалки и старения для сплава АК6 использовали диаграмму состояния системы Al-Cu-Mg-Si, а для сплавов АВВ и АД31 – диаграмму состояния систем Al-Mg-Si. В качестве заготовок для опытного опробования технологических операций ШКМ использовали отходы прутков круглого сечения и профилей с сертифицированным химическим составом и свойствами.

Реологические свойства алюминиевых сплавов определяли с помощью специально разработанной методики обработки, аппроксимации и экстраполяции результатов экспериментов, полученных на пластометре А.М. Галкиным и данным публикаций других авторов. Механические свойства штамповых материалов (стали X13, 5XНМ и 5ХНВ), необходимые для оценки условий термомеханических воздействий на штамповый инструмент при математическом моделировании, определяли на основе данных А.В. Третьякова, Г.К. Трофимова, В.И. Зюзина.

Математическая постановка задачи моделирования вязкопластического деформирования сводится к известным уравнениям теории течения и теплообмена совместно с начальными и граничными условиями в напряжениях, перемещениях или смешанного типа для различных областей поверхности деформируемого тела.

Напряжения граничного трения определяется по закону Кулона - Амантона. При этом рассматривали классическую постановку и решение вязкопластической задачи формоизменения для изотропного тела в скоростях перемещений.

Неизвестными, которые определяются на каждом этапе решения, являются температурные поля, компоненты скоростей перемещений, тензора скоростей и девиатора напряжений и их интенсивности, средние напряжения, сопротивление деформации и величина накопленной деформации.

Для решения замкнутой системы уравнений механики деформируемого твердого тела используется вариационный метод. Пусть σ_{ij} будет любым полем напряжения удовлетворяющим уравнениям равновесия и статическим граничным условиям. Пусть δv_j будет любым виртуальным (возможным) непрерывным и непрерывно дифференцируемым полем скоростей перемещений, удовлетворяющим кинематическим граничным условиям. Зависимость компонент виртуального тензора скоростей может быть получена из $\delta \xi_{ij}$ следующим образом:

$$\delta \xi_{ij} = \frac{1}{2}(\delta v_{i,j} + \delta v_{j,i}) \quad (1)$$

В соответствии с вариационным принципом работа в объеме деформируемого тела, определяемая полем напряжения σ_{ij} для виртуального поля скоростей $\delta \xi_{ij}$ равняется работе, определяемой поверхностной силой F_i для виртуального поля скоростей перемещений δv_i . Этот принцип выражен равенством:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \xi_{ij} dV = \int_S F_i \delta v_i dS \quad (2)$$

где V – объем тела и S - его поверхность.

Разбив тензор напряжения на девиаторную и гидростатическую части, имеем:

$$\int_V \sigma'_{ij} \delta \xi_{ij} dV + \int_V \sigma_m \delta \xi_v dV = \int_S F_i v_i dS \quad (3)$$

где σ'_{ij} - тензор девиатор напряжений, σ_m - среднее напряжение и $\delta \xi_v$ является объемной нормой скорости деформаций, полученной из виртуального поля скоростей.

Пусть $\delta \sigma_m$ будет любым виртуальным полем средних напряжений. Уравнение несжимаемости (3) может быть записано в слабой форме следующим образом:

$$\int_V \delta \sigma_m \xi_v dV = 0. \quad (4)$$

Представленные выше соотношения, полученные соответственно из вариационного принципа минимума мощности и уравнения несжимаемости

$$\delta_{ij} \xi_{ij} = 0 \quad (5)$$

где δ_{ij} – символ Кронекера, представляют собой основные уравнения теории течения, которые используются для последующей конечной дискретизации твердого тела на конечные элементы. Необходимо подчеркнуть, что среднее напряжение используется здесь как независимая переменная и является формально эквивалентным лагранжевому множителю, определяющему условие несжимаемости.

Из литературы известно большое количество эмпирических формул для аппроксимации функции напряжений течения в определяющих соотношениях Леви-Мизеса:

$$\sigma'_{ij} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_e}{\xi_e} \cdot \xi_{ij}, \quad (6)$$

Однако все они обладают определенными погрешностями и не всегда достаточно точно передают количественный и качественный характер этой зависимости. Кроме этого, для большинства материалов данные о сопротивлении пластической дефор-

мации представлены в графической форме. Компьютерные ВС редко используют эмпирические формулы, а аппроксимацию зависимости $\sigma_e(\xi_e, \varepsilon_e, t)$ осуществляют непосредственно на основе экспериментальных данных, представленных в виде 3-х или 2-х мерных таблиц с аппроксимацией сплайн-функциями на неравномерной сетке. Поэтому для моделирования необходимо иметь экспериментальные данные по зависимости напряжений течения материала заготовки во всем температурно-скоростном и деформационным интервалах изучаемого процесса.

Зависимость $\sigma_e(\xi_e, \varepsilon_e, t)$ в ВС Q-Form и DEFORM-3 во встроенных в этих системах базах данных реологических свойств для алюминиевых сплавов обычно задается в виде аппроксимирующих функций или в табличной форме на равномерной сетке для каждого параметра в достаточно широком диапазоне по скорости деформации ($10^{-4} - 10^{-5} \leq \xi \leq 10^0 - 10^2 \text{ с}^{-1}$) и степени деформации ($0,01 - 0,1 \leq \varepsilon \leq 1,5 - 2$) с регулярным шагом по логарифмической шкале, а также по температуре деформирования ($200 - 250 \leq t \leq 450 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$) с регулярным шагом по обычной шкале.

В работе была разработана специальная методика перевода растровых изображений графических зависимостей « σ - ε » на рисунках, диаграммах или в таблицах при фиксированных скоростях деформации ξ для разных температур испытаний t или аналогичных зависимостей « σ - ξ » при фиксированных степенях деформации ε для разных температур испытаний t в цифровую форму записи для последующей аппроксимации и экстраполяции.

При построении реологической модели высокотемпературной деформации использовалась вязкопластическая среда с нелинейной зависимостью напряжений от скорости и степени деформации, поведение которой описывается уравнением:

$$\sigma_e = \sigma_0 \exp(-k_t t) \xi_e^m \varepsilon_e^n, \quad (7)$$

где σ_e – интенсивность напряжений [МПа], σ_0 – начальное напряжение [МПа], t – температура [$^\circ\text{C}$], ξ_e – интенсивность скоростей деформаций [1/с], ε_e – накопленная деформация, k_t – температурный множитель, m и n – показатели скоростного и деформационного упрочнения соответственно.

При аппроксимации численных зависимостей напряжения течения выполняется следующая последовательность вычислений. В начале рассматриваются постоянная температура $t = \text{constant}$ и зависимость (7) для каждой фиксированной скорости деформации $\xi_e = \text{constant}$ принимает вид:

$$\sigma_e = K_T \varepsilon_e^n \quad (8)$$

То есть каждая серия испытаний при заданной температуре может быть аппроксимирована степенной функцией с показателем $0 < n < 1,0$ и множителем K_T , величина которого равна напряжению течения при степени деформации $\varepsilon_e = 1$. Учитывая, что

$$K_T = \sigma_0 \exp(k_t^* t) \quad (9)$$

можно определить зависимость напряжений течения от температуры при аппроксимации экспоненциальной зависимостью расчетных и экспериментальных значений напряжений σ_e .

Для экстраполяции полученных данных в область температур вблизи $T_{пл}$, (т.е. до температуры солидуса), а также в область температур перехода в твердожидкую фазу (т.е. выше солидуса и ниже ликвидуса) и далее в жидкую фазу (выше ликвидуса) использовали подход О.М. Смирнова для анализа температурной зависимости показателя скоростного упрочнения $m = f(t)$ сдвиговой вязкости $\eta = f(t)$.

При анализе данных полей распределения характеристик НДС по поверхности, объему и сечениям поковок, полученных при моделировании также использовали гистограммы распределения частоты по интервалам рассматриваемых параметров в пределах от минимального до максимального значения с определением характеристик нормального распределения – моды, медианы и среднего значения, а также цветные изолинии и заливки для разных уровней значений рассчитанных характеристик с размерной шкалой в цветовой палитре.

В третьей главе представлены результаты по определению численных значений реологических характеристик и параметров исследуемых сплавов и штампового материала инструмента в интервале температур ШКМ.

На основе применения разработанной методики для ранее опубликованных в технической литературе экспериментальных данных были получены зависимости реологических характеристик напряжений течения от степени, скорости и температуры горячей деформации и реологических параметров – показателей скоростного и деформационного упрочнения для описания высокотемпературной деформации алюминиевых сплавов АВВ, АК6 и АД31. Было показано, что уравнение нелинейной вязкопластичности (7) с экспоненциальным температурным множителем достаточно хорошо с точностью 5 — 7 % при доверительной вероятности 0,93 — 0,95 описывает поведение этих сплавов в широком интервале температур горячей деформации.

На основе этих данных были рассчитаны значения сдвиговой вязкости для этих сплавов в широком диапазоне температур горячей деформации с экстраполяцией данных в область температур твердожидкой и жидкой фаз. Эти зависимости рассчитываются исходя из следующего:

$$\sigma_e = 3 h \dot{\xi}_e = 3 h_0 \exp(-k_t T) \quad (10)$$

где h , h_0 – текущее и начальное значения сдвиговой вязкости [$\text{Па} \cdot \text{с}$]; $k_t \sim Q/R$ – температурный множитель (постоянная Больцмана) [$1/\text{K}$], пропорциональный частному от деления значения энергии активации вязкого течения Q [КДж] на величину универсальной газовой постоянной $R=8,314 \cdot 10^{-3}$ [$\text{КДж}/(\text{моль} \cdot \text{K})$].

Соответственно, для известных значений интенсивностей напряжений σ_e и скоростей деформации $\dot{\xi}_e$ можно построить температурную зависимость сдвиговой вязкости:

$$h = \sigma_e / (3 \dot{\xi}_e) = h_0 \exp(-k_t T) \quad (11)$$

Таким образом, можно производить экстраполяцию реологических свойств деформируемого материала в область температур твердожидкой и жидкой фаз.

Исходя из (11), зависимость сдвиговой вязкости от температуры деформации с экстраполяцией в область температур Солидуса и Ликвидуса для сплава АВВ при температуре до 720 К рассчитывается по формуле: $h = 701,19 \exp(-0,0048T)$, а, при температуре свыше 720 К по формуле: $h = 2,1596 \exp(-0,0096T)$. Аналогичные зависимости были получены для сплавов АК6 и АД31.

Для штамповых сталей 5ХНМ, 5ХНВ и Х13 получено, что температурная зависимость механических и теплофизических характеристик штамповой стали в области температур малых упругопластических деформаций может с минимальной средне-квадратической ошибкой $\sim 10\%$ описываться не только экспоненциальной функцией Аррениуса, но и линейными, степенными и логарифмическими уравнениями. Основные уравнения для описания температурной зависимости механических и теплофизических свойств штамповой стали Х13 представлены в таблице 2.

На основе полученных количественных зависимостей реологических характеристик исследуемых деформируемых алюминиевых сплавов и штамповых сталей были подготовлены базы данных исходных значений для вычислительных систем Q-form и DEFORM-3D.

Зависимости физико-механических и теплофизических характеристик
штамповой стали X13 от температуры в интервале 20 – 650 °С

№ п/п	Наименование характеристики	Обоз.	Размерность	Вид уравнения	Ошибка аппрокс. %
1	Модуль Юнга	E	МПа	$E = 289,25 \cdot \exp(-6,0 \cdot 10^{-4} \cdot t)$	10,3
2	Коэффициент Пуассона	χ	–	$\chi = 0,26 + 1,0 \cdot 10^{-4} \cdot t$	3,5
3	Предел упругости	σ_E	МПа	$\sigma_E = 316,84 \cdot \exp(-4,0 \cdot 10^{-4} \cdot t)$	7,0
4	Предел текучести	σ_s	МПа	$\sigma_s = 366,54 \cdot \exp(-4,0 \cdot 10^{-4} \cdot t)$	7,0
5	Плотность	ρ	кг/м ³	$\rho = 7878,6 \cdot \exp(-2,0 \cdot 10^{-6} \cdot t)$	9,7
6	Удельная теплоемкость	c	Дж/кг/град	$c = 124,93 \cdot t^{0,8064}$	11,0
7	Коэфф. линейн. расширения	α	1/град	$\alpha = 6,5275 \cdot \ln(t) - 24,992$	12,8
8	Коэфф. тепло- проводности	λ	Вт/м/град	$\lambda = 54,062 \cdot \exp(-6,0 \cdot 10^{-4} \cdot t)$	9,8
t – температура в °С					

В четвертой главе представлены результаты математического моделирования процессов формоизменения при штамповке автомобильных поковок из алюминиевых сплавов, которое проводили с целью выбора рациональных схем формоизменения и определения технологических режимов штамповки.

Для получения поковок поршня, шатуна и диска колеса, было предложено использовать процесс штамповки кристаллизующегося металла. Для разработки технологии ШКМ с помощью компьютерного моделирования и интегрированных ВС, использующих метод КЭ, общие задачи моделирования применительно к каждой выбранной детали конкретизировали. За основу было принято, что моделирование должно включать в первую очередь сравнение разных вариантов технологий, в том числе по схемам течения металла, видам заготовок, конструкций инструмента и других вопросов, решаемых при проектировании новых технологий ОМД.

В результате моделирования ШКМ поковки поршня ДВС провели сравнение характера течения металла при разных схемах ШКМ. Было показано, что наиболее приемлемым вариантом деформирования является комбинированное выдавливание

(обратное - прямое - боковое) поковки с пустотелыми внутренними боковыми бобышками. При этом основные стадии формоизменения, установленные по графику зависимости усилия штамповки от хода ползуна прессы (рисунок 1) показали принципиальное отличие ШКМ от кокильного литья и литья под давлением. В частности, при оформлении выдавливанием боковой пустотелой внутренней бобышки происходит осадка стенки поршня не только в месте расположения полки, но и по всей её высоте.

Установлено, что МКЭ моделирование позволяет достаточно полно отобразить хорошо известные закономерности горячей штамповки сложнопрофильных поволок шатуна в открытых штампах и выявить характерные стадии формообразования при заполнении гравюры. Сравнения влияния формы исходной заготовки показало предпочтительность использования предварительно профилированной заготовки, рассчитанной по эпюре диаметров и получаемой ШКМ. Стадии формоизменения, полученные при моделировании штамповки автомобильного шатуна из профилированной заготовки, отображены на рисунке 2.

При моделировании штамповки поковки диска колеса было установлено, что штамповка кристаллизующегося металла, когда большая часть процесса формоизменения поковки по времени происходит в твердой фазе при высоких температурах ниже Солидуса, по феноменологическим признакам подобна процессу так называемой антигорячей изотермической штамповке. Показано, что на заключительной стадии штамповки в закрытых штампах при оформлении торцевого бурта усилие штамповки возрастает до 450-490 КН за счет того, что происходит течение металла в замкнутой полости, то есть наблюдается классическая стадия доштамповки поковки в закрытом штампе с оформлением полости бурта с малыми радиусами скругления.

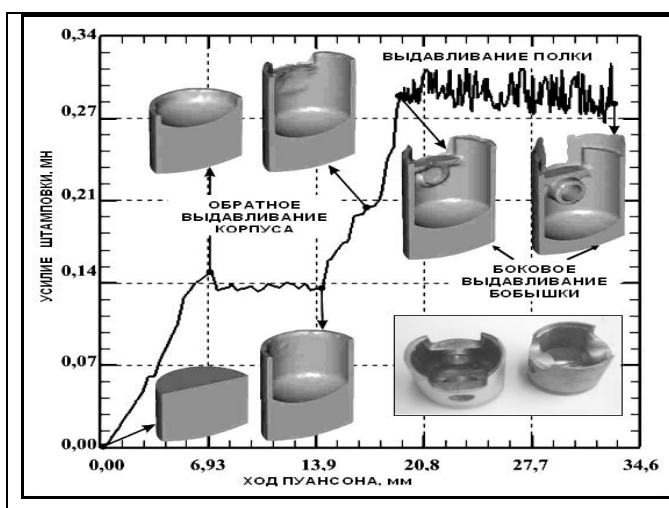
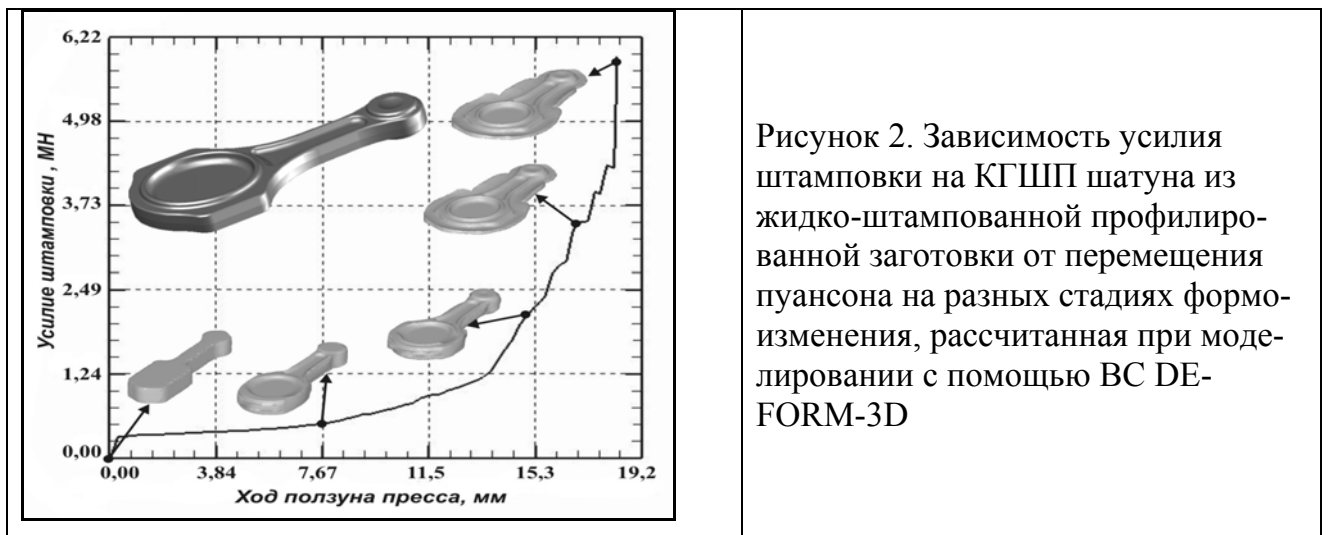


Рисунок 1. Зависимость усилия штамповки поршня от перемещения пуансона на разных стадиях формоизменения, рассчитанная при моделировании с помощью BC DEFORM-3D



Было проведено сопоставление результатов сравнительного анализа применения двух профессиональных компьютерных ВС для моделирования штамповки автомобильного диска. Зависимость усилия штамповки поковки колеса от перемещения ползуна пресса и характерные стадии формоизменения ШКМ, рассчитанные при моделировании с помощью BC DEFORM-3D и Qform, представлены на рисунке 3. Установлено, что для быстрого приближенного анализа разных вариантов технологий ШКМ на ПК среднего класса при относительно низких финансовых затратах с достаточной для инженерных целей точностью вполне приемлема отечественная BC Qform, а для более глубокого и точного анализа нужно использовать более дорогую, менее производительную, но более информативную BC DEFORM-3D.

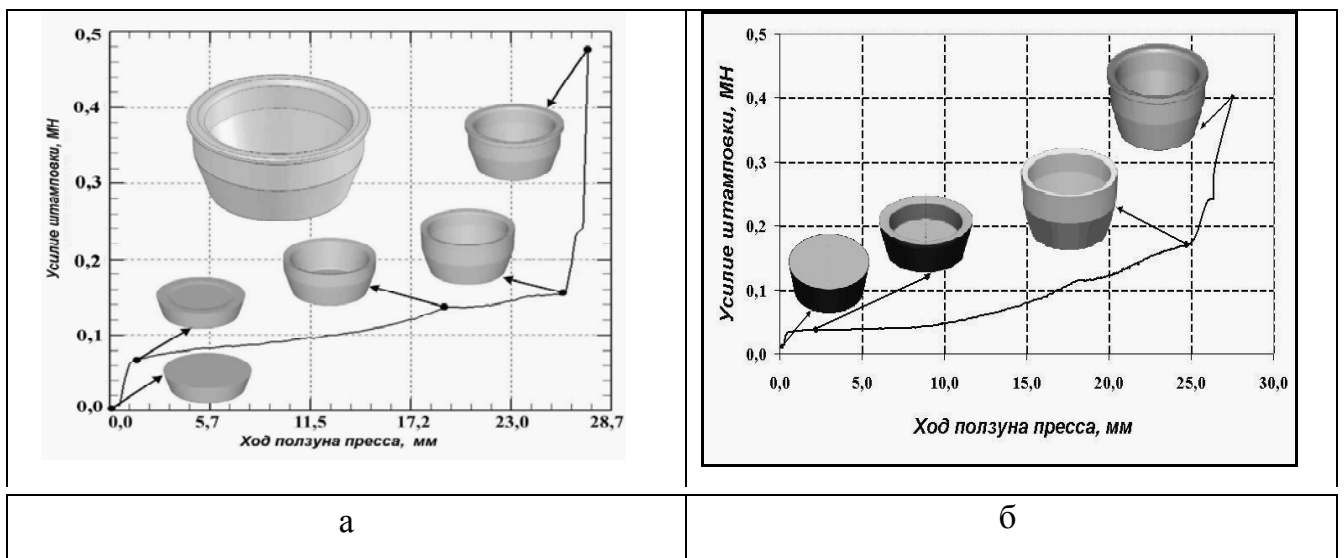


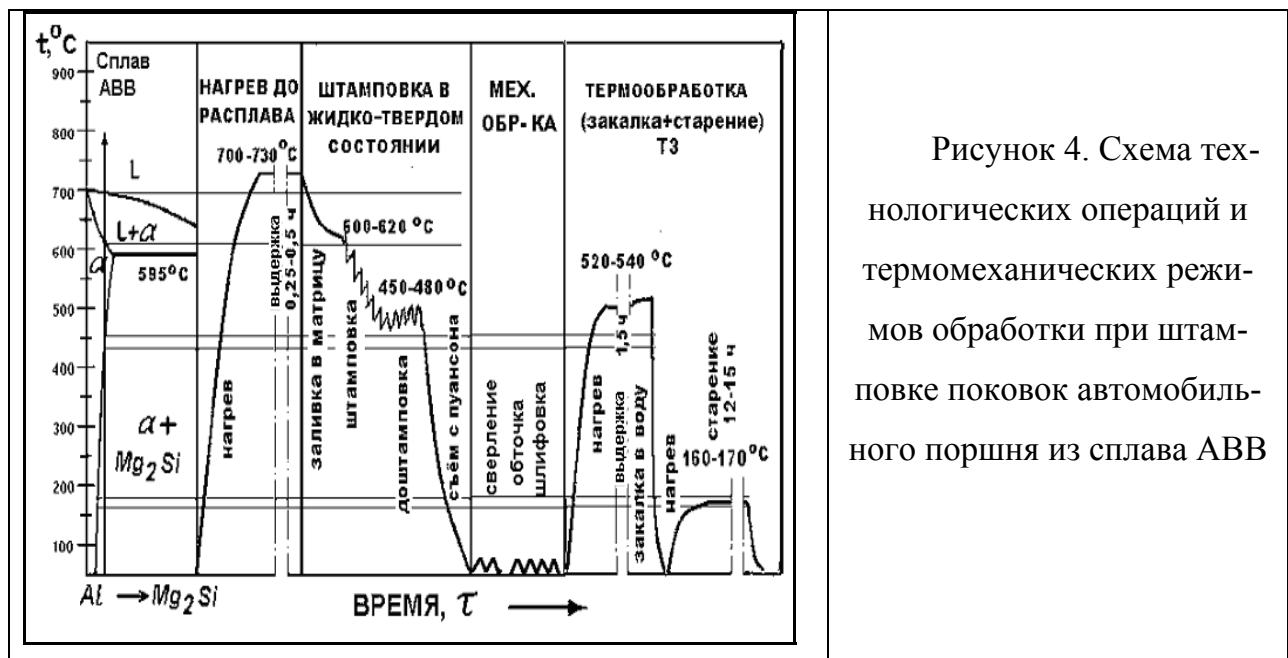
Рисунок 3. Зависимость усилия штамповки поковки диска от хода ползуна пресса на разных стадиях формоизменения, полученная при моделировании с помощью BC DEFORM-3D (а) и BC Qform (б)

Показано, что анализ характеристик напряженно-деформированного состояния, полученных при МКЭ моделировании ШКМ алюминиевых поковок, позволяет определять не только температурно-силовые условия штамповки, но и оценивать и прогнозировать возможные дефекты и наиболее опасные с точки зрения разрушения металла зоны поковок.

В пятой главе представлены результаты по разработке технических рекомендаций и опытному опробованию ШКМ при изготовлении алюминиевых автомобильных деталей. Рассмотрен типовой технологический процесс ШКМ алюминиевых автомобильных поковок. Также, разработаны рекомендации по выбору термомеханических режимов сквозной технологии от плавки до термической обработки готовых алюминиевых автомобильных поковок. Это было сделано на основании анализа данных, приведенных в литературном обзоре, результатов, полученных при количественном описании реологических свойств сплавов АВВ, АК6 и АД31 в широком интервале температур, включая области температур жидкой и твердожидкой фаз, и обобщения данных математического моделирования процесса ШКМ. Также в данной главе проводится сравнение процессов литья под давлением и ШКМ и приводится номенклатура поковок рекомендуемых для производства ШКМ.

Был выполнен комплекс опытных работ по опробованию и отработке технологических схем и термомеханических режимов с использованием ШКМ (рисунок 4). Штамповку поршня проводили на гидромеханическом прессе усилием 500 КН в штампе с быстросменными матрицей и пуансоном. Сменную матрицу перед штамповкой нагревали в камерной электропечи сопротивления. Температура пуансона, выполненного сборным, была комнатной. В качестве смазки использовали смесь алюминиевой пудры с коллоидным графитом в соотношении 5:1, разведенную на пальмовом масле. Расплав заливали в полость матрицы через сменный конический литник из нержавеющей стали. В матрице охлаждающийся металл выдерживали до температуры образования «кашеобразного» (твердофазного) состояния. Её контролировали и визуально, и по показаниям цифрового милливольтметра, соединенного с хромель-алюмелевой термопарой, которая была размещена в боковом отверстии матрицы вблизи стенки гравюры. Затем производилась штамповка с максимальной скоростью перемещения траверсы и при достижении усилия 450 - 470 КН пресс переключали в режим выдержки при постоянном усилии для окончательного заполнения гравюры

штампа. После окончания ШКМ пуансон отсоединяли от верхнего держателя, поднимали траверсу в верхнее положение и поднимали матрицу с поковкой и пуансоном из нижнего штампа с помощью выталкивателя, расположенного в рабочем столе прессы и охлаждали на воздухе или в воде до комнатной температуры. Поковку из матрицы извлекали вручную и снимали её с пуансона на верстаке с помощью ручного гидравлического прессы усилием 30 кН. После удаления с помощью ножа и напильника торцевых и внутренних боковых заусенцев, в бобышках поковки просверливали отверстия на сверлильном станке в специальном кондукторе. Затем их обтачивали с наружной боковой, верхней торцевой и сферической торцевой нижней части и шлифовали на токарном станке и далее проводили стандартную термическую обработку.



Технологический цикл ШКМ профилированной заготовки шатуна на опытном участке МИСиС (ТУ) включал такие же основные этапы, как и при штамповке алюминиевого поршня. Горячая объёмная штамповка поковки шатуна из профилированных заготовок, полученных ШКМ, проводилась на КГШП усилием 25 МН. Перед штамповкой заготовки нагревались в индукторе, включенном на 20 % мощности, обычно используемой для нагрева стали. Штамповку проводили с ручной перекладкой поковки за два перехода в предварительном и окончательном ручьях с последовательным расположением вставок в штамповом блоке. Облой и напуски для перемычек в отверстиях головок поковки шатуна удалялись за один переход в комбинированном обрезном пробивном штампе на кривошипном обрубном прессе КШ – 10890

усилием 2,5 МН. Термическую обработку поковок, которая включала закалку и старение по режиму ТЗ, осуществляли в ЦЗЛ АМО «ЗИЛ» в камерных печах электросопротивления.

Поковки диска колеса из сплава АД31 получали ШКМ на гидромеханическом прессе усилием 500 КН на опытном участке МИСиС (ТУ). После окончания ШКМ, поковка из матрицы извлекалась с помощью выталкивателя и охлаждалась на воздухе. Качества поковок дисков контролировали визуальным осмотром и с помощью замеров по диаметру верхнего торцевого бурта. С целью дополнительного уплотнения металла в приповерхностных зонах поковки диска колеса, где могли образовываться подкорковые пузыри, по наружной поверхности производили локальную пластическую деформацию на величину 0,7 – 1,2 мм. После обкатки поковки подвергали механической обработке, которая включала чистовую обточку наружной поверхности, расточку внутренней поверхности, торцовку верхней и нижней части, подрезку и профилирование по наружному боковому и торцевому буртам. Перед термической обработкой заготовки дисков очищали с поверхности от следов смазки. Термическую обработку поковок по режиму ТЗ, которая включала закалку и искусственное старение, производили в камерной печи электросопротивления.

Исследования качества поршней проводили путем измерения значений твердости по нижней и боковой поверхности. Твердость по Бринеллю у поршней, полученных ШКМ, после термообработки находится в интервале 1210 – 1300 МПа. Для сравнения можно указать, что твердость после термической обработки: литых поршней из силумина составляет 850 - 950 МПа; штампованных поршней из сплава АК12 1250 - 1350 МПа по шкале НВ.

Для оценки качества и работоспособности алюминиевого шатуна использовали экспериментальный метод, - с помощью исследования структуры и испытания механических свойств при постоянных и циклических нагрузках и теоретический – с помощью моделирования упругопластических деформаций при заданных нагрузках, соответствующих максимальной нагрузке для циклов растяжения и изгиба. Результаты механических испытаний показали, что качество штампованных поковок шатуна из сплава АК6 существенно превосходят допустимые требования отраслевого стандарта «Штамповки и поковки из алюминиевых сплавов. Технические условия». В результате теоретических исследований качества шатуна были определены критиче-

ские сечения, в которых прогнозировалось возможное разрушение детали в процессе работы. Данные прогнозы были подтверждены при натурных испытаниях. В результате можно сделать заключение, что несмотря на высокие механические свойства поковок, шатуны из сплава АК6 уступают по конструкционной прочности и долговечности шатунам, которые обычно изготавливают из конструкционных сталей.

При исследовании качества дисков колес производили замеры твердости на боковой поверхности диска и по его торцу. На боковой поверхности диска, подвергнутой холодной пластической деформацией с помощью обкатки роликом твердость оказалась выше и составила после термообработки 850 – 900 МПа. В то же время по торцу диска твердость по Бринелю в среднем равна 740 МПа. Для сравнения можно отметить, что твердость штампованных дисков производства Каменск-Уральского металлургического завода для алюминиевых колес из сплава 6061 составляет не менее 270 МПа, т.е. в три раза меньше.

При любом снижении технологических затрат на изготовление алюминиевых деталей, факторы эффективности их использования лежат в основном не в области производства автомобилей, а в области их эксплуатации и охраны окружающей среды. Таким образом, производственные, законодательные и потребительские требования по снижению расхода топлива и токсичных выбросов являются главными причинами того, что уменьшение снаряженной массы автомобиля становится одним из важных и решающих критериев оценки совершенства его конструкции и, следовательно, цены и эксплуатационных затрат.

Основные результаты и выводы по работе

1. На основании анализа номенклатуры автомобильных деталей из алюминиевых сплавов и способов их производства выбраны для исследования такие детали, как поршень ДВС, шатун ДВС, и диск колеса. Установлено, что в качестве одной из перспективных технологий их изготовления методами обработки давлением является процесс штамповки кристаллизующегося металла, называемый также жидкой или тиксотропной штамповкой, который соединяет достоинства литья под давлением и горячей объемной штамповки.

2. Разработана компьютерная методика статистической обработки, аппроксимации и экстраполяции экспериментальных и графических данных для расчетов чис-

ленных характеристик реологических свойств деформируемых алюминиевых сплавов. С её использованием для сплавов АВВ, АД31 и АК6 на основе данных литературных источников рассчитаны параметры модели, описываемой уравнением вязкопластической среды с нелинейным скоростным и деформационным упрочнением. Показано, что эти результаты позволяют рассчитать зависимости сдвиговой вязкости для широкого интервала температур горячей деформации, включая области твердой и жидкой фаз.

3. Для деталей поршня, шатуна и диска колеса разработаны трехмерные (твердотельные) модели поковок, заготовок и штампового инструмента с использованием САПР SolidWorks. Эти модели были использованы в качестве исходных данных для математического моделирования проектируемой технологии с использованием профессиональных компьютерных вычислительных систем Qform и DEFORM-3D.

4. Выполнен анализ формоизменения заготовок на основе моделирования при получении поковок поршня, диска колеса и профилированной заготовки шатуна штамповкой кристаллизующегося металла, а также поковки шатуна горячей объемной штамповкой в открытых штампах. Показано, что моделирование разных схем штамповки позволяет выбрать вид, размеры и форму заготовки, геометрию гравюры штамповых вставок и определять основные стадии формоизменения при заполнении сложной гравюры штампового инструмента.

5. В результате моделирования ШКМ поршня и диска колеса установлено, что основной схемой течения металла на заключительной стадии штамповки в закрытых штампах является комбинированное выдавливание с прямым, обратным и боковым истечением металла с преобладанием напряжений всестороннего сжатия. При моделировании горячей штамповки шатуна из сплава АК6 показано, что применение профилированной, полученной ШКМ заготовки вместо круглого прутка обеспечивает полное формообразование поковки за один переход с минимальным объемом облоя.

6. На основе выполненных исследований разработаны технологические схемы, режимы и технические рекомендации для технологии производства автомобильных алюминиевых поковок ШКМ. Для деталей автомобильного поршня ДВС из сплава АВВ, шатуна из сплава АК6 и диска колеса из сплава АД31 определены операции и режимы технологии получения качественных поковок, которые были реализованы

при опытном опробовании на экспериментальном участке кафедры ОМД МИСиС (ТУ).

7. Расчеты с помощью разработанной методики и испытания шатуна на усталостную прочность показали, что, несмотря на высокое качество поковок применение сплава АК6 не обеспечивает необходимой конструкционной прочности и требуется или замена на более высокопрочный сплав, и/или изменение конструкции шатуна. Исследование качества поршня и диска колеса из алюминиевых сплавов, полученных ШКМ, показало, что после термообработки они превосходят по механическим свойствам литые заготовки и требования ОСТ для алюминиевых авиационных поковок, и, следовательно, считаются пригодными для внедрения в производство.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

1. *Разработка и исследование процессов штамповки шатунов двигателей из алюминиевых сплавов./ Лисунец Н.Л., Смирнов О.М., Батулин В.В., Парамонов В.В. и др.// В Сб. «Авиакосмические технологии». Тр.3-ей Международной науч.-техн.конф. –Воронеж: ВГТУ,2002, с. 20-22*

2. *Лисунец Н.Л., Парамонов В.В., Анохин С.М., Коликов П.А. Варианты изготовления многокомпонентных дисков автомобильных колес из алюминиевых сплавов. В Сб. “Состояние, проблемы и перспективы развития металлургии и обработки давлением”. Тр. МГВМИ и Союза Кузнецов. 2003, с.. 285-288*

3. *Использование твердотельного моделирования для решения технологических задач обработки металлов давлением./ Колышницын А.В., Поляков С.М., Цепин М.А., Бублик А.Н., Парамонов В.В., и др.// Сб. материалов Всероссийской научно-технической конференции «Наука – производство – технология – экология» в 5 т. – Киров: Изд-во ВятГУ. 2003. Том 5, с. 50-51*

4. *Применение моделирования для исследования конструкторско-технологических параметров объектов и разработки технологии обработки металлов давлением./ Лисунец Н.Л., Цепин М.А., Колышницын А.В., Парамонов В.В. и др. // Теория и практика производства листового проката. Сб. научн. тр.. Часть 2 – Липецк, ЛГТУ, 2003, . 44-47*

5. *О видах исходных заготовок из алюминиевых сплавов и выборе процессов изготовления из них полуфабрикатов и изделий. / Лисунец Н.Л., Цепин М.А., Смирнов О.М., Качалин А.В., Парамонов В.В. // Цветные металлы, 2005, № 1, с. 87-91*

6. *Моделирование формоизменения в процессе штамповки несимметричной пространственной детали / Лисунец Н.Л., Цепин М.А., Парамонов В.В. и др. // Состояние, проблемы и перспективы развития металлургии и обработки металлов давлением. Сб. труд. МГВМИ. Вып. №5, М.: 2005, – с. 65-68*