

БИЯКАЕВА НУРГУЛЬ ТЕМИРГАЛИЕВНА

**Теоретические и технологические основы обработки металлов
в инструменте с изменяющейся рабочей поверхностью**

05.03.01 – Технологии и оборудование механической
и физико-технической обработки

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Республика Казахстан
Алматы, 2010

Работа выполнена в Павлодарском государственном университете имени С.Торайгырова.

Научный консультант

доктор технических наук
Машеков С.А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук
Абдуллаев Ф.С.

доктор технических наук
Янюшкин А.С.

доктор технических наук
Феофилов Н.Д.

Ведущая организация: Карагандинский государственный технический университет

Защита состоится «26» декабря 2010г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д14.17.02 при Казахском национальном техническом университете им. К.И. Сатпаева по адресу: 050013, г.Алматы, ул.Сатпаева, 22^а, Институт машиностроения, МСК 7 ауд.

Факс 8(7272)92-60-25, т.р.92-09-01. E-mail@ntu.kz

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казахского национального технического университета имени К.И. Сатпаева.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2010года

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
доктор технических наук

Б.Т. Сазамбаева

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Развитие машиностроения и вывод его на принципиально новые ресурсосберегающие технологии, повышение производительности труда и качества продукции основываются на применении в технологическом процессе новых инструментов, к числу которых относятся инструменты, применяемые в одном из видов обработки металлов давлением (ОМД) какковка.

В настоящее время внедрение достижений науки в производство затруднено в связи с недостатком инвестиций, жесткими требованиями и нестабильностью товарного рынка. Поэтому особенно актуальной становится задача создание методов проектирования ресурсосберегающих технологий и инструментов, обеспечивающих максимальную величину качества получаемых изделий и минимальную энергоемкость выполняемых операций.

Необходимо отметить, что расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) в условиях объемного деформирования позволяет точно прогнозировать не только качество, но и разрушение деформируемой заготовки. Имеющиеся в литературе работы позволяют определить НДС заготовки при выполнении технологической операции, но в силу принятых значительных упрощающих допущений в технологических операциях обычно решается плоская задача, что не позволяет определить рациональные параметры технологических процессовковки. Поэтому разработка новых методик решения объемной задачи и проведения измерения деформированного состояния образца при ковке является *актуальной*.

Однако, решение объемных задачковки требует развития эффективных прикладных теорий, численных методов их реализации и выбора рациональных технологических параметров процесса. Необходимо изучение деформационных свойств материалов в различных условиях, развитие экспериментальных методов, создание более полных и точных математических моделей процессов пластического формоизменения.

Особо важно подчеркнуть, что широкое внедрение процессовковки сдерживается недостаточной стойкостью инструмента, применяемой оснастки и элементов высокоэнергетического оборудования, что вызвано их работой в условиях, далеких от оптимальных. Это приводит к большим объемам экспериментальных и доводочных работ по корректировке технологииковки на этапе серийного производства.

Таким образом, **актуальной научной задачей** в области развития технологии и оборудования для машиностроения является повышение технологических возможностейковки и разработка новых инструментов для динамического деформирования различных заготовок, выявление особенностей их формоизменения, дальнейшее развитие методов проектирования операций и инструментовковки.

Одним из модельных представлений механики разрушения является вид зоны пластичности у вершины трещины нормального отрыва. Область пластичности в этом случае является продолжением трещины и имеет нулевую толщину. Классическое рассмотрение трещины нормального отрыва в виде математического разреза постулирует механизм пластического течения, при котором по берегам границы пластической зоны действуют напряжения, равные

пределу текучести. Данный подход по настоящее время является основной моделью при моделировании развития трещины в плоском напряженном состоянии.

Таким образом, разработка математической модели, позволяющей адекватно описывать форму и развитие пластической области, является достаточно *актуальной*.

Цель работы. Разработка новых методик расчета объемного напряженно-деформированного состояния и на основе этих исследований реализация новых технологических режимовковки и рациональной конструкции инструментов, обеспечивающих повышение качества поковок.

Научной задачей настоящей работы является:

- разработка конструкции инструментов с изменяющейся формой рабочей поверхности и определение рациональных размеров данного инструмента;

- на базе метода оптически чувствительных покрытий (ОЧП) разработка новой методики измерения деформированного состояния образца и расчета компонентов тензора напряжения и деформации объемного НДС, и на основе этих методик изучение закономерностей распределения НДС при ковке поковок в инструменте с изменяющейся формой рабочей поверхности;

- на базе метода координатной сетки разработка новой методики расчета компонентов тензора деформации объемного деформированного состояния, и на основе этой методики изучение закономерностей распределения степени деформации сдвига при ковке поковок в инструменте с изменяющейся формой рабочей поверхности;

- определение НДС заготовки, температурного поля и энергосиловых параметров при протяжке в инструменте с изменяющейся формой рабочей поверхности, а также в инструменте с цилиндрической рабочей формой, плоских, комбинированных бойках и на радиально-ковочной машине (РКМ) численным моделированием методом конечных элементов;

- разработка математической модели процессаковки в бойках с изменяющейся формой рабочей поверхности, плоских, комбинированных бойках и на радиально-ковочной машине (РКМ);

- выявление закономерности формирования структуры металлов при различных видах деформации, температуры и времени последеформационной выдержки;

- разработка новой методики расчета степени выносливости материала усталостному разрушению (СВМУР) и построения диаграмм усталостного разрушения;

- экспериментальные исследования физико-химических и механических свойств материала бойков новой конструкции в процессе их эксплуатации;

- изучение закономерности влияния деформационных режимовковки на изменение структуры сталей и сплавов.

Научная новизна работы. В работе представлены результаты решения проблемы по совершенствованию технологии производства кованых и штампованных изделий, позволяющие повысить качество продукции. При этом:

- на базе метода ОЧП разработана новая методика измерения деформированного состояния образца и расчета компонентов тензора напряжения и деформации объемного НДС и на основе этих методик определены рациональные

закономерности распределения НДС при ковке поковок в инструменте с изменяющейся формой рабочей поверхности, обеспечивающих повышение качества поковок;

- на базе метода координатной сетки разработана новая методика расчета компонентов тензора деформации объемного деформированного состояния и на основе этой методики определены рациональные закономерности распределения степени деформации сдвига при ковке поковок в инструменте с изменяющейся формой рабочей поверхности, обеспечивающих повышение качества поковок;

- разработана методика определения размеров инструмента с изменяющейся формой рабочей поверхности, позволяющая установить рациональную форму и размеры поперечного сечения данного инструмента;

- методом конечных элементов получены количественные данные и установлены основные закономерности распределения НДС, температуры и энергосиловых параметров при моделированииковки в бойках с изменяющейся формой рабочей поверхности, а также в инструменте с цилиндрической рабочей формой, плоских, комбинированных бойках и на РКМ;

- разработана плоская и объемная математическая модель процессаковки в бойках с изменяющейся формой рабочей поверхности, а также объемная математическая модель процессаковки в плоских, комбинированных бойках и на РКМ, позволяющие прогнозировать качество в получаемых поковках;

- выявлены закономерности формирования структуры металлов при различных видах деформации, температуры и времени последеформационной выдержки;

- выявлены закономерности влияния знакопеременной упругой деформации и температуры деформируемого металла на изменение структуры и свойств инструментальной стали;

- разработана новая методика расчета СВМУР и построения диаграмм усталостного разрушения;

- выявлены закономерности влияния деформационных режимовковки в инструменте с изменяющейся формой и комбинированного способа на изменение структуры стали и сплавов.

Методика исследований базируется на использовании теории напряженно-деформированного состояния, конечно-элементном моделировании процессовковки. Для построения математических моделей и теоретического расчета использованы программные комплексы MSC.SuperForge.

Объектами исследования являются технологияковки стали, инструменты с изменяющейся формой, цилиндрической рабочей формой, плоские, комбинированные бойки и РКМ, а также образцы, деформированные в данных инструментах.

Для определения компонентов тензора деформации использовали метод координатных сеток и линий скольжения. Металлографический анализ был проведен на оптическом микроскопе «Axiovert-200 MAT» с увеличениями 200, 500 и 1000 крат. Обработка изображений производилась по программе ВидеоТест «Металл 1.0», а также с использованием энергодисперсного спектрометра JNCA ENERGY (Англия), установленного на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL (Джеол).

Экспериментальные исследования проводили на базе оборудования лабораторий ПГУ имени С. Торайгырова, Павлодарских филиалов ТОО «Кастинг» и «KSP Steel».

Практическая ценность работы заключается в том, что на основе проведенных исследований разработаны новые бойки с изменяющейся формой рабочей поверхности и инструмент с цилиндрической рабочей формой. При этом путем использования инструмента с изменяющейся формой рабочей поверхности, а также плоских, комбинированных бойков и РКМ усовершенствованы режимыковки поковок из сталей и сплавов, способствующие получению поковок требуемой формы с минимумом дефектов и стабильным уровнем механических свойств.

Положения, выносимые на защиту:

- новая методика измерения деформированного состояния образца, расчета компонентов тензора напряжения и деформации объемного НДС и рациональные закономерности распределения НДС при ковке поковок в инструменте с изменяющейся формой рабочей поверхности, разработанная на базе метода ОЧП;

- новая методика расчета компонентов тензора деформации объемного деформированного состояния и рациональные закономерности распределения степени деформации сдвига при ковке поковок в инструменте с изменяющейся формой рабочей поверхности, обеспечивающих повышение качества поковок, разработанная на базе метода «координатная сетка»;

- методика определения размеров инструмента с изменяющейся формой рабочей поверхности, позволяющая установить рациональную форму и размеры поперечного сечения данного инструмента;

- количественные данные и основные закономерности распределения НДС, температуры и энергосиловых параметров при моделированииковки в бойках с изменяющейся формой рабочей поверхности, а также в инструменте с цилиндрической рабочей формой, плоских, комбинированных бойках и на РКМ;

- плоская и объемная математическая модель процессаковки в бойках с изменяющейся формой рабочей поверхности, а также объемная математическая модель процессаковки в плоских, комбинированных бойках и на РКМ;

- закономерности формирования структуры металлов при различных видах деформации, температуры и времени последеформационной выдержки;

- закономерности влияния знакопеременной упругой деформации и температуры деформируемого металла на изменение структуры и свойств инструментальной стали;

- новая методика расчета СВМУР и построения диаграмм усталостного разрушения;

- закономерности влияния деформационных режимовковки в инструменте с изменяющейся формой и комбинированного способа на изменение структуры стали и сплавов.

Достоверность научных результатов. В ходе экспериментального исследования были использованы научно-обоснованная методика проведения эксперимента и обработки полученных данных, проверенное лабораторное оборудование и контрольно-измерительные приборы.

Достоверность результатов теоретических расчетов достигается обоснованным использованием теоретических зависимостей, допущений и ограничений, корректностью постановки задачи математического моделирования, а также применением современных математических методов и средств вычислительной техники, и подтверждена качественным и количественным их согласованием с данными эксперимента при погрешности в пределах 10%.

Апробация практических результатов. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на: первой Международной научно-практической конференции «Первые Ержановские чтения» (Павлодар, 2004г.), на Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы механики и машиностроения» (Алматы, 2005г.), на международной научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития механики и машиностроения в Казахстане» (Алматы, 2007г.); на международной научно-практической конференции: «Проблемы и перспективы развития нефтяной промышленности Казахстана» (Алматы, КазНТУ, 2005г.); десятой Российской конференции пользователей систем MSC Software «MSC.Software: комплексные технологии виртуальной разработки изделий. Опыт применения на предприятиях СНГ и стран Балтии» (Москва, 2007г.); на международной научной конференции «Состояние и перспективы развития машиностроения в Казахстане» (Алматы, 2007г.); «Проблемы инновационного развития нефтегазовой индустрии» (г. Алматы, КБТУ, 2008, 2009, 2010 гг.); на расширенных заседаниях кафедры металлургии, на совместных научных семинарах факультета металлургии, машиностроения и транспорта ПГУ им.С.Торайгырова, 2009-2010; на совместных научных семинарах кафедр «Стандартизация, сертификация и технология машиностроения», «Металлургические машины и оборудование» и «Станкостроение, материаловедение и технология машиностроительного производства» КазНТУ им. К.И.Сатпаева, 2010, Алматы.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 46 научных трудах, среди них 1 монография, 21 статья в периодических изданиях, перечень которых утвержден Комитетом по контролю в сфере образования и науки, и 13 докладов на международных научно-технических конференциях, а также в 12 изобретениях и предварительных патентах Республики Казахстан.

Личный вклад автора. Основные результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично, анализ полученных данных проведен самостоятельно с учетом имеющихся в отечественной и зарубежной литературе сведений.

Связь темы с планом научных работ. Работа выполнена в рамках государственной тематики в соответствии с координационным планом научно-исследовательских работ Павлодарского государственного университета имени С. Торайгырова.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения и списка использованных источников, включающего 222 наименования. Объем диссертации – 250 страниц машинописного текста, 219 формул, 38 таблиц, 157 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблем и новизна темы диссертации, сформулирована цель работы, поставлены задачи исследования и изложены положения, выносимые к защите.

В первой главе показан обзор работ, посвященных исследованиюковки стали и сплавов. Из приведенных в литературном обзоре данных видно, что в настоящее время ведутся многочисленные исследования в направлении создания новых способовковки и конструкций инструмента. Однако все же большая часть их не находят широкого применения. Это объясняется многими причинами, в частности: сложностью изготовления многих инструментов; трудностью установки его на оборудовании; высокими затратами на изготовление; невысокой производительностью; узким профилем специализации многих инструментов и т.д.

Анализ работ по исследованию технологииковки показывает, что улучшению качества получаемых поковок способствует благоприятная схема напряженно-деформированного состояния, что приводит к получению однородной структуры металла, т.е. проработке первоначальной литой структуры в мелкозернистую структуру. Улучшить напряженно-деформированное состояние возможно: путем совершенствования конфигурации инструмента; выбором оптимального режима деформации и нагрева; правильно выбранным способомковки и т.д.

Во второй главе для улучшения напряженно-деформированного состояния при ковке металлов предлагается серия конструкций новых инструментов с изменяющейся рабочей поверхностью, и раскрываются проблемы создания рациональной конструкции данных инструментов и пути их решения.

В данной главе проблему проектирования предлагаемых инструментов с изменяющейся формой решили путем крепления к бойкам криволинейно-выпуклого элемента, состоящего из нескольких листов. При этом листы должны иметь таврообразное сечение с параболическими кромками в средней части криволинейно-выпуклого элемента и трапециевидное – на концевых участках. Переход от сечения в средней части криволинейно-выпуклого элемента к концам – плавный. Такая форма сечения обеспечивает значительное расширение технических возможностей инструмента по сравнению с листом прямоугольного сечения: во – первых, за счет смещения нейтральной оси сечения и обеспечения наиболее рациональной формы в средней части криволинейно-выпуклого элемента, подверженной воздействию максимального момента и температуры при горячей ковке; во-вторых, за счет уменьшения толщины сечения к концам криволинейно-выпуклого листа.

Во второй главе приведена методика определения рациональных размеров криволинейно-выпуклой рабочей формы инструмента для деформирования металлов и сплавов. По данной методике текущее значение площади поперечного сечения рассматриваемого криволинейно-выпуклого листа предложили определить по формуле

$$F_T = K_F bH, \quad (1)$$

где b - ширина криволинейного листа; H – толщина криволинейного листа в произвольном участке таврообразного сечения; K_F – относительный коэффициент площади таврообразного сечения, который определяется по формуле:

$$K_F = \frac{h}{H} \left[1 + \frac{b_1}{b_o} \left(\frac{H}{h} - 1 \right) + \frac{h}{b_o} \left(\frac{H}{h} - 1 \right)^2 \operatorname{tg} \alpha_1 - \frac{h}{b_o} \left(1 - \frac{a}{h} \right)^2 \operatorname{tg} \alpha_o \right], \quad (2)$$

где b_1 - внешняя ширина криволинейного инструмента; b_o - внутренняя ширина криволинейного элемента; H/h - относительная толщина таврообразного сечения листа; h_1 - толщина крайних участков листа; α_o, α_1 - углы наклона боковой поверхности таврообразного сечения; a - толщина прямоугольного участка таврообразного сечения.

Максимальную толщину сечения криволинейно-выпуклого листа в середине инструмента находили из выражения

$$H_{\max} = \sqrt{\frac{3P_{e.e.} L_H}{2K_w b_o [\sigma]}} \quad (3)$$

где $P_{e.e.}$ - усилие, необходимое для начала упругой деформации одного криволинейного листа; L_H - длина рабочей поверхности; $[\sigma]$ - допускаемое напряжение растяжения; K_w - коэффициент момента сопротивления таврообразного сечения в уравнении с прямоугольным сечением листа равной толщины.

Закономерность изменения толщины криволинейно-выпуклого листа по длине, при которой инструмент является балкой равного сопротивления, определяется по формуле

$$H_w = H_{\max} = \sqrt{\frac{2K_{wi} L_i}{K_w L_H} \Delta L}, \quad (4)$$

где L_i - длина рабочей поверхности до расчетной толщины; ΔL - относительная длина; определяется отношением длины участка к половине расчетной длины инструмента.

Анализируя зависимость (4) пришли к мнению, что перепад толщины сечений по длине криволинейно-выпуклого листа в 2 - 2,2 раза, следует считать наиболее целесообразным, так как дальнейшее утончение концевых участков приводит к снижению жесткости криволинейно-выпуклого листа.

В главе 2 разработана методика определения усилия деформирования при ковке в инструменте с изменяющейся формой. По данной методике рекомендовано усилие, необходимое для начала упругой деформации криволинейно-выпуклого элемента бойка определять по формуле:

$$P_{e.e.} = - \frac{4oA(h_1 b_1 + (H_o - h_1) b_o^3)}{L_H^3}, \quad (5)$$

где y - прогиб криволинейно-выпуклого листа; E - модуль продольной упругости материала криволинейного листа.

Необходимое количество криволинейно-выпуклых листов предложено определять, используя выражение:

$$n = P_{II} / P_{e.e.}, \quad (6)$$

где P_{II} - усилие оборудования, необходимое дляковки того или иного металла или сплава.

При определении рациональной конструкции предлагаемых инструментов с изменяющейся рабочей поверхностью необходимо было решить, какие виды деформации предпочтительно развивать в очаге деформации при ковке в дан-

ном инструменте. Поэтому во второй главе исследованы закономерности изменения структуры при различных видах нагружения. Исследование влияния различных видов деформаций на структуру металла проводили, используя образцы из сплава ВТ1-0, т.к. он является наиболее чувствительным металлом на деформацию, температуру и последеформационную выдержку. Образцы были изготовлены из листа толщиной 5 мм. Для получения крупнозернистой структуры образцы отжигали при температуре 800 °С в защитной атмосфере (95% N₂, 5% H₂) в течение 2 ч.

Для исследования влияния линейного растяжения и макросдвига на структуру сплава ВТ1-0 использовали стандартные и специальные образцы. Растяжение данного образца приводит к развитию в поверхностных слоях металла крутящего момента, который способствует появлению сдвигающих деформаций. При этом схема напряженного состояния соответствует кручению, то есть показатель напряженного состояния за весь период испытания остается постоянным и равным нулю.

Изготовленные образцы с хорошо отполированной поверхностью испытывали при температурах 700, 800, 900, 1000 °С на установке ИМАШ-20-78 при скорости перемещения захватов 15 мм/мин, позволяющей с помощью высокотемпературного микроскопа МВТ-71 с максимальным увеличением ×410 непосредственно наблюдать, фотографировать микроструктуру металла в вакууме 6,6·10⁻⁴ МПа.

Степень деформации сдвига при растяжении стандартных образцов подсчитывали по известной формуле, а при испытании на макросдвиг – определяли измерением углов наклона риски, нанесенной на поверхность образца новой конструкции, в процессе растяжения и подсчитывали по известной формуле:

$$\Lambda = \operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_0, \quad (7)$$

где φ_0 и φ_1 – углы наклона риска, нанесенные на поверхность образца, к образующей до испытания и после него.

В центральной части стандартного и специального образца производили фотографирования структуры следующих моментов: исходной (при комнатной температуре); перед деформацией (при температуре испытания); во время деформации; после деформации (при температуре испытания с определенным временем выдержки).

Проведенные исследования показали, что структура металла образцов из сплава ВТ1-0, деформированных растяжением при температуре 700 °С, вытянута в направлении течения металла. При этом величина средних размеров зерен образцов равняется 78,8 мкм, 92,6 мкм, 72,4 мкм и 59,35 мкм при степенях деформации сдвига 0,015; 0,05; 0,08 и 0,11 соответственно. Повышение температуры до 1000 °С образцов деформированных при 700 °С, способствует прохождению первичной рекристаллизации и получению мелкозернистой структуры (средний размер зерен $\bar{D}=32,6$ мкм).

Аналогичные изменения в структуре металла наблюдались и при проведении испытания на растяжение при 800 °С. Величина средних размеров зерен образцов равняется 63,25 мкм, 72 мкм, 68,94 мкм и 62,5 мкм при степенях деформации сдвига 0,015; 0,065; 0,12 и 0,17, соответственно. Повышение температуры до 1000 °С образцов деформированных при 800 °С также способствова-

ло прохождению первичной рекристаллизации и получению мелкозернистой структуры (средний размер зерна $\bar{D} = 34,7$ мкм).

Далее исследования показали, что существенное влияние на размер зерен оказывает температура нагрева. Так при температурах 900 и 1000 °С с увеличением степени деформации сдвига изменяются размеры и формы исходных β -зерен, которые сплющиваются, вытягиваются вдоль направления течения металла, приобретая эллипсоидообразную форму. При этом величина средних размеров зерен образцов равняется: 66,2 мкм, 62,4 мкм, 72,8 мкм и 112,6 мкм (900 °С); 73,6 мкм, 122,4 мкм, 132,3 мкм и 142,2 мкм (1000 °С) при степенях деформации сдвига 0,01; 0,08; 0,14 и 0,2, соответственно. После деформационная выдержка в течение 30-40 мин. приводит к прохождению первичной рекристаллизации, и средний размер зерен уменьшается до 28,6 мкм (900 °С) и 24,7 мкм (1000 °С).

Анализ результатов исследования структуры металла, проведенного на образцах специальной конструкции, показал, что обработка металлов в условиях развития сдвиговых деформаций по сечению заготовки вызывает интенсивное уменьшение размеров зерен.

Так, сравнение исследования на сдвиг и растяжение, проведенного при температуре 700 и 800 °С, показали, что величины средних размеров зерен, которые получаются при растяжении со степенью деформации сдвига $\Lambda = 0,11 - 0,17$ при сдвиге можно достичь при величине $\Lambda = 0,07 - 0,1$. При этом повышение температуры до 1000 °С образцов, деформированных при 700 и 800 °С, приводит к первичной рекристаллизации (средний размер зерен $\bar{D} = 21,7$ мкм (700 °С) и $\bar{D} = 26,9$ мкм (800 °С)).

Необходимо отметить, что с повышением температуры деформации при сдвиге до 900 и 1000 °С существенную роль в формировании структуры начинают играть температура, степень деформации сдвига и последеформационная выдержка. Так, растяжение специального образца при выше указанных температурах со степенью деформации сдвига $\Lambda = 0,15 - 0,2$ и выдержка в течение 5 – 15 мин приводит к прохождению рекристаллизации и формированию мелкозернистой структуры (средний размер зерен $\bar{D} = 22,8$ мкм (900 °С) и $\bar{D} = 16,4$ мкм (1000 °С)).

В исследованном титановом сплаве, деформированном в β -области, новые зерна при рекристаллизации зарождаются лишь в приграничных объемах деформированных зерен до соприкосновения с зернами, растущими от противоположащих границ деформированных зерен.

При такой схеме изменения зеренной структуры в момент достижения полной рекристаллизации (τ^{100}) размер рекристаллизованного зерна (D_p^{100}) определяется соотношением:

$$D_p^{100} = d_{\text{исх}}(0,5 - \Lambda), \quad (8)$$

т.е. зависит только от размера зерна в исходной структуре ($D_{\text{исх}}$) и степени деформации сдвига (Λ).

Однако необходимо отметить, что первичная рекристаллизация при макросдвиге достигается при меньшем значении Λ по сравнению с одноосным растяжением.

Все перечисленные выше параметры обработки воздействуют на величину τ^{100} , которая и определяет структуру деформированного металла после выдержки. Так, при времени выдержки после деформации τ меньше τ^{100} , структура ме-

талла соответствует стадии частичной рекристаллизации, т.е. является неоднородной, размер рекристаллизованных зерен не превышает D_p^{100} , при этом зеренная структура металла зависит фактически от величины исходного β - зерна.

Структура металла при условии $\tau = \tau^{100}$ соответствует самому мелкозернистому при данных условиях деформации состоянию с однородным рекристаллизованным зерном, размер которого находят из соотношения (8).

При $\tau > \tau^{100}$ металл полностью рекристаллизован, величина зерна $D_p > D_p^{100}$, причем, если $\tau \gg \tau^{100}$, рекристаллизованное зерно может быть крупнее исходного, т.е. эффект измельчения структуры при деформации может отсутствовать.

Результаты проведенного исследования показали, что τ^{100} после растяжения специального образца по величине является меньшим по сравнению с растяжением стандартного образца.

Установили, что для наиболее интенсивного измельчения исходных β - зерен деформацию целесообразно вести в условиях интенсивного развития сдвиговых деформаций и по таким температурно-временным режимам, при которых полностью проходит первичная рекристаллизация.

В диссертационной работе задача определения НДС при ковке в инструменте с изменяющейся рабочей поверхностью была решена теоретическим и экспериментальным путем. Поэтому в главе 3 предлагается методика выбора материала для моделирования деформируемости стали и сплавов в технологических процессахковки.

Для проверки пригодности использования свинцово-сурьмянистых (Pb + 3%Sb) сплавов и пластопарафина для моделирования процессаковки, были проведены опыты по моделированию формоизменения при осадке. Процесс осадки изучали на цилиндрических образцах размером $O50 \times 100$ мм из сурьмянистого свинца, пластопарафина, алюминиевого сплава D16, титанового сплава BT3-1 и стали СтЗсп.

Базовым объектом для исследований являлся пластопарафин, по сути представляющий механическую смесь пластилина с техническим парафином, добавки которого составляло 10 – 15 вес.% с целью придания жидкотекучести пластилину в расплавленном состоянии.

Напряженно-деформированное состояние изучали на свободной поверхности в горизонтальной плоскости симметрии осаживаемого образца. Для изучения НДС на боковую свободную поверхность в горизонтальную плоскость симметрии осаживаемого образца были нанесены две параллельные риски. Расстояние между рисками O_j , диаметр образца D_j и высоту H_j измеряли 4 раза на инструментальном микроскопе МПБ-2 с точностью измерения $\pm 0,01$ мм до деформации и для 8 – 12 стадий обжатия испытываемого образца.

Локальные значения главных компонентов тензора деформации $\bar{\varepsilon}_o$ ($m = 1, 2, 3$ или ρ, θ, z) определяется экспериментально измеренными длинами материальных волокон O_i и O_j и диаметров D_i и D_j до и после деформации, используя формулу

$$\bar{\varepsilon}_{z_i} = \ln \frac{T_j}{T_0}; \bar{\varepsilon}_{\theta_i} = \ln \frac{D_j}{D_0}; \bar{\varepsilon}_{\rho} = -(\bar{\varepsilon}_z + \bar{\varepsilon}_{\theta}). \quad (9)$$

В работе процесс деформирования исследовали во времени, а функции $\bar{\varepsilon}_m(\tau)$ аппроксимировали степенными полиномами и сплайнами для сглаживания и дифференцирования по времени экспериментально получаемых величин.

Для определения локальных значений скоростей деформации ξ_o , коэффициента жесткости схемы деформации k_ξ , интенсивности логарифмической деформации \bar{A} и скоростей деформации сдвига I , а также степени деформации сдвига Λ использовали следующие формулы

$$\bar{\xi}_m = \frac{d\varepsilon_m^{(a)}}{d\tau} = \frac{V_0}{H_0} \frac{d\varepsilon_m^{(a)}}{d\varepsilon}; \quad (10)$$

$$k_\varepsilon = \frac{\sigma}{T} = -\frac{2 \cdot \bar{\varepsilon}_\rho}{\bar{A}}; \quad (\text{по деформационной теории})$$

$$k_\xi = \frac{\sigma}{T} = -\frac{2 \cdot \bar{\xi}_\rho}{H}; \quad (\text{по теории течения})$$

$$\bar{\Gamma} = 2\sqrt{\varepsilon_{\theta i}^{(a)2} + \varepsilon_{\theta i}^{(a)} \cdot \varepsilon_{Zi}^{(a)} + \varepsilon_{Zi}^{(a)2}}; \quad (11)$$

$$H = 2\sqrt{\bar{\xi}_\theta^2 + \bar{\xi}_\theta \bar{\xi}_z + \bar{\xi}_z^2}; \quad (12)$$

$$\Lambda = \int H d\tau. \quad (13)$$

где V_0/H_0 – константа опыта; $\varepsilon = \Delta H/H_0$ – относительное обжатие цилиндра начальной высоты H_0 со скоростью V_0 ; τ – время.

В результате проведенных исследований предложены аналитические соотношения, позволяющие с достаточной для практических расчетов точностью представить экспериментальные данные по НДС на свободной поверхности при осадке в виде аппроксимирующих формул. Так, результаты расчета по распределению \bar{A} , I , Λ , k_ξ , в зависимости от размеров и формы осаживаемого образца, аппроксимировали следующим соотношением

$$Y = a + b \ln R, \quad (14)$$

где a , b – параметры аппроксимации; R – радиус кривизны бочки осаживаемого образца.

Параметры эмпирической формулы находили с использованием метода наименьших квадратов. Отклонение расчетных значений от экспериментальных не превышает 3 – 5%. Константы аппроксимации результатов экспериментов при помощи соотношения (14) приведены в диссертации.

Сравнение коэффициентов показывает, что по константам аппроксимации сталь СтЗсп, титановый сплав ВТЗ-1 и пластопарафин следует считать подобными при высоких температурах металлов. При этом на базе сравнения значения критериев подобия свинца и алюминиевого сплава D16 представляется возможным говорить об имеющемся сходстве свинца с сплавом D16.

Таким образом, на базе сопоставления характеристик НДС имеются все основания отнести пластопарафины к полезным аналогам широкого класса металлических сплавов для приближенного физического моделирования формоизменения и разрушения при ковке и других процессах ОМД.

В третьей главе диссертационной работы для определения компонентов тензора деформации был использован экспериментальный метод координатной сетки механики твердого деформируемого тела.

При проведении эксперимента в лабораторных условиях, для моделирования операции осадки в инструменте с изменяющейся рабочей поверхностью использовали бойки предложенной конфигурации, а так же приспособление, имеющее нижнюю и верхнюю плиты и набор сменных бойков, изготовленных в виде полушария или полуцилиндра и плоские бойки. При этом нижняя плита приспособления имела четыре направляющие, а верхняя плита – четыре отверстия для движения направляющих.

В качестве заготовки использовали цилиндрические образцы из сурьмянистого свинца, форма которых предложена нами, размером $O50 \times 100$ мм, $O40 \times 50$ мм и пластопарафина диаметром 55 мм и высотой 100 мм. Пластопарафиновый образец был составлен из 10 дисков, состоящих из колец различного цвета одинаковой высоты. При этом ширина колец на пластопарафиновых образцах была равна расстоянию между ними. Таким образом, обозначалась координатная сетка, позволяющая после разрезки деформированных образцов в диаметральной плоскости оценить картину течения металла в осевом и радиальном направлениях и подсчитать характеристики деформации в различных точках сечения заготовки.

Последовательность проведения эксперимента с использованием метода координатных сеток следующая. Исходные образцы деформировались с обжатиями 10, 20, 30, 40 и 50% в бойках предложенной конфигурации и плоских бойках. Деформированные координатные сетки измеряли на инструментальном микроскопе БМИ-1 с точностью $\pm 0,05$ мм.

По результатам измерения координат узловых точек в начале и в конце малой ступени деформации определяли три существенные составляющие тензора приращений степени деформации $T_{\Delta\epsilon}$ по известной методике.

Из сопоставленных результатов эксперимента было выявлено, что данные, полученные с использованием свинцово-сурьмянистых и пластопарафиновых образцов с погрешностью 5 – 10% совпадают.

Установлено, что осадка в инструменте с изменяющейся рабочей поверхностью оказывается эффективней осадки в плоских бойках, так как позволяет уменьшить неравномерность деформации по сечению заготовки. Кроме того, при осадке в данном инструменте по сечению заготовки помимо линейных деформаций развиваются интенсивные сдвиговые деформации, это дает возможность увеличивать суммарную деформацию и достаточно хорошо проработать структуру металла при осадке.

Использование для выполнения операции осадки инструмента с изменяющейся рабочей поверхностью может привести к нарушению сплошности металла на боковой свободной поверхности заготовки. В связи с этим в главе 3 было исследовано НДС на свободной поверхности в горизонтальной плоскости симметрии осаживаемого образца.

Напряженно-деформированное состояние на свободной поверхности в горизонтальной плоскости симметрии осаживаемого образца при осадке в плоских плитах и в инструменте с изменяющейся формой было изучено на цилиндрических образцах размером $\varnothing 50 \times 100$ мм по методике, приведенной выше.

Условия разрушения стали при осадке оценивали по степени использования ресурса пластичности (СИРП)

$$\Psi = \int_0^{\tau_p} \frac{H d\tau}{\overline{\Lambda}_p \cdot [k(\tau)]} \quad (15)$$

где $\overline{\Lambda}_p$ – математическое ожидание пластичности металла, зависящее от напряженного состояния; H – интенсивность скоростей деформации сдвига.

В главе 3 сравнивали результаты определения компонентов НДС методом аппроксимации степенными полиномами и кубическими сплайн-функциями.

Проведенный расчет напряженно-деформированного состояния на свободной поверхности образца при осадке показал, что наилучшие результаты получаются, если аппроксимировать функцию $\overline{\varepsilon}_o$ (ε) кубическим сплайном. При аппроксимации функции $\overline{\varepsilon}_o$ (ε) степенными полиномами точность результатов расчета зависит от степени полинома. Установлено, что оптимальным является полином пятой, шестой и седьмой степени.

Напряженно-деформированное состояние оценивали путем расчета коэффициентов жесткости схемы напряженного состояния k_ξ . Полученные результаты расчета показали, что при осадке в инструменте с изменяющейся рабочей поверхностью коэффициент k_ξ является сжимающим по сравнению с коэффициентом жесткости схемы напряженного состояния, которая получается при осадке в плоских бойках.

Величину деформации оценивали путем расчета интенсивности логарифмической деформации \overline{A} . Полученные результаты показали, что при осадке в инструменте с изменяющейся рабочей поверхностью величина \overline{A} намного больше по сравнению с осадкой в плоских бойках. Известно, что чем больше величина \overline{A} , тем лучше прорабатывается структура металла и тем качественнее получается изделие. Увеличение \overline{A} можно объяснить присутствием знакопеременной деформации на торцах заготовки в процессе осадки в инструменте с изменяющейся конфигурацией.

Полученные данные использовали для расчета СИРП стали и сплавов при осадке по формуле (15). Для определения Λ_p использовали известные данные. Результаты расчета СИРП при осадке в плоских бойках показали, что с вероятностью свыше 99,5% при температуре 1000°C возможно разрушение сплошности металла при единичном обжатии $\varepsilon = 0,8$.

Аналогичные расчеты СИРП произвели при осадке в бойках с изменяющейся рабочей поверхностью. Данные расчеты показали, что при осадке слитков разрушений сплошности нет до единичного обжатия $\varepsilon = 70\%$ с вероятностью 99,5%.

В главе 3 при изучении процесса протяжки в инструменте с изменяющейся формой рабочей поверхности, для проведения эксперимента в лабораторных условиях были изготовлены квадратные в сечении образцы из свинцово-сурьмянистого сплава и пластопарафина размером 50?50?140мм и бойки предложенной конфигурации. С целью изучения деформированного состояния в условиях плоской деформации на одну половину квадратных образцов была нанесена координатная сетка.

Изготовленные свинцово-сурьмянистые образцы деформировали в плоских бойках и в инструменте с изменяющейся рабочей поверхностью с единичным обжатием 5, 10, 15, 20, 25, 30%. После каждого обжатия измеряли деформиро-

ванные координатные сетки на инструментальном микроскопе БМИ-1 с точностью $\pm 0,01$ мм.

Обработку опытных данных, т.е. расчет компонентов тензора деформации и степени деформации сдвига производили с использованием известного алгоритма, для которого была составлена программа.

Результатами исследования установлено, что протяжка в инструменте с изменяющейся формой обеспечивает более равномерное распределение степени деформации сдвига. Все это, способствует измельчению структуры деформируемого металла, как в поверхностных, так и в центральных слоях заготовки, повышает качество получаемых поковок.

В третьей главе исследовали НДС заготовки при осадке и протяжке в инструменте с изменяющейся рабочей формой. Для моделирования НДС применили программный продукт конечно-элементного анализа MSC.SuperForge, специализированный для расчета процессов обработки металлов давлением.

Поковку представили в виде цилиндра с размерами $O30*60$ мм (для осадки) и $O50*100$ мм (для протяжки). В качестве материала заготовки выбрали свинец с температурным диапазоном деформирования $22 - 300^{\circ}\text{C}$ и с механическими свойствами: модуль упругости 14ГПа , коэффициент Пуассона $0,3$ и плотность 11300кг/м^3 . Для моделирования пластичности материала заготовки была выбрана упругопластическая модель Джонсона-Кука. Радиус кривизны криволинейной рабочей формы инструмента составляет 90мм , коэффициент трения между инструментом и заготовкой был принят $0,3$. Ковка проходит при изотермическом температурном режиме, начальную температуру инструмента и заготовки принимаем равной 20°C .

Трехмерная геометрическая модель инструмента была построена в САД программе Inventor, и импортирована в САЕ программу MSC.SuperForge. В силу симметрии заготовки и ковочного блока рассматривается $1/4$ их часть.

Осадку и протяжку заготовки в инструменте с изменяющейся формой осуществлялись на гидравлическом прессе со скоростью $1,5*10^{-3}$ м/сек с абсолютным обжатием 5мм .

На основе полученных результатов численного моделирования установлено, что:

- в начальный момент осадки и протяжки интенсивные напряжения и деформации локализуются в контактных зонах заготовки с инструментом;
- увеличение единичного обжатия приводит к переносу акцента интенсивности напряжений и деформаций от контактной поверхности к центру и периферии заготовки;
- в процессе осадки и протяжки в зонах локализации деформации повышается температура;
- с увеличением единичного обжатия максимальная величина контактного давления переносится от оси к периферии заготовки;
- характер скорости течения металла аналогичен развитию интенсивности деформации во времени;
- при осадке и протяжке в инструменте с изменяющейся формой приращение степени деформации сдвига распределяется равномерно по сечению осаживаемой или протягиваемой заготовки.

Известно, что достоверность результатов теоретических исследований под-

тверждается обоснованным использованием фундаментальных зависимостей, допущений и ограничений, корректностью постановки задачи математического моделирования, применением современных математических методов и средств вычислительной техники.

При качественном и количественном совпадении теоретических результатов с данными экспериментальных исследований, проведенных в широком диапазоне изменений технологических режимов исследуемого процесса, еще больше доказывается достоверность полученных результатов. С целью более полного доказательства достоверности полученных результатов провели эксперименты в лабораторных условиях.

При проведении эксперимента из свинцовосурьмянистого сплава было изготовлено двенадцать квадратных в сечении образцов размером $50 \times 50 \times 140$ мм и бойки с изменяющейся формой. С целью исследования деформированного состояния образцы имели продольную плоскость разреза на оси симметрии образца. На поверхности среза наносилась координатная сетка с шагом $h = 4$ мм, после чего две части образцов соединялись сплавом Вуда.

Последовательность проведения эксперимента с использованием метода координатных сеток следующая. Исходные образцы деформировали на прессе в конструкции, позволяющей производить протяжку в бойках с изменяющейся формой, со скоростью деформирования $\dot{\epsilon} = 1,75$ мм/с и обжатием $\Delta\epsilon = 3\%$. При этом после каждого обжатия образцы разъединяли на две части и измеряли деформированные координатные сетки на инструментальном микроскопе УИМ-23 с точностью $\pm 0,01$ мм. Эксперименты проводили трижды.

Начальные координаты узловых точек прямоугольной решетки, нанесенной в плоскостях симметрии, обозначены через X_{oij} , Y_{oij} , а координаты материальной точки после каждого этапа деформирования – X_{ij} , Y_{ij} ; тогда перемещение определится как:

$$\begin{cases} U_{x_{ij}} = X_{ij} - X_{oij}; \\ U_{y_{ij}} = Y_{ij} - Y_{oij}. \end{cases} \quad (16)$$

Определение поля перемещения в третьем направлении, перпендикулярной плоскости XOY, вытекает из условия постоянства объема, из которого следует, что перемещение по нормали можно определить по относительному изменению площади ячейки при переходе ее из положения $N-1$ в N -ое. На основе этого условия были определены координаты материальных точек в направлении оси Z, при этом из-за малости обжатия принято, что куб размером $4 \times 4 \times 4$ превращается в параллелепипед с соответствующими в результате деформации размерами.

На основе простых алгебраических соотношений для четырехугольной сетки (ячейки) ABCD возможно определить размеры ячейки и его площадь, следующим образом: $\Delta x_{ij} = x_{Aij} - x_{Bij}$, $\Delta y_{ij} = y_{Aij} - y_{Bij}$, $S_{ij} = \Delta x_{ij} \cdot \Delta y_{ij}$. Относительное перемещение z_{ij} определяется из условия постоянства объема: $z_{ij} = V_{oij} / S_{ij}$.

Тогда перемещения в направлении оси z равно: $U_{z_{ij}} = z_{ij} - z_{oij}$.

После расчета размеров каждой рядом стоящей ячейки координаты стыкующихся точек были просуммированы и разделены на их количество.

Анализ перемещений опытных точек позволил сделать вывод, что функции перемещений U_x , U_y и U_z могут быть достаточно хорошо аппроксимированы степенными рядами по координатам X , Y и Z следующим образом:

$$\begin{cases} U_x(x, y, z, e) = \sum_{m=0}^m \sum_{n=0}^n \sum_{k=0}^k \sum_{l=0}^l a_{mnlk} \cdot X^m \cdot Y^n \cdot Z^k \cdot e^l \\ U_y(x, y, z, e) = \sum_{m=0}^m \sum_{n=0}^n \sum_{k=0}^k \sum_{l=0}^l a_{mnlk} \cdot X^m \cdot Y^n \cdot Z^k \cdot e^l \\ U_z(x, y, z, e) = \sum_{m=0}^m \sum_{n=0}^n \sum_{k=0}^k \sum_{l=0}^l a_{mnlk} \cdot X^m \cdot Y^n \cdot Z^k \cdot e^l \end{cases} \quad (17)$$

С помощью метода наименьших квадратов, который минимизирует сумму квадратов отклонений измеренных значений U_x , U_y и U_z от расчетных функций, получена система линейных уравнений.

Расчетами установили, что наименьшая степень полинома, удовлетворяющая критерию Фишера, равна 6, т.е. полиномы от 1 до 5-ой степени не отвечают достаточно точно (с 5% уровнем значимости) картине пластического деформирования металла.

Поля перемещений определены по экспериментальным данным для симметричного поперечного сечения исследуемого технологического процесса. При этом точка деформированного тела за один шаг деформации получит приращение перемещений:

$$\begin{cases} \Delta U_{x_i} = U_{x_i}(x_i, y_i, z_i, e_i) - U_{x_{i-1}}(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}, e_{i-1}) \\ \Delta U_{y_i} = U_{y_i}(x_i, y_i, z_i, e_i) - U_{y_{i-1}}(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}, e_{i-1}) \\ \Delta U_{z_i} = U_{z_i}(x_i, y_i, z_i, e_i) - U_{z_{i-1}}(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}, e_{i-1}) \end{cases} \quad (18)$$

Используя полученные результаты, рассчитали приращение степени деформации сдвига для объемного течения металла. Для обработки результатов эксперимента была составлена программа в MATLAB.

Результаты расчетов показали, что данные теоретических и экспериментальных исследований качественно и количественно совпадают.

В данной главе диссертационной работы методом линий скольжения, исходя из экспериментально установленных граничных условий, было определено объемное напряженное состояние при протяжке в инструменте с изменяющейся формой.

Итак, если подвести черту под вышеизложенным, то правомерно будет отметить, что протяжка в инструменте с изменяющейся формой обеспечивает более равномерное распределение степени деформации сдвига. Все это, способствуя измельчению структуры деформируемого металла, как в поверхностных, так и в центральных слоях заготовки, повышает качество получаемых поковок.

В четвертой главе разработаны математические модели процесса протяжки заготовки при деформировании в инструменте с изменяющейся формой.

После проведения экспериментов перемещение материальных точек в трех направлениях координатной оси определяли по методике, описанной выше. Перемещения U_x , U_y и U_z , аппроксимировали степенными рядами по координатам x , y и z . Далее, с помощью метода наименьших квадратов, который мини-

мизирует сумму квадратов отклонений измеренных значений U_x , U_y и U_z от расчетных функций, получили систему линейных уравнений.

Принимая предположение, что деформация между рассматриваемыми обжатиями мала, определили компоненты тензора малой деформации и интенсивность деформации сдвига по известной формуле.

После расчета интенсивности логарифмической деформации $\bar{\Gamma}_i$ функцию $\bar{A}_i\left(\frac{h}{H_o}\right)$ аппроксимировали степенными полиномами (h – расстояние до исследуемой точки по высоте очага деформации; H_o – высота очага деформации).

Для включения в полученную математическую модель зависимости $\bar{\Gamma}_i$ от l/l_o и единичного обжатия ε провели аппроксимацию коэффициентов $a_{i(h/H_o)}$ от $a_{i(l/l_o)}$ и $a_{i(\varepsilon)}$ от ε .

Точность и адекватность полученной зависимости проверили с помощью F -критерия (критерия Фишера). Расчетom установлено, что значение F -критерия меньше табличного, что доказывает пригодность полученной математической модели для практического применения.

При анализе полученных экспериментальных зависимостей было установлено, что перемещения точек представляют собой линейные функции от величины обжатий на каждом этапе деформирования, что позволило принять для дальнейших расчетов допущение о том, что величину степени деформации сдвига Λ можно определить как сумму интенсивности деформации сдвига.

В окончательном виде математические модели распределения Λ_i по сечению заготовки при протяжке в инструменте с изменяющейся формой записали в виде сложной функции

$$\Lambda_i = \sum_{i=0}^4 \left(\sum_{j=0}^4 \left(\sum_{k=0}^4 a_{ek} \varepsilon^k \right) \left(\frac{h}{H_o} \right)^j \right)_i \left(\frac{l}{l_o} \right)^i. \quad (19)$$

$$\Lambda_0 = \sum_{i=0}^4 \left(\sum_{j=0}^3 \left(\sum_{k=0}^2 a_{ek} \varepsilon^k \right) \left(\frac{r}{R} \right)^j \right)_i \varphi^i \quad (20)$$

Коэффициенты полученной модели приведены в диссертации.

На основе анализа результатов расчета установили, что

- при протяжке в плоских бойках степень деформации сдвига Λ локализуется в центральной зоне заготовки, при этом в поверхностном слое заготовки Λ имеет минимальную величину.

- при протяжке в инструменте с изменяющейся формой на начальном этапе обжатия Λ сосредотачивается на поверхностных слоях деформируемой заготовки, при этом с увеличением обжатия акцент Λ переносится с поверхностных слоев в центральную часть.

- ковка в инструменте с изменяющейся формой приводит к значительному развитию сдвиговой деформации по сечениям заготовки. В результате действия дополнительных сдвиговых деформаций с каждым обжатием возрастает интенсивность деформации сдвига и снижается неравномерность деформации.

- накопленная за один вынос деформация более равномерна при протяжке в вырезных бойках с изменяющейся формой. При этом деформация центральных слоев в 1,1 – 1,2 раза больше деформации поверхностной зоны;

- при протяжке в комбинированных и вырезных бойках с изменяющейся формой равномерность распределения Λ по периметру заготовки достигается за один оборот заготовки с углом кантовки 30° , 45° , 90° , $180-90-180^\circ$.

В главе 4 приводятся результатыковки, направленные на исследование влияния технологических параметров осадки в бойках с изменяющейся формой на структуру и свойства стали 08кп.

Для исследования влияния технологических параметров осадки на структуру и свойства стали 08кп в промышленных условиях провели серию экспериментов, используя заготовки $O150 \times 300$ мм. Данные заготовки предварительно отжигали в электрической печи типа KS 600/25 при температуре 1200°C с выдержкой 2 часа для получения крупнозернистой структуры.

С целью моделирования осадки в инструменте с изменяющейся конфигурацией были изготовлены бойки в виде полушария с различными радиусами, равными 20, 60, 100, 140мм. На изготовленных бойках производили осадку образцов, нагретых до температуры 600, 800, 1000, 1200°C с обжатием 50% путем постепенной передачи каждой заготовки от бойка с меньшим радиусом к бойку с большим радиусом. Окончательную осадку производили на плоских бойках. При этом нагревали и подкладные осадочные плиты до температуры нагрева образца.

Аналогичными температурно-деформационными режимами были осаждены образцы $O150 \times 300$ мм из стали 08кп на плоских бойках.

Из полученной заготовки были вырезаны темплеты из центральной и торцевой зоны. Из темплетов изготовили образцы для механических испытаний, а также для микро- и макроструктурного анализа.

Макроструктурный анализ металла заготовок, осажденных в плоских бойках, свидетельствует о неоднородности структуры на поперечных шлифах образцов в виде широких зон диагонального расположения с хорошо проработанной структурой, сильно отличающейся от структуры основного металла. На заготовках, деформированных в инструменте с изменяющейся конфигурацией, ярко выраженные полосы локализации деформации с хорошо проработанной структурой не наблюдали. Макроструктура заготовок, осажденных в инструменте с изменяющейся конфигурацией, более равномерная, чем у металла заготовок, изготовленных в плоских бойках.

Методами металлографического анализа проводили изучение влияния горячей осадки в инструменте с изменяющейся формой и в плоских бойках на характеристики зеренной структуры.

Изучение микроструктуры металла заготовок, осажденных в бойках с изменяющейся формой с обжатием $\varepsilon = 50\%$, показало, что структура металла в центральной и торцевой зоне по величине приблизительно одинакова. Повышение температуры деформации при одинаковой величине обжатия $\varepsilon = 50\%$ приводит к уменьшению размеров исходного диаметра зерна от 87,221мкм до 28,567мкм в центральной зоне заготовки и от 91,112 мкм до 29,541 мкм в торцевых слоях заготовки.

Таким образом, проведенные исследования показали, что при осадке в инструменте с изменяющейся формой происходит равномерное накопление внутренней энергии, которая при повышении температуры деформации приводит к полному протеканию процессов рекристаллизации.

Результаты проведенной опытнойковки показали, что микроструктура заготовок, осажённых в плоских бойках, имеет крупнозернистую структуру в торцевых слоях заготовки ($\bar{D} = 69,842 - 92,227$ мкм) и мелкозернистую структуру в центральной зоне ($\bar{D} = 19,226$ при 1200°C). Причиной такой разнoзернистости является неравномерное накопление внутренней энергии при осадке в плоских бойках. При этом, из-за локализации деформации в центральной зоне внутренняя энергия достигает величины, необходимой для полного протекания процессов рекристаллизации, приводящей к измельчению зеренной структуры.

Прочностные характеристики металла заготовок, полученных при осадке в бойках с изменяющейся формой и при осадке в плоских бойках, практически находятся на одном и том же уровне. Однако, пластические показатели металла заготовок, изготовленных в бойках новой конструкции выше, чем металла заготовок, осажённых в плоских бойках. Различие величины относительного удлинения составляет 12 – 15%, а относительного сужения – 16 – 20%. Аналогичные результаты получены для показателя ударной вязкости, т.е. ударная вязкость выше у металла заготовок, осажённых в бойках с изменяющейся формой.

Используя ГОСТ 3565-80, провели серию экспериментов по кручению образцов, отобранных из заготовок, осажённых в инструменте с изменяющейся формы и в плоских бойках. Испытаниям подвергли образцы с рабочей длиной $\ell_o = 40$ мм при скорости закручивания 60 об/мин. Данные образцы с заранее нанесённой продольной риской закручивали на испытательной машине СМЭГ-10Т до появления первой трещины. После снятия с испытательной машины измеряли на микроскопе УИМ-23 угол поворота риски φ .

При сравнении результатов, обобщённых в рисунках, приведённых в диссертации, возможны следующие варианты заключения. Во всем интервале исследованных температур пластичность металла сравниваемых образцов повышается в кратное число раз при повышении температур осадки. При этом образцы, отобранные из заготовок, деформированных в инструменте новой конструкции, имеют повышенную пластичность по сравнению с образцами, осажёнными в плоских бойках.

В главе 4 так же исследовано качество конструкционной стали при протяжке слитков в инструменте с изменяющейся формой.

Опытную ковку осуществили в кузнечно-прессовом цехе Павлодарского филиала ТОО «Кастинг», используя промышленный молот с массой падающих частей 3 тонны. В качестве исходной заготовки использовали заготовки из стали 35.

Для моделирования протяжки в инструменте с изменяющейся конфигурацией были изготовлены выпуклые бойки с различными диаметрами, равными 50, 100, 150, 200 мм. Ковку проводили по следующим режимам, таблица 1.

По аналогичным температурно-деформационным режимам была обработана вторая заготовка в плоских бойках.

Из полученных поковок были вырезаны образцы из осевой и поверхностной зоны для микроструктурного анализа.

Микроструктура металла поковок, откованных в инструменте с изменяющейся формой, более однородная, чем при ковке плоскими бойками, при этом данная структура на 3-4 балла мельче, чем микроструктура металла поковок,

откованных в плоских бойках. Деформирование заготовок в данных бойках позволяет значительно уменьшить волокнистость структуры, при этом направленность волокон почти не наблюдается, т.е. значительно уменьшается анизотропия свойств. В отличие от инструмента с изменяющейся формой, при протяжке в плоских бойках крупнозернистая структура сохраняется в периферийных частях поковки, а в центральной части структура мелкозернистая, при этом можно наблюдать сильно вытянутые в направлении течения крупные зерна, т.е. структура поковки волокнистая.

Таблица 1 - Режимы опытнойковки

№ п/п	Наименование операции	Схема протяжки	До сечения, мм	Относительная подача	Единичное относительное обжатие, %	Диаметр выпуклого бойка, мм
1	Протяжка в плоских бойках	Круг - квадрат	250?250	0,6-0,7	10-15	
2	Протяжка в плоских бойках	Квадрат – квадрат	200?200	0,6-0,7	10-20	
	Протяжка в плоских бойках	–	150?150	0,6-0,7	10-20	
3	Рубка откованной заготовки на две части и охлаждение заготовок на воздухе					
4	Протяжка в выпуклых бойках	–	130 ? 130	совмещения перед каждым обжатием выступов бойка с впадиной заготовки	5-10	50
5	Протяжка в выпуклых бойках	–	110 ? 110		5-10	100
6	Протяжка в выпуклых бойках	–	90 ? 90		5-10	120
7	Протяжка в выпуклых бойках	–	70 ? 70		5-10	150
8	Протяжка в плоских бойках	–	50 ? 50	0,6-0,7	5-10	

Таким образом, сталь 35, после деформации в инструменте с изменяющейся формой, имеет равномерную микроструктуру по всему сечению. При этом структура металла поковок независимо от направления и зоны вырезки остается равномерной и мелкозернистой и балл зерна равен 8 – 9.

При протяжке в плоских бойках обнаруживаются четко выраженные полосы локализации деформации. Локализация деформации по ковочному кресту приводит к получению мелкозернистой структуры в центре и крупнозернистой структуры в поверхностных слоях поковки, при этом в поверхностной зоне балл зерна равен 2-4, а в центральных зонах – 8-10.

Механические свойства металла поковок, полученных для исследуемых технологических схемковки, определяли на образцах, вырезанных из продольного направления.

Статистическая обработка результатов механических испытаний образцов дает основание утверждать, что прочностные характеристики σ_T и σ_B металла поковок изменяются незначительно и не зависят от схемыковки. Пластические характеристики металла поверхностных слоев поковки, откованной в инструменте с изменяющейся конфигурацией, на 14 – 18% выше, чем у металла, полученногоковкой в плоских бойках. Относительное сужение и ударная вязкость

поверхностных слоев поковки также на 12 – 18% выше для металла, откованного в инструменте с изменяющейся формой.

При использовании предлагаемых нами конструкций бойков ковка осуществляется знакопеременным изгибом рабочей поверхности инструментов. При этом рабочая поверхность каждого инструмента при каждом изгибе сопрягается с горячей заготовкой. Все это может привести к усталостным разрушениям инструментов. Поэтому в пятой главе исследовали усталостные разрушения инструмента с изменяющейся формой. Знакопеременный изгиб инструмента осуществляли при пластической деформации горячей заготовки стали 3 в виде диска размером 0100?200 мм. Материалом инструмента с размерами 10?150?300 мм служили легированная сталь 60ГС2 и углеродистая сталь У8. Заготовки перед испытанием нагревали до температур 600, 800, 1000, 1200°С и осаживали с постепенным обжатием до 50%.

Для линейной модели разрыхления и последующего разрушения необходимо определяли степень выносливости материала усталостному разрушению ω (СВМУР) по формуле:

$$\omega = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{\sum_{i=1}^N A_{ip}(k_?)}, \quad (21)$$

где G_i – интенсивность деформации сдвига; G_{ip} , – интенсивность деформации сдвига в момент усталостного разрушения; n – количество циклов нагружения реальной детали или инструмента; N – число циклов растяжения-сжатия испытуемого образца; $k_? = \sigma/T$ – коэффициентом жесткости схемы напряженного состояния.

При этом критерием возможности усталостного разрушения является условие $\omega = 1$.

Из формулы (21) видно, что для расчета СВМУР необходимо определять $\sum_{i=1}^N A_{ip}(k_?)$. Поэтому в данной главе приводиться новая методика построения диаграмм усталостного разрушения, т.е диаграмм - $\sum_{i=1}^N G_{ip} - k_? .$

По данной методике из металла, подвергаемого усталостному разрушению, изготавливают образцы гладкие и с надрезными выточками для циклического растяжения и сжатия. Форма образцов определяется диаметром d в наименьшем поперечном сечении и радиусом контура R в продольном сечении образца. Изготовленные образцы испытывают на циклическое сжатие и растяжение при различных температурах до появления первой трещины.

Обработку полученных данных проводят следующим образом. Используя закономерности распределения напряженно-деформированного состояния на оси растягиваемого – сжимаемого образца в сечении шейки можно определить $k_{ж}$ и G_i в процессе циклического нагружения и в момент разрушения по следующим формулам :

$$k_{ж} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{3d}{4R} \right); \quad G_{ip} = 2\sqrt{3} \ln \frac{d_o}{d}, \quad (22)$$

где d_o – исходный диаметр образца.

Для построения кривой усталостного разрушения необходимо применить формулу (21), позволяющую определить ω . В формуле (21) величина $\sum_{i=1}^N \Gamma_{ip}(k_?)$ является неизвестной функцией. Ее предстоит определить по механическим испытаниям, когда $k_{ж}$ меняется с изменением формы образца, при этом величину $\sum_{i=1}^n \Gamma_i$ определяют в исследуемом изделии, в данном случае, в предлагаемом инструменте.

Аппроксимируя степенным полиномом неизвестную функцию $\sum_{i=1}^N \Gamma_{ip}(k_?)$ и делая простейшие преобразования формулы (21) получим

$$\frac{\sum_{i=1}^n \Gamma_i}{\sum_{i=1}^N \Gamma_{ip}(k_?)} = \frac{\sum_{i=1}^n \Gamma_i}{a_0 + a_1 \cdot k_? + a_2 \cdot k_?^2 + \dots + a_m \cdot k_?^m} = 1;$$

$$a_0 + a_1 \cdot k_? + a_2 \cdot k_?^2 + \dots + a_m \cdot k_?^m = \sum_{i=1}^n \Gamma_i,$$

где m – количество испытываемых (типов) образцов (равно степени полинома).

По экспериментальным данным на циклическое растяжение и сжатие определяется $k_{ж}$ и $\sum_{i=1}^n \Gamma_i$. Решением системы уравнения находим коэффициенты a_0 ,

a_1, a_2, \dots, a_m аппроксимирующего уравнения $\sum_{i=1}^N \Gamma_{ip}(k_?) = a_m \cdot k_?^m$ и по этому уравнению определяем диаграмму усталостного разрушения $\sum_{i=1}^N \Gamma_{ip} - k_?$.

Предлагаемую методику построения диаграмм усталостного разрушения использовали для определения зависимости $\sum_{i=1}^N \Gamma_{ip} - k_?$ для стали 60ГС2. Для этого изготовили образцы. Изготовленные образцы испытывали сжатием и растяжением при температурах 600, 800, 1000, 1200°C.

При этом величину $\sum_{i=1}^n \Gamma_i$ и $k_{ж}$ определяли следующим образом. В технической литературе широко используется зависимость $\sigma - \bar{\varepsilon}$. Используя гипотезу «единой кривой» можно кривые $\sigma - \bar{\varepsilon}$ перестроить в кривую $T - \Gamma$. Для этого необходимо использовать формулы $T = \sigma_{\max} / \sqrt{3}$ или $T = \sigma_{\min} / \sqrt{3}$, $\Gamma = 2\sqrt{3} \ln \frac{d_o}{d} = 2\sqrt{3} \bar{\varepsilon}$. Используя выше приведенную методику, произвели перестройку полученной диаграммы $\sigma - \bar{\varepsilon}$ на диаграмму $T - \Gamma$ и в зависимости от величины усилия циклического нагружения и $T = \sigma_{\max} / \sqrt{3}$ определили требуемую Γ_{ip} за один цикл растяжение – сжатие гладкого образца. В последующем произвели суммирование Γ в зависимости от количества цикла растяжение – сжатие.

В пятой главе предлагается методика расчета СВМУР и с помощью разработанной методики прогнозируется возможности разрушения инструмента с изменяющейся формой в течение времени его использования.

Из анализа простейших дислокационных моделей образования и развития усталостных трещин разрушения следует, что развитие усталостных трещин зависит от длины скопления дислокаций, обусловленной предшествующей деформацией, модуля упругости, первоначальной длины субмикротрещин, величины касательных напряжений в плоскости скольжения, а также поля напряжений от внешних нагрузок, которое может быть однозначно охарактеризовано величиной $k_{ж} = \sigma/T$, т.е. коэффициентом жесткости схемы напряженного состояния (σ – среднее напряжение, T – интенсивность касательных напряжений).

Таким образом, для расчета по формуле (19) степени выносливости материала усталостному разрушению необходимо иметь следующие данные:

- 1) поля бесконечно малой деформации ε_{ij} , в циклически нагружаемом теле;
- 2) поля напряжения σ_{ij} , поля коэффициента жесткости схемы напряженного состояния $k_{ж}$;
- 3) кривые усталостного разрушения.

В предлагаемых инструментах с изменяющей рабочей поверхностьюковка горячих заготовок осуществляется знакопеременным изгибом рабочей поверхности, т.е. в процессе деформации выпуклая рабочая поверхность инструмента превращается в плоскую, а после окончания деформации снова приобретает выпуклую форму. При этом для осуществления изгиба рабочей поверхности к его концам прилагают растягивающие силы, а изгибающий момент в инструменте с изгибающейся рабочей поверхностью возникает за счет горячей деформации заготовки.

Согласно принятой схемековки в инструменте с изменяющей формой анализу подлежит объемное напряженное состояние (касательные напряжения приняты равными нулю) при плоской деформации ($\varepsilon_z = 0$).

При знакопеременном изгибе рабочих поверхностей инструментов растягивающие напряжения в основном возникают в поверхностных зонах инструмента. Поэтому возникновение трещин ожидается именно в этих зонах. В связи с этим напряженно-деформированное состояние было исследовано на поверхностных зонах инструмента.

Изменение кривизны инструмента может происходить тогда, когда одна ее часть по толщине испытывает удлинение в тангенциальном направлении, а другая – сжатие. Следовательно, рабочая поверхность инструмента в процессе деформации сжимается, а после деформации удлиняется. Локальные значения тангенциальной ε_θ и радиальной ε_ρ деформаций для рабочей поверхности инструмента можно определить экспериментально, путем измерения длин материальных волокон T_o и T_i до и после многократного изгиба инструмента, используя формулы:

$$\varepsilon_\theta = \ln \frac{T_i}{T_o}; \quad \varepsilon_\rho = -\varepsilon_\theta. \quad (23)$$

Распределение напряжений и коэффициента жесткости напряженного состояния на поверхностных зонах инструмента можно найти из совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и уравнения пластичности. Использование данного метода позволило определить:

радиальные напряжения:

$$\sigma_{\rho} = \sigma_{\kappa} - \beta[\sigma_{T_0} + \Pi \cdot \ln(T_i/T_0)] \ln(R/\rho) \quad (24)$$

тангенциальные напряжения:

$$\sigma_{\theta} = \beta[\sigma_{T_0} + \Pi \cdot \ln(T_i/T_0)] \ln(R/\rho) + 1 - \sigma_{\kappa}. \quad (25)$$

Величину (аксиальных) напряжений σ_z , действующих вдоль образующей срединной поверхности при изгибе моментом, найдем из условия плоской деформации, при которой принимается, что $\sigma_z = (\sigma_{\rho} + \sigma_{\theta})/2$.

Значения коэффициента жесткости схемы напряженного состояния определили, используя соотношение:

$$k = \sigma/T = \frac{(\sigma_{\rho} + \sigma_{\theta} + \sigma_z)/3}{T}, \quad (26)$$

где $T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{\rho} - \sigma_{\theta})^2 + (\sigma_{\rho} - \sigma_z)^2 + (\sigma_{\theta} - \sigma_z)^2}$ – интенсивность касательных напряжений.

Расчет степени выносливости материала инструмента с изменяющейся рабочей поверхностью усталостному разрушению ω осуществляли после проведения эксперимента со знакопеременным изгибом. При этом изгиб инструмента осуществляли при пластической деформации заготовки размером 10?150?300мм. На рабочие поверхности инструмента перед испытанием наносили параллельные риски размером $T_0 = 3$ мм, а заготовки нагревали до температур 600, 800, 1000, 1200°C. После проведения эксперимента измеряли расстояние между рисками T_i , контролировали трещинообразование и произвели расчет напряженно – деформированного состояния на поверхности изгибаемого инструмента за один изгиб инструмента, а так же степени выносливости материала инструмента с изменяющейся рабочей поверхностью усталостному разрушению ω при многократном изгибе инструмента.

Сопоставление полученных результатов показывает, что напряженно – деформированное состояние на поверхности изгибаемого инструмента за один изгиб инструмента не изменяется с изменением температуры заготовки, а значение показателя ω не существенно увеличивается с увеличением количества знакопеременного изгиба. При этом результаты расчета СВМУР показали, что при знакопеременной деформации материала предлагаемых инструментов с количеством цикла 600, 800, 1000, 1200 раз разрушение сплошности не происходит. Однако, с повышением температуры заготовки материалы инструмента с изгибающейся формой теряют упругие свойства и деформируются пластически.

На основе проведенных исследований, установлено что:

1 Локальные значения тангенциальной деформации ε_{θ} в процессе изгиба увеличиваются, а локальные значения радиальной деформации ε_{ρ} уменьшаются.

2 Тангенциальные напряжения σ_{θ} интенсивно увеличиваются, а радиальные напряжения σ_{ρ} интенсивно уменьшаются, при этом величины аксиальных напряжений σ_z сохраняют постоянную величину.

3 Интенсивность логарифмической деформации и коэффициент жесткости схемы напряженного состояния увеличиваются, однако степень выносливости схемы напряженного состояния повышается на небольшую величину.

В главе 5 исследовано влияния температуры горячедеформируемого металла и знакопеременной деформации на микроструктуру стали инструмента с изменяющейся рабочей поверхностью.

Металлографический анализ был проведен на оптическом микроскопе «Axiovert-200 MAT» при увеличениях 200, 500 и 1000 крат. Обработка изображений производилась по программе ВидеоТесТ «Металл 1.0», а также с использованием энергодисперсного спектрометра JNCA ENERGY (Англия), установленного на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL (Джеол) при ускоряющем напряжении 25 кВ. Диапазон увеличений прибора JEOL от 40 до 40000 крат. Принцип работы микроанализатора: высокоэнергетический (25 кэВ) узкий (1 мкм) луч электронов направляется на образец, где разворачивается в растр (кадр), сканируя образец, при этом регистрируются вторичные электроны, испускаемые образцом. Получаемая картина очень похожа на оптические фотографии, но за счет того, что луч электронов очень тонкий ($\approx 1-2$ мкм), глубина фокуса значительно выше, чем у оптических фотографий, и используемое увеличение значительно выше, соответственно, удается различать более мелкие структурные составляющие образца.

Количественный анализ параметров дефектной субструктуры и фазовый анализ осуществляли стандартными методами. Шлифы для металлографического исследования готовили по традиционной методике на шлифовальных и полировочных кругах. Для травления образцов был использован концентрированный раствор азотной кислоты в этиловом спирте.

Съемки рентгенограмм проводили в режиме автоматической записи профиля рентгеновской линии интерференции с применением эталона из тех же сталей на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4. Использовали монохроматор в отраженном пучке излучением медного анода при следующих режимах: напряжение в рентгеновской трубке 30 кВ, анодный ток 30 мА, скорость движения счетчика $2^\circ/\text{мин.}$, щели у трубки – 0,25мм.

Металлографическим анализом определяли соотношение фаз в опытных образцах. По обработанным данным были построены диаграммы распределения по фазам в образцах при различных температурах контакта инструмент-заготовка.

Исследованием структуры литого и закаленного (закалка при температуре 870°C , а последующий отпуск при температуре 470°C) образца установлено, что:

- микроструктура литого образца состоит в основном из перлита и изолированных зерен феррита;
- в микроструктуре закаленного образца видны отдельные крупные частицы цементита. Структура игольчатой ферритной матрицы становится более грубозернистой, размеры ферритных зерен изменяются (балл 4), троостит становится более светлым, при этом его игольчатость сохраняется.

Последующие усталостные нагружения при температурах на контакте инструмент-заготовка 600, 800, 1000, 1200°C с небольшим количеством упругого изгиба инициирует в поверхностных зонах металла инструмента начальную стадию динамической рекристаллизации, а именно, формирование субзеренной структуры и перемещение большеугловых границ зерен, пакетов и пластин мартенсита. Последнее сопровождается образованием в стыках границ зерен

областей с повышенным содержанием частиц карбидной фазы или высокой амплитудой кривизны-кручения кристаллической решетки. Светлые зерна микроструктуры представляют собой сложные карбиды примерно одинакового размера и распределены в виде светлых скоплений. Матрица феррита в результате термического травления темнеет. Предполагается, что данные области, обладая высокими прочностными свойствами и выступая в качестве концентраторов напряжений, могут быть причиной разрушения материала при дальнейших испытаниях.

Знакопеременные упругие деформирования с большим количеством изгиба при температуре на контакте инструмент-заготовка 800, 1000 и 1200°C приводит к протеканию в материале целого ряда процессов. Во-первых, происходит релаксация дефектной структуры стали. На уровне кристаллов мартенсита она сопровождается перестройкой дислокационной субструктуры, что приводит к фрагментации. На уровне пакета кристаллов наблюдается рассыпание границ, разделяющих соседние кристаллы мартенсита, т.е. образуются так называемые неоднородные пакеты. Средние размеры кристаллов таких пакетов составляют $873,0 \pm 14,8$ нм, что заметно выше, чем в структуре подобных, сформировавшихся на предварительной стадии усталостного нагружения, пакетов ($427 \pm 18,4$ нм). На уровне субзерен и зерен динамической рекристаллизации наблюдается заметное увеличение средних размеров субзерен до $18,7 \pm 1,6$ мкм (на стадии промежуточного усталостного нагружения средний размер субзерен составлял $12,820 \pm 0,126$ мкм).

Во-вторых, распадается твердый раствор на основе α -железа, и образуются частицы карбидной фазы. Местами расположения частиц являются дислокации, границы и стыки границ фрагментов, границы кристаллов мартенсита, стыки границ пакетов, границы субзерен и зерен. Последний факт свидетельствует о том, что при формировании субзеренной структуры высвободившийся при растворении частиц цементита на стадии начального усталостного нагружения углерод располагается не только на границах, но и внутри субзерен на дислокациях.

В-третьих, происходит частичное $\alpha \rightarrow$ бейнитное $\rightarrow \gamma \rightarrow$ перлитное превращение. Такое превращение протекает в областях, обогащенных углеродом и расположенных на стыках зерен и субзерен, а также в объеме кристаллов мартенсита. В случае $\alpha \rightarrow$ бейнитное $\rightarrow \gamma$ формируется трехфазная структура, состоящая из кристаллов пластинчатого мартенсита или бейнита, островков остаточного аустенита и наноразмерных частиц цементита. В случае $\alpha \rightarrow$ бейнитное $\rightarrow \gamma \rightarrow$ перлитное превращение зарождение перлитных колоний начинается преимущественно на границах аустенитных зерен. Колонии перлита представляют собой сфероиды неправильной формы, которые растут, поглощая аустенитное зерно. При увеличении количество изгиба на границе раздела перлит-аустенит появляются зерна перлита второго поколения, которые затем растут совместно с первичными колониями. Предполагается, что данные перлитные области, обладая определенными пластическими свойствами, могут быть причиной снижения упругих свойств материала при дальнейших испытаниях.

Согласно результатам электронно-микроскопического анализа дисперсности перлита, снижения контактных температур инструмент-заготовка до 800°C

приводит к увеличению количество изгибов инструмента, при котором зарождаются зерна перлита второго поколения .

Необходимо отметить, что проведение многократного усталостного нагружения при контактной температуре инструмент-заготовка 600°C привело к повсеместному обратному $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ мартенситному или бейнитному превращению. Образуется три типа субзерен, различающихся морфологией мартенсита или бейнита: содержащие лишь кристаллы пакетного мартенсита или бейнита, с кристаллами пластинчатого мартенсита или бейнита, со смешанной структурой, содержащие кристаллы пакетного и пластинчатого мартенсита или бейнита.

Структура вновь образованного мартенсита или бейнита характеризуется присутствием остаточного аустенита, объемная доля которого определяется морфологией кристаллов мартенсита или бейнита, а точнее концентрацией углерода в данном объеме стали. В пакетном мартенсите или бейните остаточный аустенит располагается в виде прослоек вдоль кристаллов мартенсита или бейнита, в структуре пластинчатого мартенсита или бейнита – в виде островков между кристаллами мартенсита или бейнита. Остаточный аустенит иногда обнаруживается в виде тонких прослоек вдоль глобул цементита.

Вновь образовавшийся мартенсит или бейнит подвергается отпуску при усталостном нагружении стали. Это приводит к фрагментации кристаллов, образованию частиц карбидной фазы, расположенных на дислокациях, границах фрагментов и кристаллов мартенсита или бейнита. В отдельных случаях наблюдается разрушение пакетного мартенсита или бейнита. В объеме бывших пакетов образуется структура, характерным элементом которой является строчечное расположение частиц карбидной фазы в виде параллельных рядов, что указывает на присутствие границ раздела кристаллов мартенсита или бейнита.

Таким образом, потеря упругих свойств стали инструмента с изменяющейся формой сопровождается повсеместным перлитным превращением при высоких контактных температурах инструмент-заготовка, а усталостное разрушение данной стали, сопровождается повсеместным обратным $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ -превращением с образованием кристаллов мартенсита или бейнита. Наблюдается существенное различие морфологии вновь образовавшегося бейнита или мартенсита, что может быть обусловлено концентрационной неоднородностью стали по углероду. Прочностные характеристики мартенситной или бейнитной структуры в значительной степени определяются концентрацией углерода в материале, поэтому можно сделать вывод, что одной из причин разрушения стали при усталостных испытаниях является формирование структуры с существенно различающимися прочностными характеристиками.

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- выделение перлита является фактором, снижающим упругие свойства материала при знакопеременном изгибе инструмента, а выделение частиц карбидной фазы и образование кристаллов мартенсита или бейнита при обратном $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ -превращении является фактором, приводящим к упрочнению материала инструмента.

- усталостное нагружение инструмента с нагретой заготовкой сопровождается повсеместным $\alpha \rightarrow$ бейнитное $\rightarrow \gamma \rightarrow$ перлитное превращением и обрат-

ным $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ -мартенситным или бейнитным превращением в зависимости от величины контактной температуры инструмент-заготовка;

- существенное различие в морфологии перлита, мартенсита или бейнита, образовавшегося в субзеренной структуре указывает на концентрационную и, следовательно, прочностную неоднородность формирующейся в процессе усталостного нагружения структуры стали. Данное обстоятельство, по всей видимости, является одной из основных причин уменьшения упругих свойств или разрушения углеродистой стали.

Рентгеноструктурный анализ опытных образцов подтвердил данные металлографических исследований: на дифрактограммах высоконагруженных стальных образцов при температурах контакта 600°C и 800°C четко выделяются дифракционные максимумы от кристаллических решеток феррита и бейнита и феррита. Карбиды (карбид железа с ромбической решеткой $a = 4,528 \text{ \AA}$, $b = 5,079 \text{ \AA}$ и $c = 6,748 \text{ \AA}$), вследствие их малого содержания, дают слабые линии на дифрактограмме.

В главе 5 исследовано влияние температуры горячедеформируемого металла и знакопеременной деформации на механические свойства стали инструмента с изменяющейся формой.

Лабораторные испытания механических свойств проводились на образцах стали 60ГС2, рекомендуемой в качестве материала инструмента, и углеродистой стали У8, наиболее часто применяемой при изготовлении плоских бойков.

Определение механических свойств стали инструмента послековки осуществляли на автоматизированной установке МВ-01м, позволяющей проводить механические испытания на изготовленных микрошлифах и оперативно оценивать характеристики прочности и пластичности без изготовления образцов на растяжение.

Перед определением механических свойств инструмента с изменяющейся формой ковку в данном инструменте осуществляли за счет знакопеременного изгиба инструмента, пластической деформацией горячей заготовки размером 50?100 мм. Заготовки перед испытанием нагревали до температур 600, 800, 1000, 1200°C.

Статистическая обработка результатов механических испытаний образцов, полученных при различных количествах упругого изгиба инструмента, дает основание утверждать, что:

- увеличение количеств знакопеременной деформации инструмента при контактной температуре инструмент-заготовка 600°C приводит к интенсивному увеличению твердости, временного сопротивления и предела текучести;

- увеличение количества знакопеременной деформации инструмента при контактной температуре инструмент-заготовка 800°C приводит к менее интенсивному увеличению твердости, предела прочности и текучести;

- увеличение количества знакопеременной деформации инструмента при контактной температуре инструмент-заготовка 1000°C приводит к менее интенсивному уменьшению твердости, временного сопротивления и предела текучести;

- увеличение количества знакопеременной деформации инструмента при контактной температуре инструмент-заготовка 1200°C приводит к интенсивному уменьшению твердости, временного сопротивления и предела текучести.

Согласно полученным данным установлено, что при температуре 600°C контакта заготовка – инструмент твердость повышается с увеличением числа знакопеременного изгиба. При контакте заготовка-инструмент при температуре 800°C в начальном этапе твердость сильно не изменяется, а, начиная с 800 раз контакта заготовка-инструмент идет уменьшение твердости. При температурах контакта 1000, 1200°C материал инструмента разупрочняется, теряя упругие свойства.

Таким образом, результатами исследования установлено существенное влияние знакопеременной деформации и контактной температуры инструмент-заготовка на механические свойства стали инструмента. Увеличение твердости и временного сопротивления дают основание предположить о возможности усталостного разрушения материала инструмента.

В шестой главе исследована возможность получения качественных заготовок для штамповки комбинированными способами, позволяющие локализовать деформацию последовательно в поверхностных и в центральных слоях поковки. При этом ставился цель использовать широко известные оборудования и инструменты. Результаты анализа существующих технологий подготовки заготовок для штамповки поковок из титановых сплавов показывают, что на трудоемкость и производительность, а также на качество получаемых поковок сильное влияние оказывают физические свойства титановых сплавов и специфика их построения. Как было сказано выше, при ковке заготовок в инструментах с изменяющей формой в первом этапе деформация локализуется на поверхности и на втором этапе в центре поковки, т.е создается условия для качественной подготовки структуры заготовок для последующей штамповки. Однако, в связи с трудностью изготовления предлагаемых инструментов в производственных условиях нами было поставлено еще одна цель – для получения качественных заготовок для штамповки разработать способковки, позволяющий локализовать деформацию последовательно на поверхности и в центре поковки используя широко известные оборудования и инструменты.

Анализируя литературные данные, выбрали дляковки титановых сплавов плоские, комбинированные бойки и РКМ и исследовали НДС при ковке в данных инструментах и оборудования.

Расчет степени деформации сдвига возможен лишь при определении на каждом этапе деформирования эквивалентной деформаций $\Delta\epsilon_i$, что значительно упрощается при построении математической модели самого процесса. Кроме того, с помощью математического моделирования имеется возможность найти оптимальные параметры технологического процесса путем отыскания экстремумов математической модели и определения необходимых углов кантовки, при которых достигается равномерное распределение Λ по сечению заготовки.

При построении математической модели процессаковки круглой заготовки на РКМ и в комбинированных (верхний плоский, нижний вырезной с углом выреза $\alpha = 120^\circ$), плоских бойках эквивалентные напряжения, деформации, температурное поле, распределение контактного давления и скорости течения металла определяли по выше описанной методике с использованием популярного CAE-пакета MSC.Super Forge. При расчете данных величин варьировали температуру.

На основе полученных результатов численного моделирования установлено, что:

1. При протяжке в плоских бойках эквивалентные напряжения и деформаций локализуются в начальный момент протяжки в поверхностных зонах заготовки, а в последующих этапах протяжки из-за возникновения силы трения данные величины сосредотачиваются по ковочному кресту;

2. При протяжке в комбинированных бойках эквивалентные напряжения и деформаций имеет большое значение на участках, прилегающих к поверхности или к центру заготовки, в то время как в центральной зоне заготовки – минимальную величину;

3. При протяжке в РКМ эквивалентные напряжения и деформаций сосредотачивается на поверхностной зоне заготовки, при этом в центральных слоях эквивалентные напряжения и деформаций имеет минимальную величину;

4. При ковке в плоских и комбинированных бойках, а также на РКМ в прилегающих к инструменту зонах поковки эквивалентные напряжения и деформаций по величине является максимальной, а в центральных зонах соприкосновения инструмента с заготовкой эквивалентные напряжения и деформаций являются, наоборот, минимальной;

5. В процессе протяжки в плоских и комбинированных, а так же на РКМ в зонах локализации деформации повышается температура;

6. При ковке в плоских и комбинированных бойках, а также на РКМ с увеличением единичного обжатия величина контактного давления возрастает.

Математически модель процессаковки круглой заготовки на РКМ и в комбинированных, плоских бойках строили полуэмпирическим подходом, сущность которого заключается в использовании основных физических закономерностей изменения $\Delta\Lambda$ от относительного номинального обжатия ε и координаты материальной точки в сочетании с обработкой расчетных данных, и аппроксимации по методу наименьших квадратов.

Обработку расчетных данных вели с использованием описанного ниже алгоритма, для которого была составлена программа в MATLAB.

В окончательном виде математическая модель распределения $\Delta\Lambda$ по сечению круглой заготовки при протяжке запишется в виде сложной функции

$$\Delta\Lambda = \sum_{i=0}^{13} \left(\sum_{j=0}^5 \left(\sum_{k=0}^3 a_{ek} e^k \right)_j (\rho/R)^j \right)_i \varphi^i. \quad (27)$$

Были получены коэффициенты математической модели для распределения $\Delta\Lambda$ по сечению круглой заготовки при протяжке в комбинированных, плоских бойках и на РКМ.

Табличный критерий $F_{\text{табл.}} = 1$, а рассчитанный $F = 0,92, 0,91, 0,94$ т.е. расчетные значения меньше табличного, что доказывает пригодность полученной математической модели для практического применения.

С помощью математической модели процесса протяжки на РКМ и в комбинированных, плоских бойках было рассчитано распределение $\Delta\Lambda$ в поперечных плоскостях. В последующем суммирование $\Delta\Lambda$ по формуле $\Lambda_0 = \sum_{i=1}^N |\Delta\Lambda_i|$ позволило определить величину степени деформации сдвига.

Результаты расчетов показали следующее:

1. При протяжке в РКМ степень деформации сдвига сосредоточивается на поверхностной зоне заготовки, при этом в центральных слоях деформация имеет минимальную величину;

2. При протяжке в комбинированных бойках степень деформации сдвига имеет большое значение на участках, прилегающих к поверхности, в то время как в центральной зоне заготовки – минимальную величину;

3. Ковка в комбинированных бойках приводит к сосредоточению степени деформации сдвига в прилегающих к инструменту зонах поковки, при этом в центральных участках заготовки деформация является минимальной;

4. Уменьшение относительной подачи переносит акцент степени деформации сдвига от центра к периферии вне зависимости от формы инструмента, в то время как увеличение градиента температуры, наоборот, сосредоточивает степень деформации сдвига в центре;

5. Результаты расчета степени деформации сдвига позволяют предположить, что при ковке в плоских бойках измельчение зерен происходит в центральной зоне заготовки, в то время как при протяжке в РКМ и комбинированных бойках хорошо прорабатываются поверхностные зоны заготовки;

6. На основе расчета степени деформации сдвига и его распределения предлагается ковку сталей и сплавов проводить в два этапа. На первом этапе ковку производить в плоских бойках, а на втором – в РКМ или комбинированных бойках.

Вышеописанное распределение деформации при протяжке на РКМ, в комбинированных и плоских бойках позволило разработать комбинированный метод деформирования двухфазных титановых сплавов. Исходным материалом послужили промышленные слитки сплава ВТ9 размером $\varnothing 960 \times 1650$ мм.

Вначале слитки на гидравлическом прессе подвергались протяжке в плоских бойках на диаметр 500 мм при температуре 1250 °С. Каждая из полученных заготовок разрезалась на три части, а затем нагревалась до 960 °С (на 40 °С ниже температуры полиморфного превращения $T_{\text{пп}}$) и подвергалась протяжке на гидравлическом прессе в плоских, комбинированных бойках и на РКМ с уковами 1,4; 1,5 и 1,6 в условиях каждой схемы.

Полученные после этого заготовки также разрезались на три части и деформировались при температуре 1150°С (β - область) в гидравлическом прессе с использованием инструментов тех же видов и РКМ, но с уковами 1,9; 2,0 и 2,1 в условиях каждой схемы. После деформирования с каждой поковки отрезались поперечные темплеты с целью изучения макроструктуры.

Заготовки, откованные по рациональной технологии, в последующем деформировались штамповкой.

Макроструктура поковки диска однородная. Величина ее зерна колеблется от 4 до 5 баллов по 10-балльной шкале макроструктур. Микроструктура в контрольных зонах однородная, без заметного присутствия бывших границ β -зерен. Она характеризуется вытянутым строением α -фазы и соответствует 2-4 типам шкалы №1 микроструктур для двухфазных титановых сплавов.

Общий уровень механических свойств поковок дисков по всем показателям соответствует требованиям ОСТ 190197-87, а по пластическим характеристикам выше, чем на поковках дисков, изготовленных по существующей технологии.

Вследствие сокращения времениковки производительность процесса получения поковок для последующего изготовления штамповок увеличилась в 1,5 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Методом конечных элементов получены количественные данные и установлены основные закономерности распределения НДС, температуры и энергосиловых параметров при моделированииковки в бойках с изменяющейся формой рабочей поверхности, а также в инструменте с цилиндрической рабочей формой, плоских, комбинированных бойках и на РКМ;

2. Разработана методика определения размеров инструмента с изменяющейся формой рабочей поверхности, позволяющая установить рациональную форму и размеры поперечного сечения данного инструмента;

3. Разработаны плоская и объемная математическая модели процессаковки в бойках с изменяющейся формой рабочей поверхности, а также объемная математическая модель процессаковки в плоских, комбинированных бойках и на РКМ, позволяющие прогнозировать качество в получаемых поковках;

4. Результаты исследования НДС при осадке и протяжке в инструменте с изменяющейся формой показали, что схема НДС получается «мягкой», а деформация распределяется равномерно;

5. Результатом расчета степени деформации сдвига показано, что при ковке в плоских бойках измельчение зерен происходит в центральной зоне заготовки, в то время как при протяжке на РКМ или в комбинированных бойках, хорошо прорабатываются поверхностные зоны заготовки. На основе этого результата было предложено протяжку сталей и сплавов проводить в два этапа. На первом этапе ковку необходимо производить в плоских бойках, а на втором этапе на РКМ или в комбинированных бойках;

6. Выявлены закономерности влияния деформационных режимовковки в бойках с изменяющейся формой и в комбинированном способе на изменение структуры сталей и сплавов;

7. Проведено изучение закономерности деформируемости при усталостном разрушении стали 60ГС2, используемой в качестве материала инструмента, в зависимости от температуры деформирования нагружением и структурного состояния;

8. Установлено, что к структурным факторам, снижающим упругие свойства материала при знакопеременном изгибе инструмента, можно отнести выделение перлита, а выделение частиц карбидной фазы и образование кристаллов бейнита при $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ – превращении, в свою очередь, является причиной упрочнения материала;

9. Показано, что усталостное нагружение инструмента с нагретой заготовкой сопровождается как совокупным протеканием $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow$ перлитным превращением, так и обратным $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ превращением в зависимости от величины контактной температуры инструмент-заготовка;

10. Установлено существенное влияние знакопеременной деформации и контактной температуры инструмент-заготовка на механические характеристики стали инструмента. При этом выявлено, что увеличение твердости и временного сопротивления приводят к усталостному разрушению, а уменьшение пла-

стических свойств – к потере упругих свойств материала инструмента;

11. Разработана методика расчета степени выносливости материала к усталостному разрушению и построена диаграмма усталостного разрушения инструментальной стали.

Таким образом, в диссертации изложены научно обоснованные технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса при производстве поковок из сталей и сплавов.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Предварительный патент на изобретение № 12589. Инструмент для протяжки и осадки / Омаров А.Д., Машеков С.А., Биякаева Н.Т. и др. Оpubл. 06.01.2003, бюл. №1.

2. Предварительный патент на изобретение №12590. Инструмент для штамповки / А.Д. Омаров, С.А. Машеков, Н.Т. Биякаева и др. Оpubл. 06.01.2003, бюл. №1.

3. Предварительный патент на изобретение №12588. Инструмент для протяжки / А.Д. Омаров, С.А. Машеков, Н.Т. Биякаева и др. Оpubл. 06.01.2003, бюл. №1.

4. Машеков С.А., Биякаева Н.Т., Мурзахметова У.А. Исследование энергосиловых параметров и деформированного состояния осадки с кручением Материалы международной научной конференции «Первые Ержановские чтения». - Павлодар, 2004. - С.303-308.

5. Исследование напряженно – деформированного состояния при протяжке в инструменте с изменяющейся формой / С.А. Машеков, Н.Т. Биякаева, Ж.Ж. Жумагалиева, Г.Б. Машурова // Международная научно-практическая конференция «Первые Ержановские чтения» (Сборник докладов) г. Павлодар: ПГУ им. С. Торайгырова, 2004 г, т.1. С. 287 – 293.

6. Исследование напряженно – деформированного состояния при протяжке в инструменте с изменяющейся формой / С.А. Машеков, Н.Т. Биякаева, Ж.Ж. Жумагалиева, Г.Б. Машурова // Международная научно-практическая конференция «Первые Ержановские чтения» (Сборник докладов) г. Павлодар: ПГУ им. С. Торайгырова, 2004 г, т.1. С. 293 – 297.

7. Машеков С.А., Биякаева Н.Т., Мурзахметова У.А. Исследование деформированного состояния при осадке в инструменте с изменяющейся формой // Материалы международной научной конференции «Первые Ержановские чтения». – Павлодар, 2004. – С.297-302.

8. Машеков С.А., Мурзахметова У.А., Биякаева Н.Т., Бидилдаева В. Методика оценки усталостного разрушения // Материалы международной научной конференции «Актуальные проблемы механики и машиностроения». – Алматы, 2005. т.3. – С.141-146.

9. Патент РК № 15284. Инструмент для протяжки /А.Д. Омаров, С.А.Машеков, Биякаева Н.Т., У.А. Мурзахметова и др. Оpubл. 17.01.2005, бюл. № 1. – 2с:ил.

10. Патент РК № 15280. Инструмент для штамповки /А.Д. Омаров, С.А.Машеков, Н.Т. Биякаева, У.А. Мурзахметова и др. Оpubл. 17.01.2005, бюл. № 1. – 2с:ил.

11. Патент РК № 15140 Инструмент дляковки /А.Д. Омаров, С.А. Машеков, Н.Т. Биякаева, У.А. Мурзахметова и др. Оpubл. 15.07.2005, бюл. № 7. – 2с:ил.
12. Патент РК № 16165. Инструмент для осадки /А.Д. Омаров, С.А. Машеков, Н.Т. Биякаева, У.А. Мурзахметова и др. Оpubл. 15.09.2005, бюл. № 9. – 2с:ил.
13. Патент РК № 16166. Инструмент для протяжки /А.Д. Омаров, С.А.Машеков, Н.Т. Биякаева, У.А. Мурзахметова и др. Оpubл.15.09.2005, бюл. № 9. – 2с:ил.
14. Машеков С.А., Мурзахметова У.А., Биякаева Н.Т / Влияние температурно-деформационных режимов ОМД на структуру пружинно-рессорной стали // Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития нефтяной промышленности Казахстана», Алматы, КазНТУ, 2005г. - С. 502-508.
15. Машеков С.А., Мурзахметова У.А., Биякаева Н.Т. Методика расчета степени выносливости материала усталостному разрушению / Международная научно-техническая конференция «Интенсификация добычи нефти», Алматы, КазНТУ, 2005 г.
16. Машеков С.А., Мурзахметова У.А., Биякаева Н.Т. Влияние температуры горячедеформируемого металла и знакопеременной деформации на микроструктуру инструмента с изменяющейся формой из углеродистой стали / Международная научно-техническая конференция «Интенсификация добычи нефти», Алматы, КазНТУ, 2005 г.
17. Математическая модель процесса изготовления валов нефтегазовых оборудований при деформировании в инструменте с изменяющейся формой /С.А. Машеков, Ж.Ж. Жумагалиева, Н.Т. Биякаева и др. //Международная научно-техническая конференция «Интенсификация добычи нефти», Алматы, КазНТУ, 2005. С.481-485
18. Математическая модель изготовления валов нефтегазового оборудования деформированием в инструменте с изменяющейся формой / С.А. Машеков, Ж.Ж. Жумагалиева, Н.Т. Биякаева // Вестник Казахской Академии транспорта и коммуникаций, 2006, №6. С.72-76.
19. Патент РК № 16865. Цилиндрический образец для испытания на сжатие. С.А. Машеков, Н.Т. Биякаева, Л.А. Курмангалиева и др. Оpubл. 16.01.2006, бюл. № 1. -2с:ил.
20. Машеков С.А., Мурзахметова У.А., Биякаева Н.Т. Влияние температуры горячедеформируемого металла и знакопеременной деформации на механические свойства инструмента с изменяющейся формой из углеродистой стали //Вестник КазНТУ. – Алматы, 2006. - №1 – С.54-62.
21. Машеков С.А., Мурзахметова У.А., Биякаева Н.Т. Влияние температуры горячедеформируемого металла и знакопеременной деформации на микроструктуру инструмента с изменяющейся формой из углеродистой стали //Вестник КазНТУ. – Алматы, 2006. - №3. – С.49-55.
22. Машеков С.А., Мурзахметова У.А., Биякаева Н.Т.Влияние температуры горячедеформированного металла и знакопеременной деформации на микроструктуру инструмента с изменяющейся формой из пружиннорессорной стали //Вестник КазНТУ, 2006. №4(54). - С.49-55.

23. Машеков С.А., Мурзахметова У.А., Биякаева Н.Т. Методика расчета степени выносливости материала усталостному разрушению.//Вестник КазНТУ. – Алматы, 2006. - №4. – С.59-65.

24. Машеков С.А., Биякаева Н.Т., Нуртазаев А.Е. Методика расчета силовых элементов конструкции инструмента на прочность при ковке. Материалы Международной научной конференции «Состояние и перспективы развития механики и машиностроения в Казахстане». – Алматы: КазНТУ, 2007 г. – Том2. – С. 33-38.

25. Машеков С.А., Биякаева Н.Т., Нуртазаев А.Е. Численное моделирование методом конечных элементов НДС заготовки при ковке в инструменте с изменяющейся рабочей формой. Материалы Международной научной конференции «Состояние и перспективы развития механики и машиностроения в Казахстане». – Алматы: КазНТУ, 2007 г. – Том 2. – С. 38-44.

26. Машеков С.А., Биякаева Н.Т., Нуртазаев А.Е., Хамитов Т.Н. Исследование НДС заготовки при осадке в инструменте с изменяющейся рабочей формой с применением MSC.SuperForge. Материалы десятой Российской конференции пользователей систем MSC Software «MSC.Software: комплексные технологии виртуальной разработки изделий (VPD). Опыт применения на предприятиях СНГ и стран Балтии». – Москва, 2007 г, <http://www.mssoftware.ru/index.php?d=press&p=conf2007>

27. Машеков С.А., Биякаева Н.Т., Нуртазаев А.Е. Численное моделирование методом конечных элементов НДС заготовки при протяжке в инструменте с криволинейно-выпуклой рабочей формой. Алматы: Вестник КазАТК, 2007. – №5 (48). – С. 176-182.

28. Машеков С.А., Биякаева Н.Т., Нуртазаев А.Е. Численное моделирование методом конечных элементов НДС заготовки при осадке в инструменте с криволинейно-выпуклой рабочей формой. Алматы: Вестник КазНТУ, 2007. – №5 (40). – С. 59-64.

29. Машеков С.А., Биякаева Н.Т., Нуртазаев А.Е. Методика определения оптимальных размеров криволинейно-выпуклой рабочей формы инструмента для деформирования металлов и сплавов. Алматы: Вестник КазНТУ, 2008. – №1 (49). – С. 49-54.

30. Биякаева Н.Т. Способ изготовления поковок из сталей. Инновационный патент на изобретение по заявке 2008/0347.1 от 31.03.2008 г.

31. Биякаева Н.Т. Инструмент для протяжки. Инновационный патент на изобретение по заявке 2008/0347.1 от 31.03.2008 г.

32. Машеков С.А., Биякаева Н.Т., Нуртазаев А.Е. Монография «Технологияковки в инструменте с изменяющейся формой».- Издательство «Кереку», Павлодар, 2008.

33. Патент РК № 21687. Устройство для протяжки. Машеков С.А., Биякаева Н.Т., Удербаяева А.Е. и др. Опубл. 15.09.2009, бюл. №9.

34. Биякаева Н.Т. Напряженно-деформированное состояние заготовки при штамповке в инструменте с изменяющейся рабочей формой. - Журнал «КШП. ОМД», 2009, №3, с.38-41.

35. Биякаева Н.Т. Математическая модель процессаковки круглой заготовки в комбинированных и вырезных бойках с изменяющейся формой.- Materiały IV

Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Naukowa myśl informacyjnego wieku - 2009». 07-15 marca 2009 roku. – Przemysł. – Nauka I studia, 2009.

36. Биякаева Н.Т. Расчет силовых элементов конструкции инструмента с изменяющейся формой на прочность.- Журнал «Труды НГАСУ». №1, 2009 (г.Новосибирск).

37. Биякаева Н.Т. Численное моделирование методом конечных элементов НДС заготовки при протяжке комбинированным способом (сообщение 1).- Журнал «Поиск» №2, 2009г. (г.Алматы).

38. Биякаева Н.Т. Численное моделирование методом конечных элементов НДС заготовки при протяжке комбинированным способом (сообщение 2).- Журнал «Поиск» №2, 2009г. (г.Алматы).

39. Численное моделирование методом конечных элементов НДС заготовки при протяжке в инструменте с цилиндрической рабочей формой Машеков С.А., Нуртазаев А.Е., Биякаева Н.Т., Удербаева А.Е. Вестник Казахского национального технического университета им. К.И. Сатпаева, 2009, №4 (74) 79 – 85.

40. Численное моделирование методом конечных элементов НДС заготовки при протяжке в инструменте с цилиндрической рабочей формой. Машеков С.А., Нуртазаев А.Е., Биякаева Н.Т., Удербаева А.Е. «Проблемы инновационного развития нефтегазовой индустрии», - Алматы: КБТУ, 2009.

41. Биякаева Н.Т. Исследование закономерностей изменения структуры металла при простом сдвиге.- Журнал «Известия вузов. Цветная металлургия» №6, 2009г.

42. N.T. Biyakaeva. Investigation of Regularities of Variations in the Structure of Metal under Simple Shear. – Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2009, Vol.50, No. 6, pp. 622-627.

43. Биякаева Н.Т. Исследование закономерностей изменения структуры металла при растяжении.- Журнал «Известия вузов. Цветная металлургия» №1, 2010г.

44. N.T. Biyakaeva. Investigation of Regularities of Variations in the Structure of Metal under Tension of a Sample.- Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2010, Vol.51, No. 1, pp. 69-73.

45. Биякаева Н.Т. Численное моделирование методом конечных элементов НДС заготовки при протяжке комбинированным способом (сообщение 3).- Журнал «Поиск» №2, 2010г. (г.Алматы).

46 Биякаева Н.Т. Численное моделирование методом конечных элементов НДС заготовки при протяжке комбинированным способом (сообщение 4).- Журнал «Поиск» №2, 2010г. (г.Алматы).

БИЯКАЕВА НУРГУЛЬ ТЕМІРГАЛЫҚЫЗЫ

Жұмысшы беті пішінін өзгертетін сайманда өндеудің теориялық және технологиялық негізі

05.03.01 – «Механикалық, физико-техникалық өндеу технологиялары мен жабдықтары» мамандығы бойынша техника ғылымдарының докторы ғылыми дәрежесін ізденуге

ТҮЙІНДЕМЕ

Жұмыстың мақсаты – математикалық және физикалық модельдеудің әдістемелеріне сүйене отырып, кешенді жақындауды іске асыруды негізге алып ұтымды кернеулі-деформациялы күйдің сұлбасын алуды қамтамасыз ететін құрал-сайманның жақсы құрылымын жасау, сапаны басқарудың жаңа ғылымдық нәтижесін алу, басқарушы әсер етуді табу, металдан жасалған бұйымдардың сапасын жоғарлатуға бағытталған жаңа техникалық және технологиялық шешімдерді зерттеуші сынауларда тексеру, ал тағы да құрал-саймандық болаттардың қажумен бұзылу заңдылықтарын зерттеу.

Осы жұмыстың ғылыми мәселесі болып мыналар саналады: жоғары сапалы соғылмаларды алуды қамтамасыз ететін жаңа ұсталық соғу саймандардың құрылымын жобалау және осы саймандардың ең жақсы құрылымдық, кинематикалық және беріктік ерекшеліктерін анықтау; көлемдік кернеулі-деформациялы күйлерді есептеудің жаңа әдістемесін жасау; жұмысшы бетінің пішіні өзгертетін сайманның ұтымды өлшемдерін анықтаудың жаңа әдістемесін жасау; соғылмалардың сапасын жақсартуды қамтамасыз ететін пішіні өзгертетін соққыштарда білік және диск типті соғылмаларды соққан кезде пайда болатын кернеулі-деформациялы күйдің таралу заңдылықтарын зерттеу; жұмысшы бетінің пішіні өзгертетін сайманды, жазық және құрастырылған соққыштарды, ал тағы да радиальды-соғу машинасын қолданып соққанда ұсақ түйіршікті құрылымы бар білік типті соғылмаларды алу мүмкіндігін болжай алатын соғу процесінің көлемдік математикалық моделін жасау; материалдың қажып бұзылуға төзімділік дәрежесін (МҚБТД) есептеуге керекті жаңа әдістемені жасау және қажумен бұзылу диаграммасын салу; жаңа құрылымы бар соққыштарды пайдаланған кезде, оның материалының физика-химиялық және механикалық қасиеттерінің өзгеру заңдылықтарын зерттеу; деформациялау режимдерін өзгерту жолымен болат пен қорытпалардан жасалған соғылмалардың сапасын жақсартуды қамтамасыз ететін жаңа технологияны жобалау.

Жұмыстың ғылыми жаңалықтары: Жұмыста өнімнің сапасын жоғарлатуға мүмкіндік беретін ұсталық соғу және қалыптаумен бұйымдарды өндірудің технологиясын жақсарту бойынша проблеманы шешудің нәтижелері келтірілген. Бірінші рет мыналар анықталды: өзгертетін пішіні бар саймандардың ең жақсы құрылымдық, кинематикалық және геометриялық параметрлері табылды; көлемдік кернеулі-деформациялы күйлерді есептеудің жаңа әдістемесі жасалды; металдар мен қорытпаларды деформациялауға қолданылатын сайманның қисық сызықты дөңес жұмысшы пішінінің ұтымды өлшемдерін анықтауға мүмкіндік беретін әдістеме жасалды; өзгертетін пішіні бар әр түрлі сайманда соғылманы соққанда кернеулі-деформациялы күйдің,

температураның және энергиякүштік параметрлердің өзгерулерінің негізгі заңдылықтары анықталды және мөлшерлік мәліметтер алынды; ұсақ түйіршікті құрылымды соғылмаларды алуды болжауға мүмкіндік беретін жазық, құрастырылған және радиальды-соғу машинасында соғу процесінің көлемдік математикалық моделі жасалды; өзгеретін пішіні бар соққышты және құрастырылған тәсілді қолданып соғудың деформациялық режимдерінің болат пен қорытпалар құрылымының өзгеруіне әсер етуінің заңдылықтары айқындалды; аспатық болаттың құрылымы мен қасиетіне белгісі өзгермелі деформация мен деформацияланатын металдың температурасының әсер ету заңдылықтары табылды; материалдың қажып бұзылуға төзімділік дәрежесін (МҚБТД) есептеуге керекті жаңа әдістемені жасалды және қажумен бұзылу диаграммасы салынды.

Зерттеу әдістемесі кернеулі-деформацияланған күйдің теориясын және шекті элементтермен процестреді модельдеуді қолдану негізінде жасалған. Математикалық модельдерді жасау үшін және теориялық есептеулерді жүргізу үшін MSC.SuperForge/visualNastran 4D бағдарламалық кешендер қолданылған.

Болатты өндеудің технологиясы, өзгеретін пішіні бар әр түрлі саймандар және осы саймандарда өңделген үлгіліктер зерттеу объектісі болды.

Жүргізілген зерттеулер негізінде болатты деформациялаудың режимін жақсарту және білік пен диск типті соғылмаларды соғу үшін құрал-сайманның жаңа құрылымы құрылымдау жұмыстың практикалық құндылығына жатады. Аталған практикалық құндылық, саны аз ақаулары бар және тұрақты механикалық қасиеттері бар бұйымдарды алуға мүмкіндік берді.

Қорғауға шығарылатын мәліметтерге мыналар жатады: өзгеретін пішіні бар саймандардың ең жақсы құрылымдық, кинематикалық және геометриялық параметрлері; көлемдік кернеулі-деформациялы күйлерді есептеудің жаңа әдістемесі; металдар мен қорытпаларды деформациялауға қолданылатын сайманның қисық сызықты дөңес жұмысшы пішінінің ұтымды өлшемдерін анықтауға мүмкіндік беретін әдістеме; өзгеретін пішіні бар әр түрлі сайманда соғылманы соққанда кернеулі-деформациялы күйдің, температураның және энергиякүштік параметрлердің өзгерулерінің негізгі заңдылықтары және мөлшерлік мәліметтері; ұсақ түйіршікті құрылымды соғылмаларды алуды болжауға мүмкіндік беретін жазық, құрастырылған және радиальды-соғу машинасында соғу процесінің көлемдік математикалық моделі; өзгеретін пішіні бар соққышты және құрастырылған тәсілді қолданып соғудың деформациялық режимдерінің болат пен қорытпалар құрылымының өзгеруіне әсер етуінің заңдылықтары; аспатық болаттың құрылымы мен қасиетіне белгісі өзгермелі деформация мен деформацияланатын металдың температурасының әсер ету заңдылықтары; материалдың қажып бұзылуға төзімділік дәрежесін (МҚБТД) есептеуге керекті жаңа әдістеме және қажумен бұзылу диаграммасы.

Алынған мәліметтердің дұрыстығы. Тәжірибелерді жүргізген кезде алынған мәліметтерді өндеудің ғылыми негізделген әдістемелері, тексерілген жабдықтар мен бақылау-өлшеуші аспаптар қолданылды.

BIYAKAYEVA NURGIL TEMIRGALIYEVNA

Theoretical and technological basis of metal treatment in instrument with a changing working surface

RESUME

doktore's thesis in the specialty

05.03.01 – Technologies and equipment of mechanical and physicotechnical treatment.

General characteristic of problem. A significant place in innovative and industrial development program of republic of Kazakhstan takes scientific investigations directed at the development of new high-performance technologies used in machine-building industry. At the same time the development of new, high-performance technologies and the scales of its practical using nowadays become the most important factors of increasing industrial production efficiency. Thus problem solving of industrial production can not be done without engineering of new technologies, instruments and equipments permitting to get the products of high quality with the least manufacturing costs.

Topicality of the project. At the present time technological processes of forging forged pieces of shafts' and disk type are based on using of traditional forging tools and existing modes of deformation and which are not always ensure production of forged pieces with the required quality level in consideration of formation some surface and internal defects at the bar or development it's defects.

Objectives of work. At the basis of realization of a complex approach based on the strategy of mathematical and physical modeling it is necessary to work out an optimal construction of instruments providing with the getting of favourable scheme of metal deflected mode, to get scientific results of quality management, to generate operating effects, to test new technical and technological decisions directed at the quality improvement of metal goods and also to investigate regularity of fatigue failure of tool steel.

Scientific task of this work is:

- construction development of new instruments ensured nonuniformity deformation decreasing;
- development of new design procedure of solid deflected mode;
- development of new design of an optimal size instrument determination;
- studying of DM regularity dispensing during forging the forged pieces of disk type and shaft in firing pins secured with forging quality improvement;
- development of a solid model forging in firing pins with a changing working surface, combined face on a radial forging machine (RFM) permitting to forecast getting in forging peaces of fine-grained structure shaft type;
- development of a new design procedure of degree of material hardness to a fatigue failure and it's plotting;

- experimental research of physical-mechanical and mechanical properties and die material of a new construction during operating process.

Scientific work's novelty. The results of solving the problem on production engineering improvement of forging and die stamping permitting to enhance product quality are represented in the work:

- regularities of temperature impact, deformation and afterdeformation soaking at metal structure formation are revealed;
- kinematic characteristic and strength properties of instrument construction are determined and the methodic of optimal size determination of curvilinear convex instrument form permitting to decrease deformation granularity is developed;
- quantitative data are gained and basic regularities of DM distribution, temperature and energy-power parameters are revealed during modeling of forging in dies with changing form of working surface;
- a solid mathematics model of forging is developed in dies with changing form of working surface, combined faces and on a radial forging machine permitting to forecast quality of forging product;
- regularities of alternating elastic deformation influence and the temperature of wrought metal on structure changing of tool steel properties are revealed;
- a new design procedure of degree of metal hardness to fatigue damage and it's plotting is developed;
- regularities of forging deformative mode in instrument with changing form and a combined way of steel structure changing and alleys.

Research technique is based on using of deflected mode theory, finite-element modeling of forging processes. MSC.SuperForge/visualNastran 4D software packages are used for mathematic model construction and theoretical calculation.

Test subjects were forging steel technology, instruments with changing form and samples deformed in dies with changing form.

Practical value of work is the following: deformations mode are improved at the base of investigations and new die configurations are developed for forging forged pieces disks type and shaft contributing to get forgings of required form with minimum defects and steady level of mechanical properties.

Statemenets determined for defense:

- kinematic and strength properties tool construction with changing form of working surface;
- rational size methodic determination of curvilinear convex tool working form for steel and alley deformation:
- results of theoretical and research investigations of deflected mode during forging in dies with changing form of working surface;
- methodic of experimental plotting fatigue damage and degree of metal hardness calculation to fatigue damage;
- regularities structure changing of dies with changing form from tool steel;
- rational deformation modes of steel and alleys modes, regularity of changing structure and mechanical properties of metal forging.