

Дмитриева Анастасия Яковлевна

**Совершенствование технологии радиальной ковки цилиндрических
заготовок из спеченного сплава на основе вольфрама**

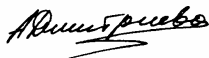
Специальность 05.02.09 –

Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2012 г.

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

Научный руководитель- Власов Андрей Викторович, доктор технических
наук, профессор, Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: Шестаков Николай Александрович, доктор
технических наук, профессор, Московский
государственный индустриальный университет;
Белокопытов Владимир Владимирович, кандидат
технических наук, старший научный сотрудник,
Государственный инжиниринговый центр
«Станкин»

Ведущая организация- ОАО «НПО СПЛАВ»

Защита состоится «19» декабря 2012 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании
диссертационного совета Д212.141.04 в Московском государственном
техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:

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

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Автореферат разослан «19» // 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2011375

Дмитриева А. я. Совершенств

Семенов В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Для целей последующего применения цилиндрической заготовки, изготовленные из сплава на основе вольфрама, должны обладать максимальным сочетанием прочности и пластичности.

Основная роль в повышении прочностных свойств изделия принадлежит процессу радиальнойковки. Процесс осуществляется путем одновременного приложения технологической силы с четырех сторон (небольшие обжатия за один ход). В результате исходная заготовка уменьшается в поперечном сечении и увеличивает свою длину. Из литературных источников известно, что в зависимости от технологических параметров и формы бойков возможна различная реализация напряженного состояния – от всестороннего неравномерного сжатия до создания растягивающих напряжений в осевой части, что может способствовать разрушению материала.

Анализ литературных источников (работы Тюрина В.А., Лазоркина В.А., Радюченко Ю.С., Экарева М.С. и др.) показал, что не существует в настоящий момент общепризнанных технологических рекомендаций, которые бы обеспечивали решение поставленной задачи. Известно, что изменением технологических режимов и формы бойков можно добиться существенной интенсификации процесса, однако рекомендации носят полуэмпирический характер и не могут быть распространены на конкретный случай без значительного объема расчетно-экспериментальных работ. Практических рекомендаций по ковке тяжелых сплавов на основе вольфрама в технической литературе не обнаружено.

Теория процессовковки основана на методе линий скольжения. Этот метод обоснован только для задач плоского деформированного состояния, поэтому для процессов радиальнойковки он может быть использован только с большими допущениями. Обычно рассматривают два сечения – поперечное по линии раздела течения и продольное, в каждом из которых деформированное состояние считают плоским. Однако в действительности напряженно-деформированное состояние в очаге пластической деформации является объемным, поверхность раздела течения не является плоской. Метод не позволяет учесть также особенностиковки на радиально-ковочных машинах, имеющих осевой подпор. Поэтому рекомендации, полученные на основе анализа процесса методом линий скольжения, носят общий характер и не могут быть использованы для оптимизации исследуемого процесса.

Для разработки проектных решений, позволяющих с достаточной точностью прогнозировать получение требуемых свойств, необходимо знать напряженно-деформированное состояние (НДС).

Для разработки проектных решений позволяющих, с достаточной точностью прогнозировать получение требуемых свойств, необходимо знать НДС. Единственным методом, позволяющим решать задачи определения НДС в общей постановке в любой момент времени, является метод конечных элементов.

Решение задачи методом конечных элементов требует знания реологических свойств материала, в частности, кривой упрочнения, диаграммы пластичности. В технической литературе отсутствуют подобные сведения для исследуемого материала.

Анализ приведенных выше данных свидетельствует, разработка научно-обоснованной методики расчета технологического процесса радиальнойковки детали типа ось является актуальной задачей.

Цель работы: На основе теоретического и экспериментального исследования процессов радиальнойковки разработать научно-обоснованные рекомендации по определению режимов технологического процесса радиальнойковки цилиндрических заготовок из сплава на основе вольфрама и параметров технологического инструмента, обеспечивающих максимальную прочность и пластичность готовой детали.

Задачи исследования:

1. Разработка конечно-элементной модели процесса радиальнойковки, позволяющей определить НДС заготовки в произвольный момент времени в произвольном ее сечении и учитывающей особенности процесса.
2. Разработка методики прогнозирования поврежденности металла при радиальнойковке по результатам расчета НДС.
3. Разработка методики прогнозирования механических свойств материала после радиальнойковки.
4. Верификация конечно-элементной модели.
5. Разработка регрессионной модели зависимости механических свойств от варьируемых параметров технологического процесса.
6. Разработка практических рекомендаций по выбору режимов радиальнойковки, обеспечивающих требуемые параметры прочности и пластичности изделия при отсутствии разрушения.

Методика проведения исследования:

Для проведения теоретического исследования был использован метод конечных элементов в программном комплексе DEFORM3D. Для оценки поврежденности материала в процессековки были использованы методики Дея, Огородникова, Кокрофта и Лэзема. Экспериментальное определение механических свойств материала выполнено на испытательной машине INSTRON DX600 с использованием специально разработанной программы обработки данных. Радиальнаяковка изделия выполнена на радиально-ковочной машине модель K03.9.32.03 в реальных производственных условиях.

Научную новизну данной работы имеют следующие результаты:

1. Конечно-элементная модель технологического процесса радиальнойковки сплава, учитывающая особенности процесса радиальнойковки.
2. Особенности НДС процесса радиальнойковки в произвольный момент времени в произвольном месте.
3. Методика прогнозирования поврежденности металла при радиальнойковке, учитывающая тензорный характер накопления повреждений.

4. Методика прогнозирования численных значений прочности и пластичности детали после радиальнойковки.

Практическую значимость составляет рекомендации по выбору технологических режимов, обеспечивающих требуемые значения прочности и пластичности.

Апробация работы:

Основные положения работы доложены и обсуждены на следующих семинарах:

- Международная научно-практической конференции «Инженерные системы 2009, 2010, 2011». Москва, Российский университет дружбы народов, 2009 г., 2010 г., 2011 г.
- Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010 г.
- X Конгресс «Кузнец-2010». Рязань, ОАО «Тяжпрессмаш», 2010г.
- Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая научная весна 2009: Машиностроительные технологии». Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009 г.

Публикации

Основное содержание диссертационной работы изложено в 7 опубликованных работах, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы и приложений. Текст диссертации содержит 155 машинописных страницах, включая 20 таблиц и 56 рисунков.

На защиту выносятся следующие основные положения:

- Разработанная математическая модель учитывает основные особенности технологического процесса радиальнойковки сплава и позволяет адекватно прогнозировать НДС заготовки.
- Разработанная методика и программа расчета поврежденности по критерию Г.Д.Деля, учитывающая тензорный характер накопления повреждений, позволяет прогнозировать поврежденность металла в процессе радиальнойковки.
- Разработанная методика прогнозирования численных значений прочности и пластичности детали после радиальнойковки позволяет определить искомые значения с удовлетворительной точностью.
- Определенные параметры технологического процесса и рабочего инструмента позволяют увеличить прочность и пластичность готовой детали по сравнению с существующим процессом.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены основные технологические особенности процесса радиальнойковки. Радиальнаяковка - процесс, при котором

используются два и более перемещающихся навстречу друг другу инструмента для создания валов с постоянным или переменным диаметром по всей длине или труб с изменениями внутренних или внешних размеров. При радиальной ковке с использованием 4-х бойков металл в очаге деформации находится в состоянии всестороннего неравномерного сжатия, что позволяет увеличить его технологическую пластичность. Деформация заготовки проводится в результате приложения большого числа обжатий одновременно по всему периметру заготовки с относительно малой степенью деформации за одно обжатие бойками, расположенными в одной плоскости и сходящимися в радиальном направлении. Обжатия следуют друг за другом с частотой 150-2000 ходов в минуту в зависимости от модели машины. Точность поковок обеспечивается наладкой машины, имеющей жесткую характеристику в отличие от традиционного ковочного оборудования, приспособленного для многообразных операций (протяжка, осадка, рубка и др.).

Ротационное обжатие, осуществляемое на сравнительно малых участках (рис. 1.), характеризуется перемещением небольших объемов металла. Заготовка непрерывно подается в зону деформирования с продольной подачей.

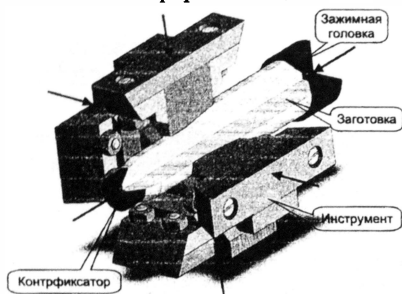


Рис. 1. Схема деформирования заготовки при радиальной ковке

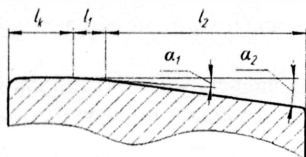


Рис. 2. Геометрические параметры инструмента

Радиальное обжатие обеспечивает возможность формоизменения материалов без разрушения до значительных величин деформации; более высокую производительность, чем при традиционной ковке на быстроходных гидропрессах; высокую точность получаемых изделий и низкую шероховатость поверхности; снижение потребления энергии за счет исключения многократных подогревов; повышение качества структуры металла поковок и уровня их механических свойств.

Параметры инструмента, влияющие на технологический процесс (рис. 2.):

- С увеличением угла заходного конуса α возрастает степень неравномерности деформации в очаге формоизменения. При этом происходит снижение потребной деформирующей

силы, но ухудшаются условия захвата.

- Калибрующий участок l_k оказывает влияние на чистоту поверхности и точность обработки, предельную степень деформации, величину деформирующего усилия, стойкость инструмента.

- Второй заходный конус α_2 способствует увеличению срока службы бойка

- При малом угле охвата θ может возникать усиленное продольное

скручивание обрабатываемого прутка.

– Участок заходного профиля с углом наклона α_1 рекомендуется принимать $2...4^\circ$, длина $l_1 = (0.1...0.15)d_2$.

– Участок заходного профиля с углом наклона α_2 рекомендуется принимать $6...10^\circ$.

Для разработки практических рекомендаций по оптимальным режимам радиальнойковки проводят исследования НДС металла, а также определяют удельные силы деформирования.

Для определения границ очага деформации и расчета НДС при плоской деформации используется метод неравноценных полей линий скольжения. Неравноценные поля строят для трехмерного очага деформаций, дважды применяется допущение о плоской деформации для двух взаимно перпендикулярных сечений очага (поперечное и продольное). Однако в действительности НДС в очаге пластической деформации является объемным, поверхность раздела течения не является плоской. Согласно анализу на основе метода линий скольжения при ковке на РОМ деформация металла в осевой зоне продольного сечения заготовки осуществляется за счет потоков вытеснения; очаг деформации в поперечном сечении не распространяется до осевой зоны. Однако этот метод не позволяет учесть основные особенности радиальнойковки. На практике в осевой зоне могут возникать трещины, что не может быть получено в методе линий скольжений, поэтому рекомендации, полученные на основе анализа процесса, носят общий характер и не могут быть использованы для оптимизации исследуемого процесса.

Для определения прочности и пластичности материала после деформации требуется создание программных средств для прогнозирования израсходованного ресурса пластичности (поврежденности) заготовки в процессе ее пластической деформации.

В настоящий момент не существует общепризнанной методики прогнозирования разрушения металлов при больших пластических деформациях. Такое положение обосновано тем, что отсутствует и общепризнанная, подтвержденная экспериментальными исследованиями, теоретическая основа, объясняющая процесс возникновения нарушений сплошности материала.

Наиболее гибкими и имеющими лучшее соответствие экспериментальным данным, по мнению ряда авторов, являются критерий разрушения В.Л. Колмогорова, критерии Г.Д. Деля, В.А. Огородникова и модель накопления поврежденности А.А. Богатова.

Как показали расчеты, критерии Колмогорова и Огородникова хорошо описывают технологические процессы, в которых показатель жесткости изменяется плавно по ходу процесса. Они являются скалярными и не учитывают возможную анизотропию накопления повреждений. Однако экспериментальные данные свидетельствуют, что накопление повреждений зависит от направления деформации, и при смене ее знака накопленные дефекты могут частично залечиваться.

Этот факт учитывается тензорным деформационным критерием Г.Д.Деля. Г.Д.Дель предположил, что накопление повреждений анизотропно и зависит от кривизны траектории деформаций в пространстве деформаций. Степень поврежденности в пространственных направлениях определяется тензором повреждений Ψ , компоненты которого определяют по формуле:

$$\psi_{ij} = \int_0^{\bar{\epsilon}_i} F(\bar{\epsilon}_i, \eta) \beta_{ij} d\bar{\epsilon} \quad (1)$$

Здесь $\bar{\epsilon}_i$ - накопленная деформация к моменту времени t .

$$\bar{\epsilon}_i = \int d\bar{\epsilon} \quad (2)$$

Функция $F(\bar{\epsilon}_i, \eta)$ имеет вид:

$$F(\bar{\epsilon}_i, \eta) = \frac{1 - \alpha}{\bar{\epsilon}_0(\eta)} + \frac{2\alpha\bar{\epsilon}_i}{\bar{\epsilon}_0^2(\eta)} \quad (3)$$

где α - коэффициент, отражающий нелинейность накопления повреждений. Значение $\alpha = 0$ соответствует гипотезе линейного накопления повреждений. Г.Д.Дель на основании проведенных им опытов рекомендует $\alpha = 0.5$. β_{ij} - компоненты направляющего тензора скоростей деформаций (постоянны при простом нагружении).

Условие появления макротрещины (условие разрушения) является равенство единице модуля тензора повреждений:

$$\Psi = \sqrt{\psi_{ij}\psi_{ij}} = 1, \quad (4)$$

Приведенные выше результаты обзора технической литературы по исследуемой проблеме позволяют сформулировать следующие **задачи исследования**:

- Разработать математическую модель для конечно-элементного моделирования процесса радиальнойковки на радиально-ковочной машине, учитывающую основные технологические и конструктивные параметры, влияющие на изменение механических свойств материала.
- Разработать методику и программу для расчета поврежденности материала после радиальнойковки, использующую результаты конечно-элементного моделирования.
- Разработать методику прогнозирования механических свойств псевдосплава после его радиальнойковки.
- Определить механические свойства материала (диаграмма пластичности), необходимые для выполнения математического моделирования и прогнозирования свойств после радиальнойковки.
- Провести верификацию созданной модели.
- Используя полученную конечно-элементную модель, проанализировать влияние технологических режимов и параметров инструмента на механические свойства материала после радиальнойковки.
- Используя метод планирования эксперимента и разработанную математическую модель определить оптимальные технологические режимы.

Во второй главе разработана конечно-элементная модель процесса радиальнойковки тяжелых сплавов на основе вольфрама и методика прогнозирования механических характеристик. При создании модели радиальнойковки сделаны следующие допущения:

- Бойки во время рабочего хода движутся навстречу друг другу с постоянной скоростью. Процессами, происходящими за время хода приближения бойков, пренебрегаем.
- Бойки считаем абсолютно жесткими, тепловой процесс установившимся.
- Влияние контрфиксатора учитываем действием постоянной силы поджатия, приложенной к абсолютно жесткому элементу, находящемуся в постоянном контакте с заготовкой.
- Зажимная головка представлена в виде подпружиненного абсолютно-жесткого элемента, находящегося в постоянном контакте с заготовкой. Жесткость упругой связи рассчитана как жесткость привода зажимной головки.
- Возможностью проскальзывания заготовки в продольном и угловом направлениях в начале и конце рабочего хода бойков пренебрегаем.
- Считаем, что между двумя ударами заготовка подается дискретно на величину продольной и угловой подачи.
- Продольная подача моделируется методом обращенного движения за счет синхронного продольного перемещения бойков между ударами на величину хода подачи в сторону, противоположную направлению подачи.
- Угловая подача моделируется поворотом заготовки как жесткого целого на угол поворота зажимной головки за один ход бойка.
- Моделируется часть заготовки до момента выхода процесса на установившийся режим.

При помощи конечно-элементной модели было проведено исследование НДС в произвольный момент времени в произвольном месте. Из анализа НДС видно, что процесс деформирования заготовки можно разделить на две стадии: неустановившаяся и установившаяся (рис. 3.). Деформации при обработке заготовки проникают в осевую зону.

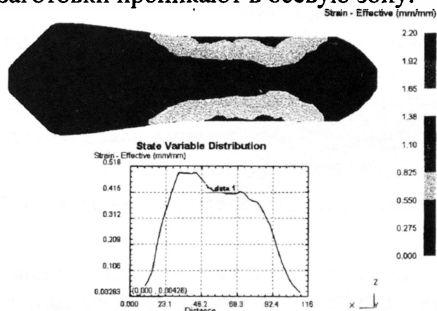


Рис. 3. Стадии деформирования заготовки

В работе была спроектирована методика прогнозирования механических свойств материала по результатам конечно-элементного моделирования процесса радиальнойковки в программном комплексе DEFORM3D. Основной целью методики является прогнозирование предела прочности (временного сопротивления) материала σ_B и относительного удлинения при разрыве δ после процесса

радиальнойковки по результатам моделирования процесса в ПК DEFORM3D.

Основные допущения, принятые в методиках:

- Материал является компактным, изменением плотности материала в процессе обработки пренебрегаем, т.к. величина относительной плотности используемого материала составляет 99%.
- Считаем справедливой гипотезу «единой кривой».
- Упрочнение материала в процессе деформации – изотропное.
- Поскольку деформация на фазе равномерной деформации для образцов, вырезанных из откованных заготовок, в опытах на растяжение согласно опытам не превышает 5% и разрушение осуществляется без образования шейки, то прогнозируемый предел прочности приближенно равен напряжению текучести при достигнутом уровне накопленной деформации по «единой кривой».

Исходные данные, необходимые для реализации методики:

- Математическое описание кривой упрочнения материала, построенной по результатам опытов на сжатие исходного материала. Для ввода данных в ПК DEFORM3D следует использовать кусочно-линейную или степенную аппроксимацию.

- Математическое описание диаграммы пластичности материала.

Для прогнозирования момента разрушения использован деформационный тензорный критерий Г.Д.Деля. При одноосном растяжении критерий Деля

сводится к $\psi = \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_{op}}$, здесь ε_{op} – предельная накопленная пластическая

деформация в момент разрушения в опытах на растяжение; $\bar{\varepsilon}$ - накопленная пластическая деформация (критерий Одквиста).

**Алгоритм прогнозирования свойств заготовки после первойковки
выглядит следующим образом:**

- Выполнение физических опытов на растяжение – определение относительного удлинения в момент разрушения δ .

- Выполнение моделирования опыта на растяжение до относительного удлинения δ с определением накопленной деформации ε_{op}

- Выполнение опытов на сжатие до появления трещин

- Построение диаграммы пластичности $\sigma_i = f(\bar{\varepsilon})$ на основе опытов на растяжение и сжатие.

- Выполнение моделирования процесса радиальнойковки с последующей постпроцессорной обработкой по подпрограмме для определения накопленной деформации $\bar{\varepsilon}_M$, поврежденности по Делю Y_M в интересующем сечении.

- Определение остаточного ресурса пластичности материала послековки $Y_{pd} = 1 - Y_M$

- Моделирование опыта на растяжение образца из предварительно прокованного материала с заданием достигнутой накопленной деформации в качестве исходных данных $\bar{\varepsilon}_M$.

– Прогноз относительного удлинения послековки осуществляется по моменту достижения остаточного ресурса пластичности Y_{pa} при моделировании опыта на растяжение. $\delta = \frac{\Delta L_2}{L_0}$. Здесь ΔL_2 - перемещение инструмента в момент достижения ресурса пластичности Y_{pa} , L_0 - база испытаний.

Прогноз предела прочности материала послековки: $\sigma_R \approx \sigma_{max} = \sigma_*(\bar{\epsilon}_M)$

В третьей главе проведены экспериментальные исследования. Для определения кривой упрочнения проводится испытание на растяжение. Испытание проводят на испытательных машинах, при этом снимается машинная диаграмма. По полученным диаграммам строится кривая упрочнения. Т.к. в процессековки локальные накопленные деформации достигают 200% и более, для построения кривой упрочнения следует выполнить опыты на осадку. Опыты на осадку были проведены на испытательной машине Instron DX600. В работе используется упрощенная расчетно-экспериментальная методика построения диаграмм пластичности по результатам опытов на осадку и одноосное растяжение.

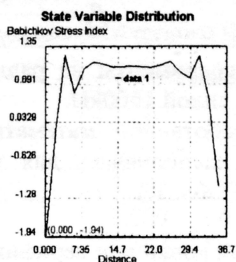


Рис. 4. Распределение жесткости напряженного состояния η в опыте на растяжение

превышает 1 (рис. 4.), поэтому среднеинтегральное значение принимаем равным 1 (теоретическое значение при одноосном растяжении).

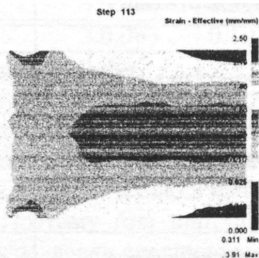


Рис. 5. Распределение накопленных деформаций в опыте на сжатие

одноосном сжатии.

По результатам опыта на растяжение перемещение захватных органов машины (абсолютная пластическая деформация образца) составила 5.87 мм. Для этого момента моделирования накопленная пластическая деформация составляет 0.369. Жесткость напряженного состояния в центре незначительно

По результатам опытов на сжатие момент появления трещин на бочке соответствовал высоте образца 5.7 мм. Для этого момента моделирования накопленная пластическая деформация в бочке составила 0.916 (рис. 5.).

Жесткость напряженного состояния для этого момента в опасной точке равна -0.2, что значительно отличается от -1 при

Путь деформирования для опасной точки приведен на рис. 6. Среднеинтегральное значение жесткости напряженного состояния за операцию составляет -0.6.

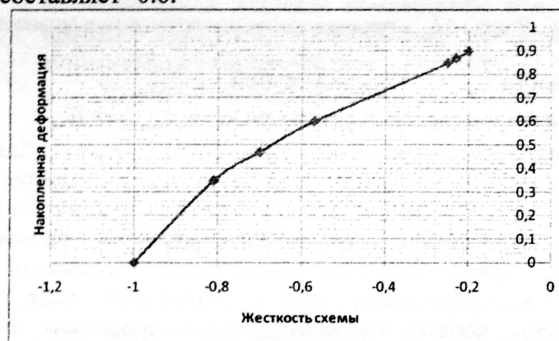


Рис. 6. Путь деформирования в опыте на сжатие

Таким образом, для построения диаграммы пластичности имеем две точки:

$$\bar{\varepsilon}_{01} = 0.369, \eta_1 = 1;$$

$$\bar{\varepsilon}_{02} = 0.916, \eta_2 = -0.58.$$

Коэффициенты аппроксимации рассчитываем по формулам:

$$\beta_1 = \frac{\ln \frac{\bar{\varepsilon}_{01}}{\bar{\varepsilon}_{02}}}{\eta_1 - \eta_2} = -0.575;$$

$$\beta_0 = \frac{\bar{\varepsilon}_{01}}{\exp(\beta_1 \cdot \eta_1)} = 0.656$$

В ходе работы были проведены эксперименты на радиально-ковочной машине модель K03.9.32.03 с номинальной силой 1600кН.

Была проведена верификация разработанной математической модели радиальнойковки. Верификация модели выполнялась для технологических режимов, соответствующих эксперименту (табл. 1.).

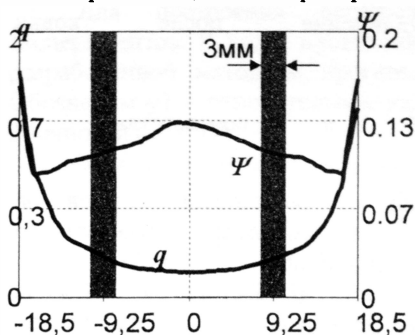
Таблица 1.

Технологические режимы радиальнойковки при верификации модели

Скорость перемещения зажимной головки (продольная подача)	200 мм/мин
Угол раствора ромбических бойков	155°
Угол поворота заготовки между двумя обжатиями	14.68°
Исходный диаметр заготовки	45 мм
Диаметр заготовки послековки	37 мм
Угол заходного конуса профиля инструмента	80°
Угол второго конуса профиля инструмента	40°
Длина калибрующего пояса профиля инструмента	8 мм
Длина второго конуса профиля инструмента	6 мм

При обработке результатов моделирования определены значения накопленных деформаций и поврежденности в 8 виртуальных образцах

диаметром 3 мм, ось которых расположена на расстоянии 0.5R изделия.



Расчеты показывают, что измеряемые величины распределены по сечению неравномерно. Максимум и минимум накопленной деформации и поврежденности расположены на внутренней и внешней границах виртуальных образцов (рис. 7.).

В каждом сечении определяли максимальную и минимальную величины, которые затем усредняли по 8 виртуальным образцам

Рис. 7. Изменение накопленной деформации q и поврежденности ψ внутри виртуальных образцов

Таблица 2.

Результаты математического моделирования при верификации модели

№ образца	Поврежденность			Накопленная деформация		
	0.5R -1.5мм	0.5R	0.5R +1.5мм	0.5R -1.5мм	0.5R	0.5R +1.5мм
1	0.097	0.103	0.108	0.33	0.369	0.406
2	0.089	0.099	0.112	0.336	0.373	0.413
3	0.094	0.104	0.115	0.328	0.362	0.396
4	0.097	0.104	0.110	0.308	0.344	0.397
5	0.098	0.107	0.114	0.33	0.352	0.374
6	0.097	0.103	0.112	0.323	0.353	0.378
7	0.087	0.096	0.104	0.356	0.382	0.408
8	0.088	0.095	0.103	0.328	0.365	0.402
Среднее	0.093	0.101	0.110	0.330	0.363	0.397
отклонение от центра	8%		-8%	10%		-9%

Анализ результатов показывает, что наиболее существенно по сечению изменяется накопленная деформация. При виртуальном эксперименте технически очень сложно реализовать такое неравномерное распределение параметров нагрузки по сечению в начальный момент как исходные данные для моделирования. Поэтому при виртуальном опыте на растяжение в качестве исходных данных задавали среднюю максимальную накопленную деформацию, равную 0.397 (табл. 2).

Остаточный ресурс пластичности $Y_{pa} = 1 - Y_M = 1 - 0.110 \approx 0.89$

В соответствии с методикой, изложенной во второй главе, выполнено моделирование опыта на растяжение предварительно откованного материала.

Перемещение инструмента для этого момента времени составляет 2.4 мм, тогда прогнозируемое относительное удлинение послековки составляет $\delta = \frac{\Delta L_2}{L_0} = \frac{2.05 \text{ мм}}{15 \text{ мм}} = 13.7\%$

Прогноз предела прочности в соответствии с методикой $\sigma_{\epsilon} \approx \sigma_{\text{max}} = 1458 \text{ МПа}$.

Отклонение прогнозируемых величин от результатов опытов на растяжение образцов, вырезанных из откованных заготовок, составляет: по пределу прочности +6.8%; по относительному удлинению +9.5%.

Анализ результатов показывает, что разработанные модель технологического процессаковки и методика прогнозирования механических свойств материала по результатам моделирования удовлетворительно воспроизводят реальный технологический процесс.

В четвертой главе проводится анализ результатов эксперимента по варьированию параметров технологического процесса холодной радиальнойковки для ромбического деформирующего инструмента.

Для составления матрицы плана экспериментов требуется задать уровни варьирования каждого фактора (табл. 3.).

Таблица 3.

Факторы и уровни их варьирования.

	Фактор	X_i	F_i
	Шаг подачи	0.1 мм	0
		0.2 мм	1
		0.3 мм	2
		0.4 мм	3
	Геометрический угол охвата	115^0	0
		135^0	1
		155^0	2
		175^0	3
	Угол поворота заготовки	13^0	0
		26^0	1
		39^0	2
		52^0	3
	Угол первого заходного конуса α_1	2^0	0
		3^0	1
		4^0	2
	Угол второго заходного конуса α_2	8^0	0
		10^0	1
		12^0	2
	Длина калибрующего пояска	3.4 мм	0
		5.1 мм	1
	Диаметр детали	37 мм	0
		35 мм	1

По построенной таблице плана эксперимента было проведено математическое моделирование. По его результатам, были определены

оптимальные параметрыковки на радиально-обжимных машинах.

Для построения регрессионных моделей было проведено 16 экспериментов. В ходе проведения экспериментов определяются с помощью разработанной методики прогнозирования значения механических свойств. Обозначим y_1 – относительное удлинение δ , %; y_2 – прогнозируемый предел прочности σ_B , МПа.

В табл. 4 приведены результаты виртуальных экспериментов.

Таблица 4.

Исходные результаты экспериментов и моделей

№ опыта	y_1	y_2
1	16	1290
2	12.7	1640
3	12.3	1670
4	13.7	1570
5	14.7	1440
6	12.3	1640
7	12.7	1610
8	14.7	1440
9	14.7	1490
10	14.3	1390
11	13	1390
12	13.7	1490
13	13.7	1510
14	14.3	1390
15	14.3	1440
16	14.3	1430

Математическая модель относительного удлинения с учетом значимости коэффициентов принимает вид:

$$y_1 = 12.62 + 0.075x_1 - 0.205x_2 + 0.135x_3 + 0.008x_4 + 0.049x_5 + 0.0875x_6 - 0.056x_1^2 - 0.047x_2^2 + 0.0156x_3^2 + 0.007x_4^2 + 0.014x_5^2 - 0.0125x_1^3 + 0.025x_2^3 - 0.01x_3^3$$

Математическая модель предела прочности с учетом значимости коэффициентов принимает вид:

$$y_2 = 1406.58 + 19.56x_1 + 41.08x_2 + 6.41x_3 + 3.05x_4 + 0.18x_5 - 19.94x_6 + 7.8x_1^2 + 13.05x_2^2 - 5.6x_4^2 - 3.85x_5^2 - 4.34x_6^2$$

Для того чтобы найти значения технологических параметров, обеспечивающих максимальное значение предела прочности послековки и относительного удлинения после испытания на растяжения, введем дополнительную функцию φ :

$$\varphi(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = A \cdot y_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) + B \cdot y_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$$

В качестве коэффициентов A и B выберем следующие:

$A = \frac{1}{\bar{\delta}_{\text{эсп}}}; B = \frac{1}{\bar{\sigma}_{\text{эсп}}}$ Значения относительного удлинения и прочности выбираем максимальными из проведенных испытаний. $\bar{\delta}_{\text{эсп}} = 13.8\%$; $\bar{\sigma}_{\text{эсп}} = 1400 \text{ МПа}$

После обработки данных в программном пакете Excel были получены параметры, обеспечивающие максимальное сочетание относительного удлинения при разрыве и предела прочности (табл. 5). Эти параметры технологического процесса холодной радиальнойковки можно принять оптимальными.

Таблица 5.

Технологические параметры при максимальном ($\delta + \sigma_B$).

Шаг подачи, мм	0.4
Геометрический угол охвата	129°
Угол поворота заготовки	49.4°
Угол первого заходного конуса α_1	2.95°
Угол второго заходного конуса α_2	8°
Длина калибрующего пояска, мм	5
Диаметр детали послековки, мм	35
Относительное удлинение δ (регрессионная модель), %	14.9
Предел прочности σ_B (регрессионная модель), МПа	1623

После проведения моделирования с оптимальными технологическими параметрами и сравнения результатов, полученных с помощью моделирования и использования регрессионных моделей, было получено что при моделировании и расчете на основе регрессионных моделей погрешность расчета для относительного удлинения составляет 2.5%, а для прогнозируемого предела прочности 1.3%. При помощи разработанной методики были подобраны режимы работы радиально-ковочной машины и геометрия ромбического инструмента для процесса холодной радиальнойковки, которые позволяют получить максимальные значения по сравнению с базовым технологическим процессом. При использовании ромбического инструмента с геометрическими параметрами, приведенными в таблице 5, относительное удлинение составила $\delta = 15.3\%$, предел прочности $\sigma_B = 1645 \text{ МПа}$. По сравнению с базовым технологическим процессом предел прочности больше на 17.3%, относительное удлинение при растяжении на 7.8%.

Общие выводы по работе:

1. Разработанная конечно-элементная модель технологического процесса радиальнойковки позволяет учесть основные технологические особенности процесса. Сравнение результатов расчета и натурного эксперимента свидетельствуют об адекватности модели.
2. Анализ результатов НДС при радиальнойковки по результатам конечно-элементного моделирования показывает, что деформация металла:
 - в продольном сечении заготовки имеет две зоны: зона установившегося режима и зона неустановившегося режима;

– в продольном сечении в начальный момент времени для радиально-ковочных машин с осевым подпором движение металла однопоточное, при увеличении степени деформации движение металла становится двухпоточным;

– в поперечном сечении в начальный момент деформирования деформация не проникает в осевую зону и осуществляется за счет вытеснения металла навстречу движению бойков;

– в поперечном сечении в конечной стадии деформирования деформация проникает в осевую зону и осуществляется за счет двух потоков вытеснения.

3. Погрешность определения степени использования запаса пластичности материала по критерию Г.Д.Деля с использованием разработанных алгоритма и программы расчета по результатам конечно-элементного моделирования на операциях протяжки, кручения по сравнению с аналитическими решениями не превышает 2%.

4. Разработанная методика прогнозирования механических свойств позволяет прогнозировать механические свойства материала после радиальнойковки с удовлетворительной для практических расчетов точностью. Результаты экспериментальных исследований показали, что отклонение предела прочности и относительного удлинения от результатов опытов на растяжение образцов, вырезанных из откованных заготовок, составляет: по пределу прочности +6.8%; по относительному удлинению +9.5%

5. Полученная диаграмма пластичности для сплава на основе вольфрама позволяет осуществить прогнозирование поврежденности образца в процессе радиальнойковки по результатам конечно-элементного моделирования.

6. В работе были проведены испытания механических свойств образцов, полученных послековки на радиально-ковочной машине. По результатам проведенных испытаний можно сделать вывод, что сочетание, позволяющее получить максимальное относительного удлинения и максимальную прочность (11.3% и 1390МПа) соответствует следующим технологическим режимам машины: проков на диаметр 35 мм; продольная подача – 300 мм/мин; частота вращения 32 об/мин.

7. Полученная регрессионная модель для определения относительного удлинения и предела прочности позволяет с высокой точностью предсказывать результаты конечно-элементного моделирования. Погрешность расчетов в оптимальной точке для относительного удлинения составляет 2.5%, а для прогнозируемого предела прочности 1.3%.

8. Разработанная регрессионная модель позволяет определить оптимальные параметры технологического процесса для нахождения максимального относительного удлинения, максимального предела прочности и максимального сочетания предела прочности и относительного удлинения без выполнения математических и физических экспериментов.

9. При помощи разработанной методики были подобраны режимы работы радиально-ковочной машины и геометрия ромбического инструмента для процесса холодной радиальнойковки, которые позволяют получить максимальные значения по сравнению с базовым технологическим процессом.

Наилучшее сочетание прочности (предел прочности $\sigma_B=1645$ МПа) и пластичности (относительное удлинение $\delta=15.3\%$) достигается при следующих технологических режимах радиальнойковки в ромбических бойках: геометрический угол охвата $\theta - 129^\circ$, угол первого заходного конуса $\alpha_1 - 2.96^\circ$, угол второго заходного конуса $\alpha_2 - 8^\circ$, длина калибрующего пояса – 5 мм, скорость подачи заготовки – 400мм/мин, частота вращения заготовки – 138.9 об/мин, проков заготовки до диаметра 35 мм. По сравнению с базовым технологическим процессом предел прочности увеличен на 17.3%, относительное удлинение при растяжении на 7.8%.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Власов А.В., Погорильчук (Дмитриева) А.Я. Определение оптимальных параметров технологического процесса радиальнойковки // Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2009, №9. URL. <http://tecnomag.edu.ru/doc/132181.html>
2. Власов А.В., Дмитриева А.Я. Методика определения механических свойств изделия после холодной радиальнойковки в программном комплексе DEFORM3D // Заготовительные производства в машиностроении.-2011.-№11. - С. 21-25.
3. Дмитриева А.Я. Прогнозирование механических свойств изделия после холодной радиальнойковки по результатам конечно-элементного моделирования // Известия ВУЗов. Сер. Машиностроение.-2011.- № 7. - С. 35-38.
4. Власов А.В., Дмитриева А.Я. Влияние параметров процесса радиальнойковки на механические свойства изделия // Будущее машиностроения России. Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов: Сб. ст./-2010.-М. – С. 56-58.
5. Дмитриева А.Я. Определение влияния угла охвата заготовки при радиальнойковке на механические свойства изделия при помощи программного комплекса DEFORM3D // Инженерные системы – 2010. Труды Международной научно-практической конференции: - М., 2010.-С. 105-110.
6. Власов А.В., Погорильчук (Дмитриева) А.Я. Моделирование технологического процесса радиальнойковки в программном комплексе DEFORM3D Труды Международной научно-практической конференции // Инженерные системы – 2009: - М., 2009.-С. 108-112.
7. Власов А.В., Дмитриева А.Я. Методика прогнозирования механических свойств после холодной радиальнойковки по результатам конечно-элементного моделирования // Инженерные системы – 2011. Труды Международной научно-практической конференции: - М., 2011.-С. 103-108.