

На правах рукописи



Вовченко Арменак Владимирович

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЪЁМНОЙ ШТАМПОВКИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ГРАНИЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.02.09—«Технологии и машины обработки давлением»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена:

в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (СПбГПУ, г. Санкт-Петербург) на кафедре «МиТОМД» и в ФГБОУ ВПО «Донской государственный технический университет» (ДГТУ, г. Ростов-на-Дону) на кафедре ИТПФ.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Резников Юлий Наумович.

Официальные оппоненты:

- Золотов Александр Максимович, доктор технических наук, профессор, СПбГПУ, кафедра ПОМ, профессор;
- Сосенушкин Евгений Николаевич, доктор технических наук, профессор, МГТУ «Станкин», кафедра СПД, заведующий кафедрой;
- Яковлев Сергей Сергеевич, доктор технических наук, профессор, ТулГУ, кафедра МПФ, заведующий кафедрой.

Ведущая организация: ОАО «Роствертол» (г. Ростов-на-Дону)

Защита состоится «18» июня 2013 г., в 16 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.229.19 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (СПбГПУ) по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, лабораторно-аудиторный корпус, аудитория кафедры МиТОМД.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке СПбГПУ.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2013 г.

Ваш отзыв на автореферат (2 экз.), заверенный гербовой печатью, просим высылать по указанному адресу учёному секретарю диссертационного совета Д212.229.19.

E-mail: A_Vovchenko@mail.ru

Учёный секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Востров Владимир Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Качество продукции и эффективность заготовительного производства в значительной мере определяются уровнем расчётных методик, используемых в проектировании технологических процессов (ТП), что в полной мере относится к кузнечно-штамповочному производству (КШП). В частности, эффективность КШП и качество его продукции существенно зависят от реализуемой технологической схемы, методов её проектирования (расчётов и схем их применения в моделировании) и достигаемых основных параметров процессов, таких как расход металла, расход энергии на ТП и показателей структурной однородности получаемой поковки.

Развитие методов проектирования технологических процессов КШП за последние годы выдвинуло на первый план численные методы математического анализа. К ним, прежде всего, следует отнести метод конечных элементов (МКЭ) и метод граничных элементов (МГЭ), которые почти заменили традиционные методы теории обработки металлов давлением (ОМД), в первую очередь, такие как метод линий скольжения (МЛС) и приближённый энергетический метод – метод верхней оценки (МВО). Такое замещение позволило более полно и точно учитывать реальные реологические свойства материала, размеры и все особенности формы изделий, обрабатываемых давлением.

Важно, что МКЭ и МГЭ не рассматриваются в исследованиях как конкурирующие, а дополняют друг друга, что даёт возможность использовать эффективность каждого из них. Так МГЭ, применяемый в работе, имеет достоинства, состоящие не только в снижении размерности (редукции) расчётной задачи, достигаемом определением параметров, прежде всего, на границе расчётной области, а внутри её – преимущественно в точках, интересующих пользователя, но и позволяет реализовать обратный подход в моделировании процессов штамповки, базирующийся на применении непосредственной схемы обратного (реверсного) нагружения. В результате, по требуемой форме готовой поковки, направленно определяются рациональные и оптимальные параметры процессов штамповки (формы заготовок, полуфабрикатов, заготовительных ручьёв и пр.).

Актуальность темы диссертации определяется тем, что благодаря современному методу моделирования технологических процессов пользователю предоставляется возможность научно обоснованно определять их основные параметры (прежде всего низкий расход металла, энергии и высокое качество штампуемых изделий, в первую очередь – по равномерности распределения деформации в готовых поковках) ещё на стадии их проектирования.

Диссертационная работа выполнена на кафедрах «Информационные технологии пластического формоизменения» (до 1.09.2010 г – «Машины и технология ОМД») Донского государственного технического университета (ДГТУ), в соответствии с планами научно-технических госбюджетных работ в период с 1996 по 2012 г, и «Машины и технология обработки металлов давлением» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ) с 2012 г, а также в рамках участия, отмеченного в последствии – званием лауреата (20.10.2006 г), в конкурсе работ «Фундаментальные и прикладные проблемы современной техники» им. акад. И.И. Воровича среди моло-

дых учёных и специалистов Ростовской области, объявленного Президиумом Ростовского регионального отделения общероссийской организации «Российская инженерная академия» и Северо-Кавказского научного центра высшей школы в 2006 г.

Цель работы. Создание методики научно обоснованного достижения рациональных и оптимальных параметров процессов, близких к изотермическим, и инструмента для реализации технологииковки и штамповки в целях снижения металло- и энергозатрат и улучшения структуры готовых изделий.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением проблем:

1) совершенствованием МГЭ в технологических расчётах моделирования формоизменения в процессах ОМД, позволяющим повысить надёжность и качество численных результатов;

2) прямым моделированием формоизменения конкретных технологических процессов ОМД при проектировании, выполненным с применением МГЭ;

3) развитием гранично-элементной методики в решении обратных задач объёмной штамповки, что позволяет целенаправленно достигать технологических результатов формообразования по улучшению требуемых параметров процессов и изделий (поковок);

4) обеспечением на стадии проектирования процессов объёмной штамповки гарантированного заполнения полости чистового ручья, рациональных затрат металла, энергии и достижения требуемого распределения деформации в поковках посредством реализации постадийного обратного гранично-элементного моделирования формоизменения;

5) анализом оценки результатов обратного гранично-элементного моделирования процессов объёмной штамповки по сравнению с прямыми схемами их реализации МГЭ и МКЭ и экспериментальными исследованиями;

6) развитием методики совершенствования МГЭ в решении задач обратного формоизменения при объёмной штамповке;

7) определением оптимальных форм и размеров заготовок и заготовительных переходов объёмной штамповки на стадии проектирования технологических процессов;

8) созданием для процессов объёмной штамповки, оптимизируемых методом обратной прогонки динамического программирования, методики дополнительного снижения размерности многошаговых оптимизационных задач;

9) подтверждением достоверности полученных результатов экспериментальными и промышленными исследованиями, апробацией и внедрением.

Научная новизна исследований состоит в создании концепции моделирования процессовковки и штамповки на основе применения МГЭ. Конкретными основными результатами, достигнутыми в работе, являются:

– решение совокупности технологических задач электровысадки утолщений,ковки, объёмной штамповки и других процессов ОМД на основе прямого моделирования формоизменения с использованием МГЭ;

– решение задачи уточнённого моделирования формоизменения границ поковок в «особых» точках (точках сопряжения участков границ с разными граничными условиями) на основе применения МГЭ;

– создание алгоритма использования МГЭ в моделировании нестационар-

- ных процессов и обратных задач формоизменения при объёмной штамповке;
- применение МГЭ к традиционным подходам моделирования процессов ОМД, в частности, к методу планируемого эксперимента;
 - развитие расчётной гранично-элементной методики в оптимизационных задачах объёмной штамповки, реализуемых методом обратной прогонки динамического программирования с применением в качестве целевых функций значений работы деформирования и показателя равномерности распределения деформированного состояния в штампуемых поковках.

Теоретическая значимость работы заключается в следующем:

- показано, что основные положения созданной методики моделирования ОМД, применяемые к решению прямых задач формоизменения, могут использоваться для разнообразных процессов, что представлено такими их примерами как электровысадка утолщений, объёмная штамповка поковок, кузнечная протяжка бойками с угловой и радиальной конфигурациями вырезов на рабочих поверхностях и др.;
- установлено, что применение МГЭ в расчётах обратных задач формоизменения для процессов объёмной штамповки позволило реализовать алгоритм реверсивного¹ нагружения (АРН) вместо общепринятой схемы (алгоритма) обращения движения деформирования (АОДД), что позволило снизить не менее чем в два раза размерность расчётных действий реализуемого обратного моделирования;
- показано, что для технологических процессов объёмной штамповки усовершенствованная методика постадийного обратного моделирования формоизменения МГЭ обеспечивает в производстве гарантированное заполнение полости чистового ручья, снижение затрат металла, энергии и требуемую равномерность распределения деформации по сечению поковок;
- показано, что созданная методика решения оптимизационных задач объёмной штамповки на основе усовершенствований МГЭ позволила встраивать моделирование формоизменения в классические схемы решения этих задач, в частности, в схему обратной прогонки динамического программирования;
- показано, что созданная методика решения обратных задач формоизменения обеспечила возможность применить в моделировании процессов объёмной штамповки эффективные схемы снижения размерности многошаговых оптимизационных задач;
- созданная методика решения задач обратного и прямого моделирования формоизменения реализована в виде официально зарегистрированной программы для ЭВМ.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- выполнены теоретические и экспериментальные исследования, на ос-

¹ Используется терминология официального перевода первой работы этого направления исследований на русский язык (Экспресс-информация. Технология и оборудование КШП (зарубежный опыт). – 1984. – Вып. 1. – С. 7–19.), в которой подход признан неудачным на базе применения МКЭ. Термин «реверсного» – более предпочтителен (прим. авт.).

нове которых разработана методика проектирования рациональных и оптимальных технологических процессов ОМД, обеспечивающая снижение металлозатрат в среднем на 5%, энергозатрат – на 12...17% (для рациональных) и 43...52% (для оптимизируемых), технологических усилий – на 11...15% и 25...38% соответственно, и улучшение структуры готовых изделий (оцениваемое по показателю равномерности распределения деформации в поковках).

– результаты исследований в различное время апробированы (акты промышленной апробации прилагаются к работе) в производственных условиях на ООО «Ростовский завод специального инструмента и технологической оснастки (СИИТО)» (1997), федеральном государственном унитарном предприятии «Ростовский-на-Дону завод «Рубин» (2000), ОАО «Ростовский-на-Дону завод «Рубин» (2011) и внедрены в масштабах отрасли, что подтверждено техническим актом внедрения от ассоциации «СТАНКОИНСТРУМЕНТ» (2009 г);

– материалы диссертации используются в учебном процессе при подготовке инженеров специальности 150201 (120400) – «Машины и технология обработки металлов давлением» и магистров направления 151000 (551800) – «Технологические машины и оборудование» программы «Технологии и машины обработки давлением» в ДГТУ, в учебных курсах таких дисциплин как «Инженерная механика твёрдого тела», «Теория ОМД», «Моделирование технологических процессов ОМД» и «Оптимизация технологических процессов ОМД».

Методология и методы исследования. Теоретические исследования базируются на основных положениях механики сплошной среды, теории пластического деформирования металлов, фундаментальных закономерностях МГЭ и принципах динамического программирования, определяющих его реализацию в алгоритме обратной прогонки. Теоретические алгоритмы реализованы на ЭВМ, а их результаты сравнивались с данными моделирования МКЭ, МЛС и МВО.

Экспериментальные исследования выполнялись в лабораторных условиях на свинцовых образцах для поковок, характеризующихся схемами плоского и осесимметричного деформированных состояний, результаты которых в дальнейшем нашли практическое подтверждение при промышленной апробации, отраслевым внедрении и в сравнении с уже имеющимися практическими результатами исследований.

На защиту выносятся

1) Схема численной реализации МГЭ в моделировании формоизменения в процессах ОМД.

2) Анализ корректности применения МГЭ и его совершенствование применительно к обратным задачам ОМД.

3) Разработка схемы применения МГЭ в решении оптимизационных задач объёмной штамповки.

4) Надёжные схемы существенного сокращения сроков решения задач ОМД, включаемые в соответствующие подсистемы САПР (рациональные и оптимизационные способы проектирования), созданные благодаря совершенствованию МГЭ.

5) Технологические аспекты решения проблемы усовершенствования ме-

тодов моделирования процессов ОМД, достигаемые благодаря применению МГЭ.

Степень достоверности (реализация) результатов работы. Результаты исследований нашли практическое подтверждение при апробации на ООО «Ростовский завод специального инструмента и технологической оснастки (СИТО)» (1997), ФГУП «Ростовский-на-Дону завод «Рубин» (2000), ОАО «Ростовский-на-Дону завод «Рубин» (2011) и внедрены в масштабах отрасли на предприятиях ассоциации «СТАНКОИНСТРУМЕНТ» (2009).

Методика моделирования, выполняющая не только прямое решение технологических задач формоизменения при ОШ, но и непосредственное обратное решение по АРН, реализована автором в виде официально зарегистрированной программы для ЭВМ.

Материалы работы внедрены в учебный процесс подготовки инженеров по специальности 150201 и магистров направления 151000, обучающихся в ДГТУ (г. Ростов-на-Дону, 1996-2013 гг.).

Апробация результатов работы. Материалы работы доложены и обсуждены на V Международной научно-технической конференции «Динамика технологических систем», Ростов-на-Дону, 1997; II Международной научно-технической конференции «Проблемы пластичности в технологии», Орёл, 1998; 5-ом Международном научно-техническом семинаре «Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки и сборки в машиностроении и приборостроении», Свалява, Карпаты, 22-24 февраля 2005; научно-технической конференции «Прогрессивные технологические процессы в металлургии и машиностроении. Экология и жизнеобеспечение. Информационные технологии в промышленности и образовании», Ростов-на-Дону, 2005; Международной научно-практической конференции «Металлургия, машиностроение, станкоинструмент», Ростов-на-Дону, сентябрь 2006; на конкурсе молодых учёных им. акад. И.И. Воровича «Фундаментальные и прикладные проблемы современной техники», Ростов-на-Дону, 2006; IV Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии в современном машиностроении», Пенза, июнь 2008; XII Международной научно-практической конференции «Современные технологии в машиностроении» Пенза, декабрь 2008; Международной научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения» (в рамках 13-й Международной агропромышленной выставки «Интерагромаш-2010»), Ростов-на-Дону, 4-5 марта 2010; VI Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии в современном машиностроении», Пенза, июнь 2010; II Международной научно-практической конференции «Инновации, качество и сервис в технике и технологиях», Курск, 19-21 мая 2011, а также на ежегодных научно-технических конференциях проф.-преп. состава ДГТУ, Ростов-на-Дону, 1996-2012 гг.

В целом работа была представлена на кафедрах «Машины и технология ОМД и сварочное производство» ИжГТУ (г. Ижевск, 18 апреля 2012 г.), «Системы пластического деформирования» МГТУ «Станкин» (г. Москва, 27 апреля 2012 г.), «Машины и технология ОМД» СПбГПУ (г. Санкт-Петербург, 27 сентября 2012 г.) и ИТПФ ДГТУ (г. Ростов-на-Дону, 13 февраля 2013 г.).

Публикации по теме диссертационной работы. По теме диссертации опубликовано **43** печатные работы, в которых отражено её основное содержание. Среди них одна монография, три учебных издания (**2** учебных пособия с грифом УМО ВУЗов по образованию в области машиностроения и приборостроения (1998), по университетскому политехническому образованию (2002) и текст лекций (2010)), **16** статей в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК для опубликования результатов докторских диссертаций (из которых **3** работы дополнительно опубликованы в США на англ. языке), статьи в сборниках материалов конференций, конкурсов и научных трудов, депонированная рукопись статьи и тезисы докладов, а также **1** свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из **289** наименований на **375** стр. (**200** рис., **27** табл.) и **22** приложений на **208** стр. Общий объём – **583** стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, научная новизна, практическая ценность работы, сформулированы цель и задачи исследований, кратко раскрыто содержание разделов диссертации и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе анализируется вопрос применения численных методов и, в частности, МГЭ к моделированию и оптимизации процессовковки и объёмной штамповки (ОШ). Так, анализируются разновидности численных методов и области их эффективного использования, а также основные отличия МГЭ как метода, снижающего размерность расчётной задачи, с применением в целом к расчётам процессовковки и ОШ.

Так с позиции теоретического развития МГЭ анализировались результаты работ² С.М. Алейникова, А.Я. Александрова, В.Г. Баженова, Р.Баттерфилда, П.Бенерджи, К. Бреббия, Л. Вроубела, Р.В. Гольдштейна, Т. Громадка II, Л.А.Игумнова, С. Крауча, Т. Круза, В.Д. Купрадзе, Ч. Лей, А.М. Линькова, С.Г.Михлина, Н.И. Мусхелишвили, Л.Г. Петросяна, А.Г. Саркисяна, Дж. Сведлоу, А.Г. Смолянина, А. Старфилда, Ж. Теллеса, А.Г. Угодчикова, С. Уокера, Н.М. Хуторянского, А.Н. Цейтлина, D. Stefanescu, I. Gavrilas и др.

С позиций совершенствования процессовковки и ОШ посредством системного управления течением деформируемого металла, при анализе вопроса рассматривались работы² Л.Б. Аксёнова, Ю.Н. Алексева, И.А. Биргера, М.Я.Бровмана, Р.А. Вайсбурда, К. Васидзу, А.Л. Воронцова, О.А. Ганаго, В.Г.Глазунова, С.И. Губкина, Г.Я. Гуна, А.М. Дмитриева, У. Джонсона, М.Г.Златкина, А.А. Ильюшина, В.Л. Колмогорова, А.В. Коновалова, Х. Кудо, А.В. Кутышкина, Е.М. Макушка, К.Ф. Неймайера, Ю.И. Няшина, А.Г. Овчинникова, В.А. Огородникова, Я.М. Охрименко, А.А. Поздеева, П.И. Полухина, Е.А. Попова, В.М. Сегала, Е.И. Семёнова, Л.Г. Степанского, В.Ю. Столбова, М.В. Сторожева, И.Я. Тарновского, Г.П. Тетерина, А.Д. Томлёнова, В.Н. Трубина, П.В. Трусова, В.А. Тюрина, Е.П. Унксова, Б.Е. Хайкина, Л.А. Шофмана и

² Приводятся выборочно в алфавитном порядке.

др. Среди них в отдельное направление выделены исследования по разработке методов практического решения обратных задач формоизменения в направленном проектировании качественных процессов ОШ, их применению в расчётах параметров переходов штамповки и форм заготовок, а также их дальнейшего развития на основе использования МКЭ. В этом направлении анализировались результаты исследований Ю.Н. Резникова (1979); J.J. Park¹, N. Rebelo¹, S.Kobayashi¹ (1983); M.I. Ghobrial, F.H. Osman, A.N. Bramley (1985); H. Keife (1985); В.И. Махнача, О.Л. Шведа (1994); И.М. Володина (1999); Guoqun Zhao, Guangchun Wang, Ramana V. Grandhi (2002) и др.

С позиции применения именно МГЭ к процессам ОМД анализировались результаты работ² Н.Ф. Андрианова, Э.Р. Гольника, Н.И. Гундоровой, Н.В. Костарева, В.М. Лиховцева, А.А. Миленина, А.В. Новикова, Г.Г. Павлова, П.И.Перлина, П.И. Полухина, В.П. Полухина, В.Н. Самарова, А.О. Харитоновна, А.А. Шадского, А. Chandra, Н. Gun, S. Mukherjee, S. Saigal, R. Srivastava и др.

Аналитический обзор вопроса о применении численных методов в моделировании формоизменения позволяет выделить ряд важных, по мнению автора, положений, некоторые из которых приводятся ниже.

Постадийный анализ формоизменения, реализуемый современными численными методами – действенный подход в проектировании процессов ОШ, гарантирующий обеспечение заданного формообразования поковок и позволяющий на этой основе эффективно ими управлять.

В моделировании процессов ОМД МКЭ и МГЭ являются превалирующими и взаимодополняющими друг друга по возможностям, но отличными по способу реализации решения, что, в частности, приводит к различию уровня сложности их численной реализации (так для МГЭ – это «редукция» гранично-элементного решения задач; меньшая зависимость точности решения от уровня дискретизации, в частности, от дискретизации внутреннего пространства).

Из всех рассматриваемых форм МГЭ наиболее перспективной в моделировании нелинейных задач ОШ является его прямая формулировка (ПМГЭ).

Редукционные свойства МГЭ значительно расширяются при решении задач моделирования формоизменения тел бесконечных размеров, что особенно перспективно для таких процессов как свободная ковка и штамповка крупногабаритных поковок.

Эффект редукции МГЭ усиливается, при решении нелинейных задач в случае применения алгоритма последовательных приближений, так как рациональное число итераций на каждой расчётной стадии в этом случае, в зависимости от схемы его реализации, по данным сторонних исследований, в общем случае может составлять от 5 до 72, поэтому эффект сокращения протяжённости моделирования может варьироваться более чем на порядок.

Не изученная в полной мере схема решения обратной задачи формоизменения – по алгоритму реверсивного¹ нагружения (АРН) (не реализуемая МКЭ), отличается низкой сложностью непосредственной реализации – её сложность адекватна сложности решения аналогичной прямой задачи. Имеется обоснованное предположение о возможности её применения к решению обратных задач посредством привлечения ПМГЭ.

Достоинства МГЭ, представленные ранее, позволяют наиболее эффективно использовать численное моделирование в оптимизационной разработке процессов ОШ, в частности, на основе применения многошаговых методов динамического программирования (ДП).

Решение многошаговых оптимизационных задач, реализуемое по алгоритму обратной прогонки (ОП) ДП, требует обоснованного применения и подробной разработки дополнительных специальных алгоритмов (схем, ограничений), снижающих размерность решаемой оптимизационной задачи. Например, в настоящей работе использован алгоритм «киевский веник», предложенный и в дальнейшем модифицированный В.С. Михалевичем и Н.З. Шором.

Аналитический обзор вопроса о применении численных методов в проектировании таких нестационарных ТП как ОШ показывает, что использование результатов моделирования является основным средством оценки разрабатываемого технологического решения, которое может быть реализовано до момента изготовления экспериментальной и производственной оснастки.

Точность численных методов моделирования и способов их реализации программными средствами постоянно повышается ввиду непрерывных исследований в этом направлении, что, в частности, уже говорит об актуальности настоящей работы. При этом существует и иная позиция, заслуживающая, по крайней мере, её включения в данный раздел. Так, в частности, существует мнение, подтверждённое отдельными результатами исследований, согласно которому численный МКЭ существенно уступает аналитическим методам решения задач ОМД, в связи с чем возникает необходимость экспериментальных проверок результатов моделирования. Такое утверждение с одной стороны указывает на то, что не существует универсального метода для решения любой задачи ОМД, а следовательно, положительные результаты такого численного моделирования не всегда гарантируют «адекватность эксперимента», а с другой – предоставляется возможность совершенствования численного моделирования как в рамках применяемого метода, так и посредством применения и развития другого численного подхода. В этом смысле, с учётом уже перечисленных достоинств МГЭ, его применение для задач ОМД обоснованно и актуально.

Такой показатель как процедурная скорость моделирования, при относительной универсальности и точности, ставит численные методы на «недосягаемую высоту» с позиций современных возможностей ЭВМ. При этом ввиду наличия различных формулировок численных методов скорость и результативность моделирования может варьироваться, вследствие чего рациональный выбор метода обоснован применением ПМГЭ для задач ОШ.

В этом случае цель настоящего исследования заключается в совершенствовании процессов проектирования технологий ОШ в направлении снижения металло- и энергозатрат и улучшения структуры готовых поковок на основе применения созданной методики уточнённого гранично-элементного моделирования постадийного формоизменения (прямого и обратного) и совершенствования на её основе процедуры многошаговой оптимизации, использующей ОП ДП. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- 1) Усовершенствовать методику и алгоритмы моделирования процессов ОШ с применением численного МГЭ: в направлении построения качественного

приближения решений в «особых» точках (где сопрягаются участки границ деформируемого тела с разными граничными условиями) и применения для граничной аппроксимации граничных элементов с соответствующими им интерполирующими функциями, а также применением рационального алгоритма перехода к решению задач нелинейного типа.

2) Усовершенствовать методику гранично-элементного решения обратной задачи формоизменения поковки в заготовку (или полуфабрикат на переходе).

3) Применить созданную методику гранично-элементного моделирования формоизменения по прямой и обратной схемам моделирования в направлении получения принципиально важных для процессов ОШ практических результатов, в частности, снижения металло- и энергозатрат за счёт сокращения протяжённости стадии преимущественного однонаправленного течения (доштамповки) и повышения деформационной равномерности внутри готовой поковки.

Направленное достижение такого результата на основе моделирования формоизменения с применением МГЭ является принципиально важной задачей применения теоретических методов к решению практических вопросов ОШ. Поэтому в работе для решения обратных задач формоизменения развивается нетрадиционная схема их решения на базе применения ПМГЭ – по АРН.

4) Разработка методики многошаговой оптимизации процессов ОШ, основанной на процедуре ОП ДП и МГЭ и введения внешних алгоритмов (схем), снижающих размерность решаемой оптимизационной задачи.

5) Экспериментальная проверка полученных численным моделированием данных, в частности, физическим экспериментом с применением спецоснастки.

В настоящей работе поставлена также задача алгоритмической и программной реализации автоматизированной системы моделирования, реализующей: гранично-элементный расчёт формоизменения, вывод результатов в численном виде и частичный их вывод средствами машинной графики.

Во второй главе представлен анализ сущности МГЭ как метода применяемого в технологических расчётах. В частности, рассматриваются методы получения основных исходных уравнений, роль фундаментальных решений в формировании общей структуры расчётов, гранично-элементное решение нелинейных задач, в том числе пластической деформации и численная реализация МГЭ в моделировании процессов ОШ и возникающие при этом проблемы.

По результатам анализа работ по МГЭ, используемых в главе, принят метод получения исходных гранично-интегральных уравнений, реализованный на основе формулировки взвешенных невязок (остатков). Такой подход носит более общий характер, чем классические вариационные принципы, которые часто закладываются в виде различных модификаций в основу МКЭ. Применение указанной формулировки связано с тем, что классические вариационные принципы применимы лишь к ограниченному классу операторов, чему неоднократно уделяется внимание в анализируемых источниках.

Так, для решения упругих задач, совокупность которых заменяет исходную нелинейную задачу, применено гранично-интегральное выражение

$$c_{ij}(\xi)u_j(\xi) + \int_{\Gamma} p_{ij}^*(\xi, x)u_j(x)d\Gamma(x) = \int_{\Gamma} p_j(x)u_{ij}^*(\xi, x)d\Gamma, \quad (1)$$

которое для решения обобщённо-нелинейных задач в упрощённом виде, в предположении несущественного влияния объёмно-массовых сил в общем изменении состояния формоизменяемого тела, может быть представлено как

$$\begin{aligned} & c_{ij}(\xi)u_j(\xi) + \int_G p_{ij}^*(\xi, x)u_j(x)d\Gamma(x) = \\ & = \int_G u_{ij}^*(\xi, x)p_j(x)d\Gamma(x) + \int_\Omega \sigma_{jki}^*(\xi, x)\varepsilon_{jk}^a(x)d\Omega(x), \end{aligned} \quad (2)$$

где $p_{ij}^*(\xi, x), u_{ij}^*(\xi, x)$ – усилия и перемещения в осевых направлениях, определяемые фундаментальным решением Кельвина (отмечены $*$), возникающие в точке x границы Γ и обусловленные действием единичных сил в точке ξ в направлении точки i ; $c_{ij}(\xi)u_j(\xi)$ – показатель перемещения тела как целого в направлениях j ; $p_j(x), u_j(x)$ – усилия и перемещения на границе, половина из которых определяется граничными условиями, а остальные – искомые параметры краевой задачи. Последний интеграл (одна из двух его возможных форм) по расчётной области Ω в (2) – так называемый «пластический член», определяет изменение затрат работы, связанное с влиянием неупругой составляющей приращения деформации $\varepsilon_{jk}^a(x)$ (в сравнении с полной, включающей в себя и упругую, то есть $\varepsilon_{jk} = \varepsilon_{jk}^e + \varepsilon_{jk}^a$) на внутреннее нелинейное напряжение $\sigma_{jki}^*(\xi, x)$.

Для практического определения двух составляющих последнего интеграла в (2), а также для представления в нём, как это уже и показано в выражении, действительных переменных вместо скоростей их изменения ($\dot{u}_j, \dot{p}_j, \dot{\varepsilon}_{jk}^a$), в работе используется методика решения нелинейных задач формоизменения по алгоритму переменной вязкости (методу гидродинамических приближений), когда на каждом шаге исходная нелинейная расчётная задача сводится к последовательности решений линейных задач.

Указанная аналогия несжимаемой упругой среды с коэффициентом Пуассона $\nu=0,5$ и несжимаемой вязкой жидкости в стоксовом приближении приводит к полному соответствию «картин формоизменения» – «картинам медленно-го движения (течения) вязкой жидкости», то есть поле скоростей в такой жидкости совпадает с полем смещений точек упругого тела ($\dot{u}_i = u_i$ или $\dot{\varepsilon}_i = \varepsilon_i$), а распределение давлений – с гидростатической компонентой тензора напряжений ($\sigma \cong \sigma_i$). Ввиду применения такой аналогии, сдвиговой модуль упругости соответствует коэффициенту вязкости $G=\mu$, что позволяет, при

$$E_{j-1} = 3\mu_{j-1} = tg\alpha_{j-1}; \quad G_{j-1} = \mu_{j-1}; \quad \text{при } \nu \rightarrow 0.5, \quad (3)$$

применять обычные выражения метода переменных параметров упругости

$$E_j = \frac{3E_{j-1}}{3E_{j-1}\Psi - 1 - 2v_{j-1}}; \quad v_j = \frac{1}{2} \frac{1 - 2v_{j-1}}{E_{j-1}} \frac{1}{2\Psi}; \quad G_j = \frac{1}{2\Psi}; \quad \Psi = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \quad (4)$$

к произвольной кинематической дискретизации моделируемого процесса формоизменения, при условии достижения сходимости

$$\frac{E_{j-1} - E_j}{E_{j-1}} \leq 0,03 \quad \text{и контактного}$$

ограничения формообразования.

Для определения компонент «пластического члена» и, соответственно, применения выражения (2), используется ячеечная дискретизация внутреннего пространства (рисунки 1), когда по выражениям тождества Сомильяны определяются смещения ячейкообразующих внутренних точек и рассчитываются значения интенсивностей величин

$$\varepsilon_i = \frac{2}{3} \sqrt{\varepsilon_1^2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2^2 + \frac{3}{4} \gamma_{12}^2}; \quad \dot{\varepsilon}_i = \frac{2}{3} \sqrt{\dot{\varepsilon}_1^2 - \dot{\varepsilon}_1 \dot{\varepsilon}_2 + \dot{\varepsilon}_2^2 + \frac{3}{4} \dot{\gamma}_{12}^2}. \quad (5)$$

Постадийная форма решения позволяет представить полную интенсивность деформации ячеек на любой стадии k как $\varepsilon_i^{(k)} = \varepsilon_i^{(k-1)} + \dot{\varepsilon}_i^{(k)}$. В этом случае недостающую компоненту напряжений в явном виде $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^e - \sigma_{ij}^a$ (не в виде нелинейных изменений σ_{ij}^a) в ячейках, но уже приведенных, в частности, к форме их интенсивностей, можно определить по известным реологическим зависимостям соответствующих материалов. Так, например, в работе для большинства применяемых металлов используется модель вида $\sigma_i = \sigma_0 \varepsilon_i^n \dot{\varepsilon}_i^m \exp(-pt)$, параметры которой принимались, в частности, по результатам исследований М.Я. Бровмана.

Данные расчётного распределения интенсивностей степеней и скоростей деформации, интенсивностей напряжений и модуля упругости в ячейках на 12-ти равнозначных стадиях осадки (см. рисунок 1, при полной осадке $\varepsilon_y=0,3$) показывают, что применение МГЭ к решению нелинейных задач требует не более 16 итераций.

Сравнение результатов расчёта искомых параметров формоизменения на

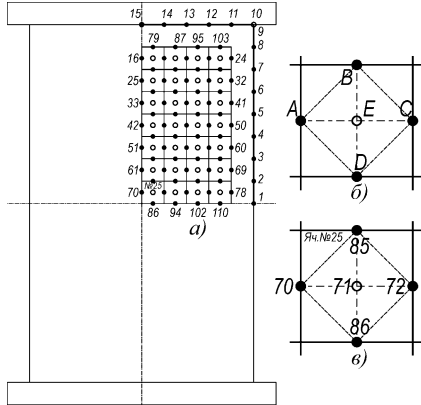


Рисунок 1 – Дискретизация $1/4$ сечения заготовки (Pb, 50×80 мм) (а) ячейками (5×5 мм) (б) и обозначение узлов в ячейке №25 (в) при осадке

границе с данными экспериментальных исследований и аналогичного моделирования, выполненного МКЭ, представлены на [рисунке 2](#).

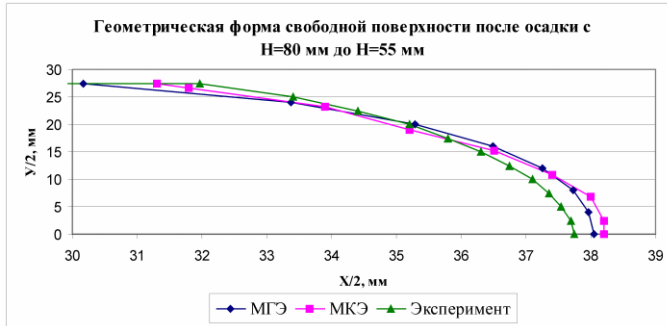


Рисунок 2 – Результаты численного и экспериментального моделирования формoизменения (при $\varepsilon_s=0,3125$) границы поковки при осадке в условиях плоскодеформированного состояния и максимального контактного трения, полученные МГЭ и МКЭ

Также в главе подробно рассмотрена методика частичного учёта уже в итерационном методе линеаризации неравномерности распределения накопленной деформации по сечению поковки в пределах всего пути её деформирования – по заранее выделенным областям (ячейкам). Подход позволяет учитывать деформационную наследственность как на протяжении всех стадий деформирования текущей операции штамповки, так и заранее известное влияние предшествующих заготовительных переходов штамповки. Представленный подход в МГЭ, в сравнении с данными формoизменения однопереходной операции осадки, выполненной МКЭ (QForm) показал хорошее их соответствие.

Особо отмечается, что в расчётах МГЭ нелинейных задач, для которых в рамках принятой выше методики необходимо определять искомые параметры внутри поковки, размер применяемых граничных элементов определяет как близость расположения внутренних точек от границы, так и точность аппроксимации самой границы. В таких задачах редуцированный эффект МГЭ зависит от разности порядков функций, аппроксимирующих граничные условия и геометрию на конкретном участке границы. При этом разность этих порядков должна быть положительной, а в крайнем случае, они должны быть равными, для соблюдения условия достоверности рассчитываемых данных.

В третьей главе представлен анализ совершенствования и применения МГЭ в технологических расчётах. В частности, рассматриваются вопросы совершенствования МГЭ в моделировании нестационарных процессов ОШ (уровень гранично-элементной аппроксимации и учёт влияния «особых» точек), совершенствование методики (алгоритма) решения обратных задач формoизменения при ОШ посредством применения МГЭ (об алгоритмах решения обратных задач и о способах их введения в класс корректных), возможные технологические эффекты, достигаемые от применения МГЭ в прямых расчётах процессов ОШ (для прямого многоканальном прессовании с активным действием сил трения (АДСТ), для закрытой и свободной электровысадки утолщений и

для сокращения протяжённости стадии преимущественного однонаправленного течения (СПОТ) металла при ОШ), возможные технологические эффекты, достигаемые от применения МГЭ в обратных расчётах процессов ОШ (сокращение СПОТ и снижение металлозатрат при ОШ).

При реализации гранично-элементного моделирования в решении прямых и обратных задач ОМД использована аппроксимация граничного контура двухточечными граничными элементами с распределением по их длине неизвестных величин по линейному закону, а также осуществлен учет «особых» точек посредством применения в них сдвоенных узлов с различными граничными условиями, действующими индивидуально на каждый из них.

Обоснованно представлена схема гранично-элементного решения обратных задач формоизменения по АРН¹, которая в сравнении с АОДД (традиционно используемой в решении обратных задач, в том числе и не только с помощью МГЭ) позволяет: сократить число расчётных действий (а следовательно, и машинное время на реализацию обратного решения) минимум в два раза; учитывать реальную нестационарность кинематических параметров на смежных расчётных стадиях обратного формоизменения (в отличие от учёта параметров, связанного с непосредственным запаздыванием их определения на единицу расчётной стадии); начинать процедуру обратного расчёта от состояния готовой поковки, которое может назначаться не только в «верхнем» значении поля допуска (как для АОДД) на образующий её размер (в частности, позволяет вместо зазоров определять закономерно граничные участки их «закрытия» на более позднем этапе формообразования поковки (близком к «нижнему», определяемому только точностью применяемого численного метода), по конкретным кинематическим параметрам обратного формоизменения), что дополнительно позволяет снижать объём, а следовательно и металлозатраты, определяемой технологическим расчётом заготовки.

Так, процесс поэтапного прямого моделируемого формоизменения заготовки в поковку в дискретном виде можно представить последовательностью состояний $X_0...X_k$:

$$X_0 \xrightarrow{\{U_1^X\}} X_1 \xrightarrow{\{U_2^X\}} \dots \xrightarrow{\{U_{k-1}^X\}} X_{k-1} \xrightarrow{\{U_k^X\}} X_k \xrightarrow{\{U_{k+1}^X\}} X_{k+1}, \quad (6)$$

где X_0 – состояние «принятой» к формоизменению заготовки; X_k, X_{k+1} – состояния поковки, соответственно в «верхнем» и «нижнем» пределах полей допуска на соответствующий контактный (вертикальный) размер; $\{U_k^X\} = f(U_i; U_n)$ – оператор, определяющий формоизменение объекта при переходе к следующему состоянию; U_i, U_n – соответственно, известные граничные условия (i) и искомые величины (n) на граничных элементах (N), общее число которых $(i+n)=2\alpha N$ (где $\alpha=2$ – для плоской задачи и $\alpha=3$ – для трёхмерной).

По аналогии с выражением (6), представить процесс в обратном направлении (для простоты – с права на лево) от готовой поковки к рациональной заготовке, т.е от состояния Y_0 ($Y_0 \Leftrightarrow X_k$) к состоянию Y_k можно как

$$Y_k \xleftarrow{\{U_k^Y\}} Y_{k-1} \xleftarrow{\{U_{k-1}^Y\}} \dots \xleftarrow{\{U_3^Y\}} Y_2 \xleftarrow{\{U_2^Y\}} Y_1 \xleftarrow{\{U_1^Y\}} Y_0, \quad (7)$$

тогда для АРН
$$\{U_1^Y\} = -\{U_k^X\}, \quad (8)$$

а при АОДД $\{U_{k+1}^X\} = \{-U_1^Y\}$, а $\{U_1^Y\} = -\{U_k^X\}$, то есть $\{U_{k+1}^X\} = \{U_k^X\}$, (9)

что и определяют не только вдвое больший порядок действий в методике обратного решения, но и непосредственное запаздывание на единицу в обратном моделировании при учёте по стадиям, что требует большей стационарности процесса, достигаемого более высокой (в два раза) его дискретизацией по времени.

На примере обратного расчёта процесса осадки (заготовка 200×200 мм, $\varepsilon_y=0,1$), выполненного МГЭ по АОДД и АРН показано, что рассогласование перемещений граничных узлов свободной зоны за стадию (всего их 10), в зависимости от начальных параметров упругости материала перед обратным моделированием, находится в пределах $0 \dots 1 \times 10^{-4}$ мм, при максимальном перемещении узла за стадию 1,5576 мм.

На примере процесса осадки заготовки 50×80 мм в условиях плоской деформации ($\varepsilon_y=0,3$), при последовательном решении 12 стадий прямых и 12 стадий обратных задач, были определены погрешности соблюдения условия постоянства объёма для МКЭ (АОДД) – (–4,38%), для МГЭ (АОДД) – (–1,29%). Максимальное геометрическое отклонение полученной формы заготовки от исходной геометрии (только с одной стороны, рисунок 3) на участке свободной зоны составило для МКЭ – (–1,307 мм), для МГЭ – (–0,55 мм). Распределение накопленной деформации в сечении формоизменяемого объекта, полученное обоими методами различается несущественно, но при этом программный продукт МКЭ позволяет определить эти показатели только после прямого расчёта, а МГЭ позволяет их получить уже непосредственно в ходе обратного моделирования по АРН (рисунок 4).

На примере процесса осадки в условиях плоской деформации ($\varepsilon_y=0,24$), последовательным решением обратных и прямых задач (11 стадий) определялись формы рациональных заготовок для получения поковки квадратного сече-

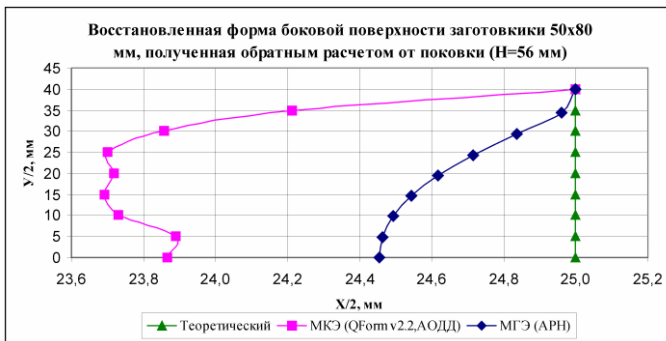


Рисунок 3 – Форма свободной (боковой) поверхности заготовки, полученной обратным 12-стадийным расчётом разными численными методами и по разным алгоритмическим схемам от соответственно полученных бочкообразных поковок

ния 70×70 мм. Погрешности соблюдения условия постоянства объёма для МКЭ (АОДД) – (+3,75%), для МГЭ (АОДД) – (-1,4%) (таблица 1). Максимальное расчётное геометрическое отклонение, полученное теми же методами моделирования, формы поковки от исходной её геометрии (только с одной стороны) на участке свободной зоны составило для МКЭ – (+2,9 мм), для МГЭ – (-0,7 мм). Экспериментальные исследования этих же параметров показали данные: для МКЭ – (+2,75 мм), для МГЭ – (+1,37 мм) (рисунок 5).

При рассмотрении корректности постановки обратной задачи и точности её решения для процесса ОШ выполнено следующее.

Разработана схема решения обратной задачи с введением её в класс корректных путём использования априорной информации об изменении механических свойств металла в процессе перехода от упругого состояния к пластическому. Использован подход, в котором величина модуля сдвига

при пластической деформации уменьшается в отношении $1/(1+\varphi)$, а коэффициент Пуассона снижается и может быть рассчитан по формуле Г.Генки

$$m_{\varphi} = \frac{2 \cdot \varphi + \frac{3 \cdot m}{m+1}}{\varphi + \frac{3}{m+1}}, \quad (10)$$

Таблица 1 – Расчётное снижение площади сечения в задаче об осадке на 22 мм заготовки под поковку 70×70 мм ($\varepsilon_3 \approx 0,24$) при обратном и прямом численном моделировании

Метод моделирования	Обратное решение		Прямое решение	Общее отклонение
	АОДД	АРН		
	%	%		
ПМГЭ	–	– 0,5508	– 0,848	– 1,3988
МКЭ (QForm)	+ 4,1459	–	– 0,3969	+ 3,749

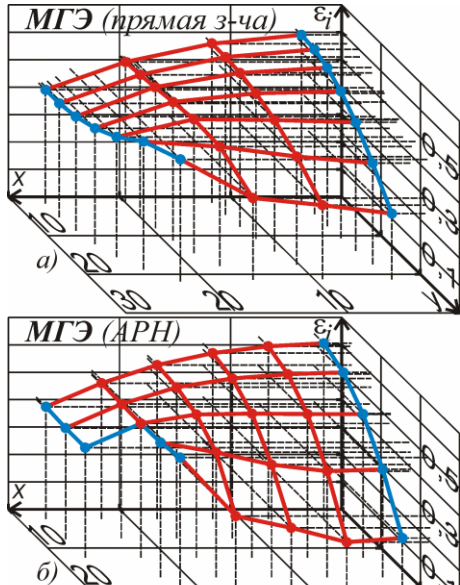


Рисунок 4 – Расчётное распределение по МГЭ интенсивности накопленной деформации в поковке после осадки заготовки 50×80 мм на $\varepsilon_3=0,3$: а) прямой расчёт; б) обратный расчёт по АРН для ε_3 , отнесенных к первоначальным координатам центров ячеек

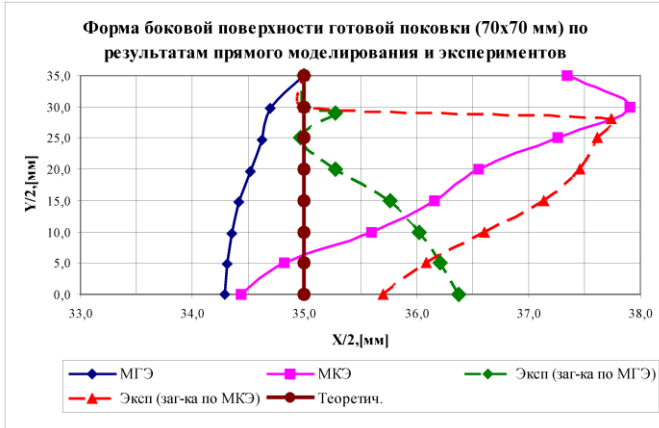


Рисунок 5 – Форма границы сечения поковки, получаемой из заготовок, параметры которых определены обратным расчётом (представлены по результатам проверочных прямых расчётов и экспериментов)

где $m=1/\nu$, ν – коэффициент Пуассона; φ – функция, определяющая переход металла в пластическое состояние: $\varphi \geq 0$, причём уравнение $\varphi=0$ – уравнение поверхности, отделяющей упругую область от пластической.

Показано, что итерационный цикл линеаризующего алгоритма должен реализовываться по схеме с двумя изменяемыми параметрами состояния материала (E, ν). Определение рациональной величины Δh должно основываться на соблюдении условия несжимаемости. При этом реальные значения величины δ , определяющей погрешность (сокращение) вытесняемого объёма (площади части сечения) металла при расчётном формоизменении, обеспечивающие корректность решения задачи расчётного деформирования должны находиться в пределах $\delta \leq 1 \div 2\%$.

Приведенные результаты исследований относятся к «интуитивной регуляризации – регуляризации по здравому смыслу» и свидетельствуют о том, что непосредственное применение обратной схемы расчёта процессов ОШ вполне допустимо с позиций общего подхода к решению обратных задач.

Выполнены исследования рациональных форм и размеров заготовки для поковки с двухщелевым сечением (рисунок 6,б). Показано, что ранее выполненный МВО (как и любым методом) расчёт обратной задачи, позволяет определить приближённо основные параметры заготовки (рисунок 6,а), но они, в отдельных случаях, требуют уточнения в связи с имеющимися дефектами в готовой поковке. Представлен вариант улучшения этого решения посредством корректировки формы заготовки, обеспечивающей удовлетворительные результаты заполнения по данным прямого расчёта МКЭ.

Для получения теоретическим путём более точных форм и размеров заготовки (рисунок 6,в) разработана методика, близкая по идее к подходу, характерному для квазирешения обратных задач.

Выполнены исследования для корректной постановки соответствующей обратной задачи штамповки, определяющие множество исходных допустимых параметров уточнённой заготовки. Практическое применение разработанных положений реализовано посредством поиска условного минимума «функционала качества» – меры близости наблюдаемого и готового изделия, как это обычно выполняется в задачах о квазиразрешении

$$\rho_{\bar{U}}(Az, \bar{u}) = \rho_{I_1}(A\bar{r}, p^*) = \begin{cases} \max_{(0, p^*]} \left| \frac{\Pi_c(\bar{r}) - \Pi_o(\bar{r})}{\Pi_v} - p^* \right| \rightarrow \min \\ \Omega_w = \Omega_v^* \\ \bar{r} \in l_4 \end{cases}, \quad (11)$$

где Π_c – суммарный периметр контакта граничного контура поковки с формообразующей частью гравюры ручья в заданном сечении (без учёта облойной канавки); Π_o – суммарный периметр контакта граничного контура поковки с облойной частью гравюры ручья в заданном сечении (в области облойной канавки); Π_v –

периметр формовочного контура гравюры ручья в заданном сечении (без учёта облойной канавки);

$p = \frac{\Pi_c - \Pi_o}{\Pi_v}$ $p \in (0, p^*]$ – относительный периметр формы поковки; $p^* = 1 - \frac{\tilde{\Pi}_o}{\Pi_v}$ – предельно мак-

симальное значение относительного периметра, характерное для рационального процесса штамповки поковки.

Результаты экспериментов, реализованных в диалоговом режиме, подтвердили эффективность и надёжность разработанной методики.

Апробация разработанной гранично-элементной методики применена для расчёта стационарной стадии многоканального прессования с

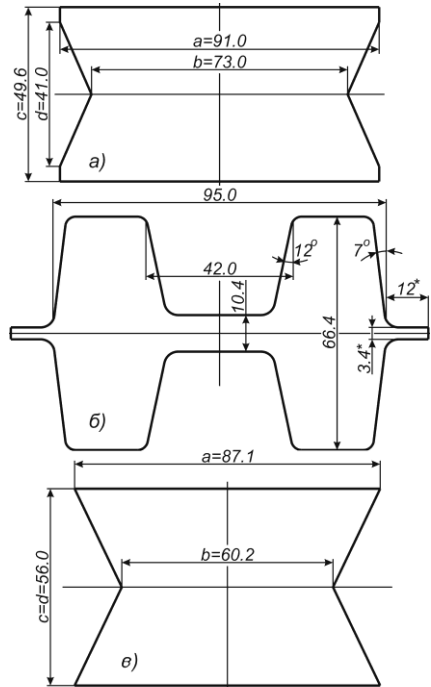


Рисунок 6 – Формы сечений расчётной заготовки по МВО (а) для поковки (б) и её искомая корректная форма (в): * – параметры облоя, приняты по заводской технологии

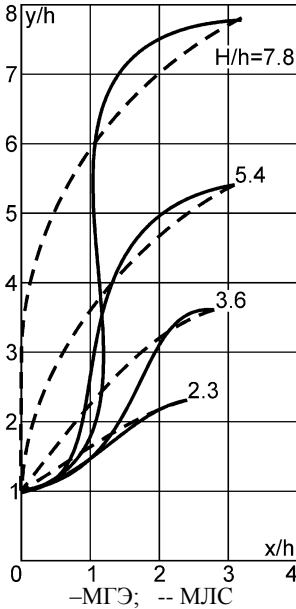
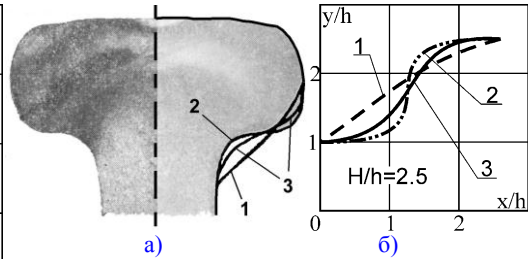


Рисунок 7 – Сравнительные характеристики расчётных профилей утолщенной части заготовок для различных H/h в процессах закрытой электровысадки



1 – МЛС, 2 – эксперимент для сплава ВТЗ-1, 3 – МГЭ (данные автора)

Рисунок 8 – Форма боковой поверхности деформированной заготовки, полученной электровысадкой: а) макроструктура осевого сечения; б) по данным расчётов и экспериментов

АДСТ при определении соотношений скоростей истечения металла из периферийных и центрального каналов пятиканальной матрицы $\varnothing 7,4$ мм (четыре канала – на периферии $R/2$; длина заготовки в контейнере после распрессовки – $\varnothing 40 \times 100$ мм, сплав Д16, 340°C). Полученные расчётные результаты, хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований.

Апробация разработанной гранично-элементной методики расчёта показала возможность принципиального уточнения формоизменения на примере нестационарных процессов закрытой (рисунок 7) и свободной электровысадки утолщений даже при применении только скоростной реологической модели, близкой к линейному типу – $\sigma_i = 10,2\dot{\epsilon}^{0,06}$ (Д16; 400°C), что допускает сравнение результатов расчёта с данными МЛС. Полученная МГЭ форма утолщённой части значительно ближе к экспериментальным данным, чем полученная МЛС, что, в частности, также хорошо видно на примере процесса свободной электровысадки, представленной на рисунке 8.

Моделирование процесса ОШ поковки (рисунок 9,а) выполненное на основе прямого решения задач формоизменения МГЭ, с учётом внесённых в него усовершенствований, позволило с высокой степенью точности прогнозировать наличие таких технологических эффектов как относительная протяжённость стадии преимущественного однонаправленного течения (СПОТ) металла и незаполнение ручья штампа

$$\Delta h = \left| \left(\frac{h_i}{h_{\max}} \right)_{\text{фланца}} - \left(\frac{h_i}{h_{\max}} \right)_{\text{ступицы}} \right|, \quad (12)$$

и соответственно оценить рациональность размеров заранее принятой исходной

заготовки. Тут $\left(\frac{h_i}{h_{\max}}\right)_{\text{ступицы}}$; $\left(\frac{h_i}{h_{\max}}\right)_{\text{фланца}}$ – относительные величины

рабочего хода инструмента соответствующие моменту прекращения (или резкому изменению интенсивности) заполнения полости ступицы и фланца. Из рисунка 9,б следует, что по данным моделирования МГЭ для базовой (производственной) заготовки $\varnothing 30$ мм, СПОТ соответствует стадии доштамповки $\Delta h=0,155$, а при эксперименте $\Delta h=0,11$.

Подход, основанный на решении обратных задач формоизменения МГЭ, с учётом внесённых усовершенствований, позволил определить рациональные форму (рисунок 9,в) и размеры заготовки. Ввиду того, что требуемая форма заготовки должна быть цилиндрической, можно выделить два момента.

1 Цилиндрические заготовки, принятые по среднему диаметру расчётной конической заготовки $d_{cp}=40,5$ мм, согласно двухстороннее течение металла при заполнении полости ручья штампа почти до конца процесса $\Delta h \approx 0,02$ (рисунок 9,б), что приводит к снижению величины работы деформирования на 17%, а максимального усилия штамповки на 11%, в сравнении с базовым вариантом.

2 Определение диаметра рациональной цилиндрической заготовки для поковки «стойка» по диаметрам торцов конической заготовки, полученной обратным расчётом (рисунок 9,в) с целью наибольшего снижения максимального усилия деформирования целесообразно производить на практике не по среднему диаметру, а по уравнению $d \approx d_{\min} + |d_{\min} - d_{\max}|/n$, где $n=4 \div 8$. Тогда явление доштамповки в процессе ОШ из заготовки $\varnothing 39$ мм ($n=8$) практически отсутствует $\Delta h \leq 0,005$ (рисунок 9), а величина максимального усилия штамповки снижается на 15,3%, в то время как работа деформирования сокращается на 11,9% по сравнению с произв. вариантом ОШ.

На примере ОШ поковки кольца выпускной трубы (31-1704-1), показано, что посредством обратного численного моделирования, реализуемого МГЭ по

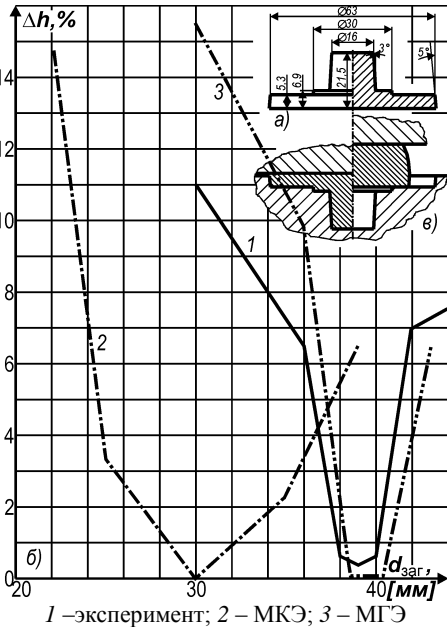


Рисунок 9 – Поковка «стойка» (а), зависимости протяжённости СПОТ Δh от диаметра заготовки (б) и схема обратного расчёта (в)

АРН, можно определить рациональные параметры не только чернового перехода штамповки, но и заготовительного. При пробной заводской эксплуатации инструмента применение предложенных заготовительных ручьёв позволило в среднем сократить расход металла на 5%, повысить стойкость штампов на 23% и снизить брак на 19%.

В четвёртой главе представлен анализ применения МГЭ к оптимизации процессов ОШ. В частности, рассматриваются вопросы целесообразности его применения; построения оптимальной схемы штамповки по критерию минимальной работы деформирования; совершенствования оптимизационных подходов, реализуемых методом ОП ДП; построение оптимальной схемы штамповки по критерию формирования равномерного деформированного состояния в штампуемых поковках.

Показано, что в сравнении с МКЭ, МГЭ:

- уже при равных условиях итерационной сходимости в схеме решения нелинейной прямой задачи, снижает её расчётную размерность в 3,55...5,33 раза (для 15 итераций);

- для многостадийного процесса расчёта прямого формоизменения (также при равной итерационной сходимости на всех стадиях) снижает расчётную размерность в 6,35...9,53 раза (для 10 стадий), а для аналогичного обратного формоизменения – в 12,7...19,1 раз;

- для аналогичных рассматриваемым – многостадийным оптимизационным задачам, но решаемым по алгоритму прямой полной прогонки метода ДП, снижает их размерность – в 1347...2021 раза, а для оптимизационных задач решаемых по алгоритму ОП ДП – в 2695...4043 раза.

В работе усовершенствован подход к определению начального расчётного состояния для решения обратных расчётных и оптимизационных задач, позволяющий с одной стороны в начальной постановке дополнительно снизить металлозатраты в решаемой задаче, а с другой – компенсировать возможные погрешности, связанные с неточностью матмоделирования (рисунок 10).

На примере процесса осадки заготовки (рисунок 1), находящейся в условиях плоской деформации показано, что используемая гранично-элементная модель процесса формоизменения отличается большей точностью в определении одного из критериальных оптимизационных показателей процесса – работы деформирования

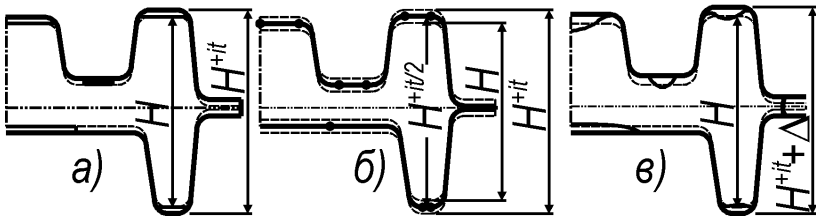


Рисунок 10 – Способы задания управлений формоизменением при оптимизации методом ОП ДП посредством применения: а) АОДД от предпоследней стадии Y_0 (7); б) АРН от последней стадии Y_n (7); в) АРН на стадии Y_0 (7)

$$A = k_{sym} \sum_{j=1}^N \left(\Delta h_j \sum_{i=k}^m \frac{\sigma_{h(i)} + \sigma_{h(i+1)}}{2} \ell_i z_i \right) = k_{sym} \sum_{j=1}^N \left(\Delta h_j \sum_{i=k}^m \frac{P_{h(i)} + P_{h(i+1)}}{2} z_i \right), \quad (13)$$

в сравнении с МКЭ. При этом получены данные, в соответствии с которыми модель МГЭ по указанному критерию отражает более точные результаты при решении обратных задач в сравнении с прямыми (рисунок 11), что расширяет перспективы её применения в оптимизационном моделировании формоизменения по энергосиловым критериям процесса ОМД.

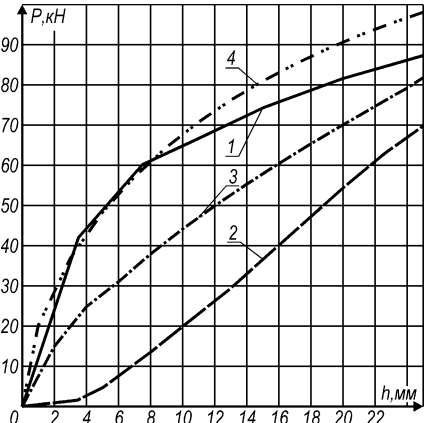
При оценке процесса по второму критериальному показателю – минимальной неравномерности распределения накопленной деформации по сечению поковки

$$J_5 = \frac{\sum_{i=1}^n |\varepsilon_{cp} - \varepsilon_i| S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}, \quad (14)$$

были получены результаты, представленные в таблице 2.

Повышение равномерности деформации (снижение её неравномерности распределения) в поковках приводит, согласно диаграммам рекристаллизации обработки, к соответствующему улучшению структуры получаемых изделий.

Видно, что для данного процесса МКЭ позволяет определить J_5 точнее, однако последнее значение в таблице позволяет сделать вывод о том, что АРН (МГЭ) – несущественно уступает результатам прямого решения аналогичной задачи, решаемой МКЭ, а оба численных метода в перспективе требуют усовершенствований в методике расчёта компонент выражения (14). В связи с этим, решение оптимизационной задачи по методу ОП ДП по критерию J_5 на каждом оптимизационном шаге дублируется результатами прямого моделиро-



1 – эксперимент ($A_1=1,594$ кДж);
2 – МКЭ ($A_2=0,749$ кДж); 3 – прямой расчёт МГЭ ($A_3=1,217$ кДж); 4 – обратный расчёт МГЭ ($A_4=1,722$ кДж)

Рисунок 11 – Распределение требуемого усилия осадки по рабочему ходу штампа

Таблица 2 – Результаты сравнительной оценки внутреннего состояния изделия по критерию минимальной неравномерности накопленной деформации J_5 по данным численного моделирования и физического эксперимента для процесса плоской осадки заготовки размером 50×80×40 мм на 25 мм

Метод моделирования	Тип решения	J_5
МКЭ	Прямое	0,1079
МГЭ	Прямое	0,0812
	Обратное (АРН)	0,1008

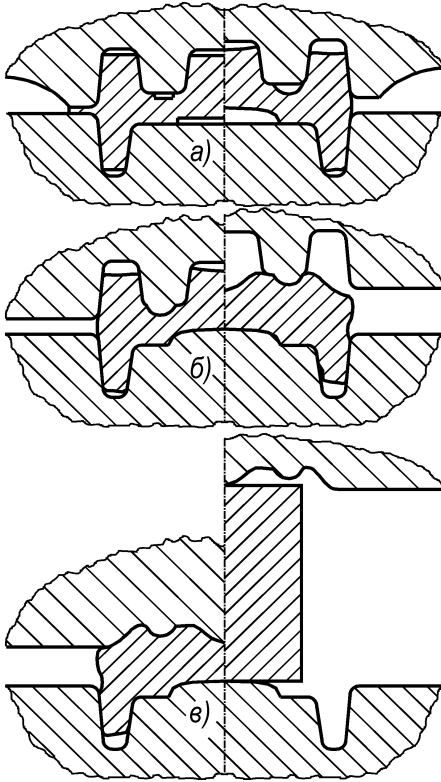


Рисунок 12 – Схемы переходов оптимального варианта штамповки из заготовки $\varnothing 25$ мм, согласно цепочке 1-4-29: чистой (а), черновой (б) и заготовительный (в)

вания по МКЭ.

Разработана расчётная схема решения многошаговой оптимизационной задачи, реализуемая по алгоритму ОП метода ДП, основанная на применении ПМГЭ.

Анализ выполненных исследований показывает, что многошаговая оптимизация моделируемых МГЭ процессов ОШ по критерию минимальной работы деформирования позволяет получить такую форму и последовательность введения ручьёв на промежуточных переходах (рисунок 12), при которой исключена стадия доштамповки, позволяющая существенно сократить величины металло- и энергозатрат на реализацию процесса изготовления поковки за счёт принятых в расчёте управлений. Учитывая аддитивный характер используемой целевой функции (13) при многошаговом представлении оптимизационной задачи формоизменения, решаемой методом ОП ДП, рассматривалась последовательность состояний от готовой поковки до искомой заготовки, в соответствии с рекуррентным соотношением

$$S_k(x_{k-1}) = \min\{F_k(x_{k-1}, u_k^0)\tau + S_{k+1}[x_k(x_{k-1}, u_k^0)]\}, \quad (15)$$

где $k=N-1, N-2, \dots, 2, 1$.

Показана эффективность применения гранично-элементной методик расчёта в решении задач многошаговой оптимизации процессов ОШ за счёт используемых усовершенствований, а также за счёт снижения размерности решаемых МГЭ задач, что особенно существенно ввиду значительного их роста при многошаговой оптимизации.

Экспериментальный сравнительный анализ оптимального варианта штамповки поковки «шестерня» с процессами однопереходной штамповки и штамповки с предварительной осадкой заготовки в плоском ручье, традиционно применяемыми в производстве, позволяет определить, что величина макси-

мального усилия в этом случае снижается на 25% и 37,7% соответственно, а величина полной работы деформирования – на 43% и 51,6%, соответственно.

В представляемой главе уделяется внимание решению проблемы «проклятия размерности» оптимизационных задач, решаемых методами ДП не только за счёт использования численных методов и алгоритмов их реализации, способных снижать объём расчётных действий (см. выше), но и за счёт введения дополнительных алгоритмов исходных ограничений, непосредственно сокращающих размерность оптимизационной схемы в целом. Так, в частности, в работе используется известный алгоритм «киевский венник», последовательно снижающий общее число рассматриваемых вариантов на каждом оптимизационном шаге до числа конкурентоспособных вариантов, входящих в зону значимости. В настоящей работе этот алгоритм обоснованно адаптирован к решению задач методом ДП по алгоритму ОП, что в рамках последовательного решения обратных задач (по АРН) позволяет свести их количество до одного – наиболее значимого на каждом из шагов (на [рисунке 13](#) область значимости была обозначена штриховкой). В результате этого, например, для задачи многошаговой оптимизации процесса ОШ шестерни, поисковая вариантная область сокращается в 7,75 раза (на 87%), а представленный выше коэффициент снижения размерности от применения МГЭ в замен МКЭ снижается с 2695...4043 раз до 22 раз.

Указанные положения были успешно применены для оптимизации процессов ОШ ([рисунк 13](#)) поковок двух видов по критерию минимальной неравномерности распределения накопленной деформации (14) в заданном сечении. Показано, что успешное применение в этом случае алгоритма «киевский венник» возможно, если в оптимизационных расчётах реализуется исключительно решение обратной задачи ОШ – по алгоритму ОП метода ДП, в этом случае целевая функция определяется только текущим значением параметра J_5 на рассматриваемом шаге. Тогда рекуррентное соотношение (15) должно быть приведено к виду

$$f_{n-\ell}(x_\ell) = \min_{U_\ell} [F(x_\ell, u_\ell)]. \quad (16)$$

Анализ этих результатов показывает, что на основе реализации алгоритма ОП ДП можно не только получить такую форму и последовательность введения ручьёв на промежуточных переходах (предложена трёхпереходная схема штамповки), при которой исключается стадия доштамповки на чистовом переходе,

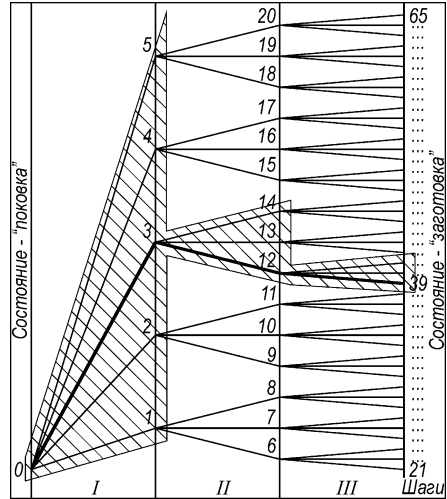


Рисунок 13 – Схема многошаговой оптимизации процесса ОШ: 0-65 –состояния объекта на разных шагах расчёта

но и существенно сократить показатель неравномерности распределения накопленной деформации в сечении готовой поковки. Результаты исследований не только подтверждаются адекватными данными, полученными прямым экспертным моделированием МКЭ (QForm) для обеих поволок, но и результатами экспериментальных исследований на металле (для поковки №1) (рисунок 14) и пластичных слоистых моделях (для поковки №2), причём в сравнении с заводской и специализированно - ориентированной технологией штамповки в три перехода, предложенной с аналогичной целью К.Ф. Неймайером. Результаты такого сравнения представлены в таблицах 3,4, соответственно. Результаты также подтверждены техническим актом внедрения в масштабах отрасли ассоциации «СТАНКОИНСТРУМЕНТ».

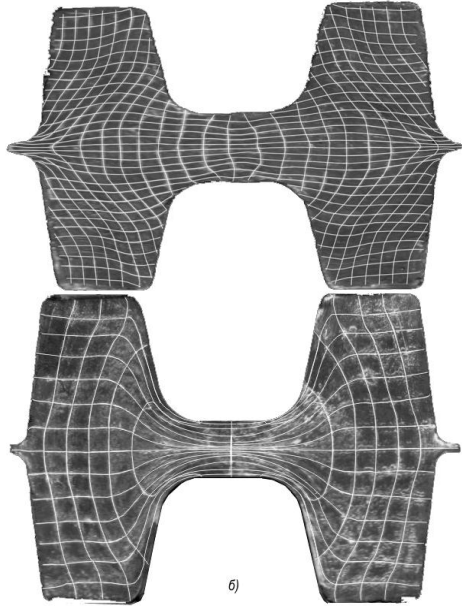


Рисунок 14 – Координатная сетка сечений поволок, полученных штамповкой по оптимальной (а) и однопереходной (б) схемам

Таблица 3 – Сравнение оптимальной технологии штамповки поковки 1 с известными вариантами ТП по критерию J_5

Технологическая схема штамповки	Расчёт			Эксперимент
	МКЭ	МГЭ		
		прямой	прямой	
В один переход	0,52	0,502	–	3,041
По схеме К.Ф. Неймайера	0,489	0,477	–	–
Оптимальная (путь 0-3-12-39)	0,401	–	0,409	0,511

Таблица 4 – Сравнение оптимальной технологии штамповки поковки 2 с известными вариантами ТП по критерию J_5

Технологическая схема штамповки	Расчёт			Эксперимент
	МКЭ	МГЭ		
		прямой	прямой	
В один переход	0,165	0,279	–	0,3678
По схеме К.Ф. Неймайера	0,246	0,211	–	0,2553
Оптимальная (путь 0-3-12-39)	0,162	–	0,193	0,2449

В пятой главе представлен анализ инженерных аспектов программной реализации и перспектив применения МГЭ в расчётах формоизменения в технологических процессах ОМД. В частности, рассматриваются вопросы программной реализации гранично-элементного решения производственных задач; перспективы применение МГЭ к процессам свободнойковки в вырезных бойках; приближённая диапазонная оценка поковок по показателю неравномерности распределения деформированного состояния по сечению в зависимости от их сложности; альтернативный способ учёта неравномерности деформированного состояния в расчётном формоизменении и отдельные данные сравнения результатов применения МГЭ и МКЭ к процессам ОШ.

Разработана программная реализация поэтапного решения задач нелинейного формоизменения для процессовковки и ОШ. На [рисунок 15](#) представлена её структурная схема реализации, выполняемая программно в автоматизированном режиме при моделировании процессов ОМД.

Представлены рекомендации по формированию файла исходных данных. Разработана программа внешнего циклического запуска для автоматического расчёта параметров одной стадии формоизменения. Разработан программный блок, формирующий в автоматизированном режиме файл исходных данных для расчёта следующих стадий формоизменения, в котором участие оператора заключается в корректировке текущих номеров «особых» точек на расчётном контуре, которые для прямых задач назначаются из условия непроникновения формоизменяемого металла через контактную границу инструмента, а для обратных – условиями некритерияльного или оптимизационно - критерияльного «отлипания» металла от гравюры штампа.

На примере технологической операции кузнечной протяжки заготовки вырезными бойками представлен вариант применения МГЭ для определения рациональных показателейковки (пределов угла охвата) для случая применения бойков с радиальным вырезом. Предлагаемый расчётным подходом преследуется цель – исключения образования, закрытие и заковка дефектов нарушения целостности поперечного сечения ([рисунок 16](#)), формируемого действующей в нём схемой напряжённого состояния.

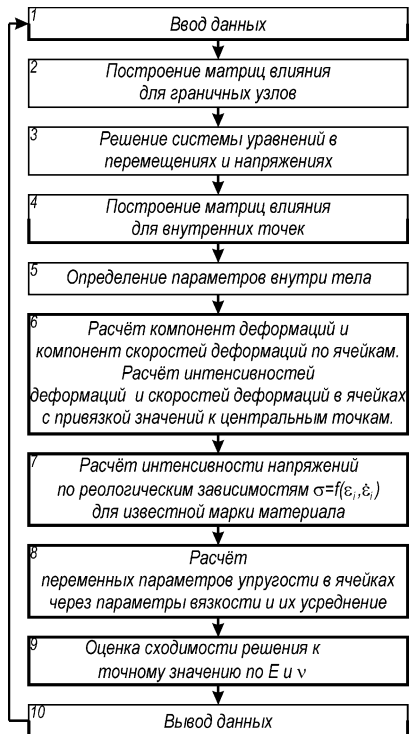


Рисунок 15 – Последовательность действий, реализуемых расчётной программой



Рисунок 16 – Темплет вала с «развитым» осевым дефектом сплошности

Показано, что в качестве угла охвата целесообразно использовать не угол, измеряемый относительно центра деформируемого сечения заготовки («угол охвата по заготовке» β), а угол, измеряемый относительно центра радиального выреза в бойке («угол охвата по бойку» γ), который в процессековки проще контролировать по разметке на боковой поверхности инструмента.

Получено выражение, по которому определяется максимальное (предельное) значение глубины радиального выреза в бойке

$$[h_{ep}] = R_{ep} \frac{[\gamma]Y\pi R_{ep}^2 - \pi R_{заг}^2 \cdot 180}{360YR_{ep} \left(\sin \frac{[\gamma]}{2} \right)}; \quad [h_{ep}] \geq h_{ep}; \quad [\gamma] \geq \gamma, \quad (17)$$

где Y – уков; $[\gamma] = 177,53k_R^{-0,7983}$. (18)

Из условия «отрицательности» компонент гидростатического давления (см. например рисунок 17) и «нижнепредельных» их значений в сечении ($\frac{\sigma_y}{\sigma_x} \leq k_s$), получены функциональные выражения, определяющие связь между

соотношениями радиуса выреза в бойке и радиуса используемой заготовки $k_R = \frac{R_{ep}}{R_{заг}}$ (в пределах $3 > k_R > 1$) от угла охвата γ , которые в разной степени обеспечивают условия целостности поперечного сечения поковки. В частности, на рисунке 18 представлены зависимости

$$\gamma_1 \cong -51,761 \cdot \ln(k_R) + 80,57 \quad \text{при } \sigma_x < 0; \quad \sigma_y < 0 \quad (19)$$

$$\gamma_2 \cong 123,7 \cdot k_R^{-1,0747} \quad \text{при } k_s = 2,85 \quad (20)$$

$$\gamma_3 \cong 144,71 \cdot k_R^{-0,9242} \quad \text{при } k_s = 1,30 \quad (21)$$

$$\gamma_4 \cong 165,46 \cdot k_R^{-0,8075} \quad \text{при } k_s \rightarrow 1, \quad (22)$$

позволяющие определять последовательно диапазоны значений $\gamma=f(k_R)$ при деформации в которых: соблюдается сохранность целостности поковки при

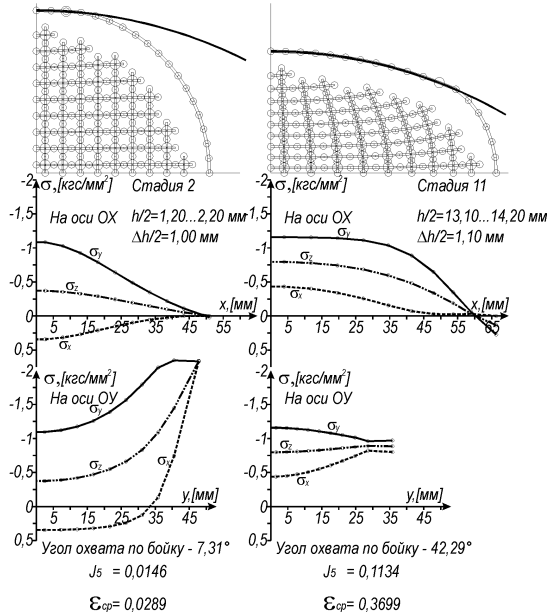


Рисунок 17 – Две расчётные стадии операции протяжки в радиально-вырезных бойках $K_R=2,75$ (Pb ; 20°C ; $R_{302}=50$ мм)

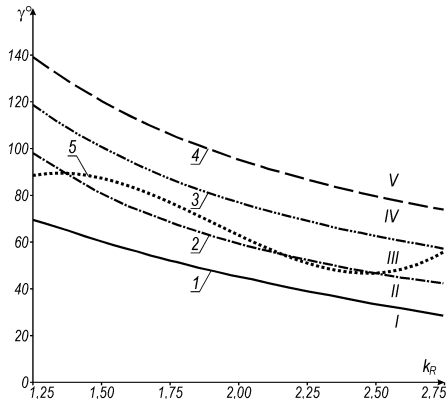


Рисунок 18 – Рациональные значения угла охвата по бойку (γ) для кузнечной протяжки в радиально-вырезных бойках (МГЭ):

I – область гарантированного образования дефектов нарушения сплошности; *II* – область нейтрального образования пустот; *III* – область закрытия пустот; *IV* – область заковки пустот; *V* – область вытеснения металла за пределы выреза

ранее бездефектном сечении заготовки (подобласти: II, III и IV); гарантируется эффект «закрытия» ранее образованных дефектов нарушения сплошности с частичной их заковкой или без неё (подобласть III); гарантируется эффект заковки ранее образованных дефектов нарушения сплошности (подобласть IV).

Получена также зависимость

$$\gamma_{\min} = \gamma_5 \approx 60,6k_R^3 - 347,01k_R^2 + 605,11K_R - 244,05, \quad (23)$$

определяющая нижний предел угла γ исходя из условий минимизации неравномерности деформированного состояния в расчётном сечении, оцениваемому по выражению (14).

Представлена приближённая диапазонная оценка поковок по показателю неравномерности распределения деформированного состояния в сечении J_5 , в зависимости от количественного критерия их сложности S_T ($2,75 > S_T > 0,75$) по данным численного моделирования (МГЭ и МКЭ)

$$\left. \begin{aligned} J_{5\max}^{opt} &= 0,0758 \cdot S_T^2 - 0,0982 \cdot S_T + 0,1593 \\ J_{5\max}^{rac} &= 0,0545 \cdot S_T^2 + 0,0071 \cdot S_T + 0,1112 \end{aligned} \right\}, \quad (24)$$

и экспериментальных исследований

$$\left. \begin{aligned} J_{5\max}^{opt} &= 0,0532 \cdot S_T^2 + 0,0573 \cdot S_T + 0,0098 \\ J_{5\max}^{rac} &= 0,22 \cdot S_T^2 - 0,3812 \cdot S_T + 0,3901 \end{aligned} \right\}. \quad (25)$$

При этом анализируются не только данные, полученные при участии автора, но и сторонние данные, приведенные автором к единому показателю неравномерности J_5 . Классификация процессов представлена в трёхдиапазонном виде, подразделяя, соответственно, все технологические решения на характерные для реализации оптимизационных процедур в целевом направлении, рациональные и нерациональные, граничные переходы между которыми определены выражениями (24) и (25).

Представлен один из альтернативных способов учёта неравномерности деформированного состояния в расчётах формоизменения МГЭ. Так, при построении расчётных алгоритмов МГЭ вместо переменных параметров упругости

$$E_* = E \frac{3}{2(1+\nu)\psi + 1 - 2\nu}, \quad \nu_* = \frac{\psi(1+\nu) - (1-2\nu)}{2\psi(1+\nu) + 1 - 2\nu}, \quad (26)$$

(где E_* и ν_* – «переменные параметры» упругости, зависящие от обычных параметров упругости – модуля упругости E , коэффициента Пуассона ν и параметра

пластичности $\psi = \frac{3}{2(1+\nu)} E \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i}$, определяемого интенсивностями де-

формаций ε_i и напряжений σ_i), на примере осадки полосы показана возможность применения теории метода планируемого эксперимента для поэтапного определения функциональной зависимости модуля упругости от координат, посредством применения полученных аппроксимационных уравнений:

$$E_{*1} = 81,74355206 - 0,07623476x + 8,889606613y - 0,0030268xy \quad (27)$$

$$E_{*2} = 140,21772 - 1,5318418x - 2,0457394y + 0,26429066xy \quad (28)$$

$$E_{*3} = 88,131 + 0,353x + 1,026y - 0,008x^2 - 0,019xy + 1,433y^2. \quad (29)$$

Также представлены отдельные данные сравнения результатов применения МГЭ и МКЭ к ТП ОШ.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В диссертационной работе автором выполнены исследования, на основе которых разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение, заключающейся в создании научно обоснованной методики проектирования процессовковки и объёмной штамповки на основе применения гранично-элементного моделирования.

1 Моделирование формоизменения в технологических расчётах ОМД, позволяющее повысить надёжность и качество численных результатов, реализовано на основе прямой формы МГЭ и усовершенствований, связанных с аппроксимационным уточнением и применением методики решения нелинейных задач формоизменения по алгоритму переменной вязкости.

2 Показано, что основные положения расчётной методики моделирования МГЭ прямых задач формоизменения могут успешно применяться для разнообразных процессов ОМД, например, электровысадки утолщений, объёмной штамповки, кузнечной протяжки бойками с угловой и радиальной конфигурациями вырезов и др.

3 Установлено, что посредством применения МГЭ к расчётам обратных задач формоизменения в процессах объёмной штамповки реализован алгоритм реверсного нагружения (АРН), позволяющий не только снизить не менее чем в два раза размерность расчётных действий обратного моделирования, но и реализовывать его программными средствами со сложностью, аналогичной сложности прямого моделирования.

4 Показано, что применение постадийного гранично-элементного решения обратных задач формоизменения в проектировании технологических процессов объёмной штамповки обеспечивает гарантированное (бездефектное) заполнение полости чистового ручья, рациональные затраты металла, энергии и требуемое качество распределения деформации в изделиях.

5 На примере конкретных процессов объёмной штамповки показано, что результаты применения МГЭ при оценке энергосиловых показателей в сравнении с результатами экспериментальных исследований более точны в обратном моделировании, чем в прямом (в том числе – конечно-элементном). Это расширяет перспективы применения МГЭ (АРН) в оптимизационном моделировании формоизменения по энергосиловым критериям процесса ОМД при проектировании.

6 Развита методика совершенствования МГЭ в решении задач обратного формоизменения в процессах ОМД, путём их введения в класс корректных, близкая по идее к подходу, характерному для квазиразрешения.

7 Гранично-элементная методика применена к решениям многошаговых оптимизационных задач обратного формоизменения при объёмной штамповке и реализована методом обратной прогонки динамического программирования (ОП ДП). В качестве целевых функций использовались параметры работы деформирования и показатель равномерности распределения деформации в штампуемых поковках. В сравнении с двумя производственными вариантами штамповки достигнуто:

– экспериментальное снижение величины максимального усилия штамповки шестерни на 25% и 37,7%, а величина полной (суммарной) работы деформирования – на 43% и 51,6%, соответственно;

– экспериментальное значение критерия деформационной неравномерности J_2 Н-образных поволоков снижено с 3.04 до 0.51 для поковки №1 и с 0.368 до 0.245 для поковки №2.

8 Применительно к процессам объёмной штамповки создана эффективная схема дополнительного снижения размерности многошаговых оптимизационных задач, решаемых методом обратной прогонки динамического программирования (ОП ДП).

9 Достоверность исследований подтверждается достигнутыми результатами промышленной апробации и отраслевым внедрением: поковка кольца выпускной трубы (ООО «РЗ СИИТО»): снижение расхода металла – 5%, рост стойкости штампов – 23%, снижение брака – 19%; поковка стойка (ФГУП «РЗ «Рубин»): рост стойкости штампов – 21%, снижение брака – 33%, снижение работы деформирования – 12...17%, снижение максимального усилия – 11...15%; поковки валов (ОАО «РЗ «Рубин»): снижение брака по дефектам нарушения сплошности – 72%; внедрение в масштабах отрасли на предприятиях ассоциации «СТАНКОИНСТРУМЕНТ» (2009 г): среднее снижение расхода металла – 5%, рост стойкости штампов – 24%, снижение брака – 28%, экономический эффект от внедрения технологии на одном КГШП номинальным усилием 6.3 МН при средней годовой загрузке 1150 т. – 240 тыс.руб.

Основное содержание диссертации изложено:

– в изданиях, рекомендованных ВАК (для докторских диссертаций):

1. **Вовченко, А.В.** Моделирование формоизменения в процессах объёмной штамповки численными методами / **А.В. Вовченко**, Ю.Н.Резников, А.В.Быкодоров // Вестн. ДГТУ. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2001. – Т.1. – №1(7). – С.33–39.

2. Резников, Ю.Н. Уменьшение длительности стадии доштамповки на основе моделирования формоизменения / Ю.Н. Резников, **А.В.Вовченко**, А.В.Быкодоров // Кузнечно-штамповочное производство.–2001.–№4.–С.33–36.

3. Резников, Ю.Н. Визуализированный поиск оптимальных результатов компьютерного моделирования формоизменения деформируемого металла в процессах объёмной штамповки / Ю.Н. Резников, **А.В. Вовченко**, В.Е.Жиленков

// Вестн. ДГТУ.– Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2001. – Т.1. – №4(10). – С.38–44.

4. Резников, Ю.Н. О применении метода граничных элементов в математическом моделировании нестационарных процессов деформации / Ю.Н.Резников, [А.В. Вовченко](#) // *Металлы*. – 2002.– №6.– С.49–54.

5. Резников, Ю.Н. Особенности расчётов процессов объёмной штамповки, основанных на решении обратных задач / Ю.Н. Резников, [А.В. Вовченко](#) // Вестн. ДГТУ. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003. – Т.3. – №4(18). – С.430–437.

6. Резников, Ю.Н. Уменьшение неравномерности деформации по сечению поковки при объёмной штамповке / Ю.Н. Резников, [А.В.Вовченко](#), В.Е.Жиленков // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2004. – №9. – С.49–50.

7. Резников, Ю.Н. Расчёт рациональных заготовок в процессе объёмной штамповки поковок сложной формы / Ю.Н. Резников, [А.В.Вовченко](#), С.А. Коломиец // Вестн. ДГТУ.– Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2004. – Т.4. – №4(22). – С.443–446.

8. Резников, Ю.Н. Об оптимизации процессов деформирования металлов / Ю.Н. Резников, [А.В. Вовченко](#), В.Е. Жиленков // *Металлы*. – 2006. – №1. – С.39–43.

9. [Вовченко, А.В.](#) Расчёт формы и размеров полуфабрикатов в процессах объёмной штамповки на основе решения обратных задач формоизменения / [А.В.Вовченко](#), Ю.Н.Резников: Вестн. ДГТУ. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006. –Т.6.–№3(30).–С.208–211.

10. Резников, Ю.Н. Расчёт и оптимизация процессов объёмной штамповки / Ю.Н. Резников, [А.В. Вовченко](#) // Вестн. ДГТУ. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007³. – Т.7. – №1(32). – С.3–24.

11. [Вовченко, А.В.](#) О возможности улучшения решений обратных задач расчёта формоизменения в процессах ОМД / [А.В. Вовченко](#), Ю.Н.Резников, А.Н. Соловьёв // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Сер. Техн. науки*. – 2009. – №3. – С. 60–64.

12. [Вовченко, А.В.](#) Оптимизация процессов объёмной штамповки, реализуемая направленным определением заготовительных форм полуфабрикатов на технологических переходах / [А.В. Вовченко](#), Ю.Н.Резников // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2009. – №7. – С.28–33.

13. [Вовченко, А.В.](#) Оценка уровня оптимальности распределения накопленной деформации в поковках, изготавливаемых в открытых штампах / [А.В.Вовченко](#) // Вестн. ДГТУ. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2011. – Т.11. – №6(57). – С.833–841.

³ Подпадает под «...работы соискателей, опубликованные или принятые к печати до 31 декабря 2006 года изданиями, входившими в предыдущий перечень, но не вошедшими в новый, после выхода публикаций в свет учитываются при приеме и защите диссертаций» (Бюллетень ВАК. – 2007. – № 1. – С.3). Предшествующий перечень в полном виде опубликован в (Бюллетень ВАК. – 2005. – № 4. – С.2-23), см. С.4.

14. **Вовченко, А.В.** О перспективных особенностях применения метода граничных элементов в современном проектировании процессов объёмной штамповки и решении обратных задач формоизменения / **А.В.Вовченко** // Справочник. Инженерный журнал.–2012.–№3.–С.16–22.

15. **Вовченко, А.В.** Об определении эффективных условий ковки радиально-вырезными бойками численным методом граничных элементов / **А.В.Вовченко** // *Металлы*. – 2012. – №2. – С.75–82.

16. **Вовченко, А.В.** Гранично-элементное определение условий равномерного распределения деформации в поковках, получаемых кузнечной протяжкой радиально вырезными бойками / **А.В. Вовченко** // *Вестн. ДГТУ*. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2012. – №4(65). – С.48–55.

– в остальных изданиях:

17. Yu.N. Reznikov, **A.V. Vovchenko**. Boundary Element Method in the Mathematical Simulation of Nonsteady-State Deformation Processes / *Russian Metallurgy (Metally)*, МАИК “Nauka/Interperiodica” (Russia) – Vol. 2002, No.6, pp.553-558.

18. Yu.N. Reznikov, **A.V. Vovchenko**, V.E. Zhilenkov. On the Optimization of Metal Forming. / *Russian Metallurgy (Metally)*, Pleiades Publishing, Inc. (Dover, St.of Delaware, USA) – Vol. 2006, No.1, pp.33-37.

19. **A.V. Vovchenko**. Boundary Element Calculation About of the Effective Conditions for Forging by Radially Contoured Dies // *Russian Metallurgy (Metally)*, Pleiades Publishing, Ltd.(Dover, St.of Delaware, USA) – Vol. 2012, No.3, pp.232–238.

20. **Вовченко, А.В.** Совершенствование гранично-элементных расчётов применительно к технологическим задачам обработки металлов давлением / **А.В. Вовченко**, Ю.Н. Резников // *Динамика технологических систем: тез. докл. V междунар. науч.-техн. конф. Т1*.–Ростов н/Д: ДГТУ, 1997. – С.140-142.

21. Пасхалов, А.С. Применение метода граничных элементов в расчётах процессов прессования / А.С. Пасхалов, Ю.Н. Резников, **А.В.Вовченко** // *Оптимизация процессов обработки металлов давлением: межвуз. сб. науч. тр.* – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ. – 1998. – С. 28–38.

22. Калинин, Г.Г. Решение технологических задач объёмной штамповки на основе расчётов формоизменения / Г.Г. Калинин, **А.В. Вовченко** // *Оптимизация процессов обработки металлов давлением: межвуз. сб. науч.тр.* – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ. – 1998. – С.59–65.

23. **Вовченко, А.В.** Применение расчётов для совершенствования качества осесимметричных поковок / **А.В. Вовченко** // *Проблемы пластичности в технологии: тез. докл. II междунар. науч.-техн. конф.* – Орёл: ОрелГТУ, 1998. – С.76–77.

24. Резников, Ю.Н. *Инженерная механика твёрдого тела: учеб. пособие (гриф УМО)* / Ю.Н. Резников, Е.А. Ефремова, **А.В. Вовченко**. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 1998. – 167 с.

25. Резников, Ю.Н. Расчёт многошаговой оптимизации процессов объёмной штамповки / Ю.Н. Резников, **А.В. Вовченко**, Г.Г. Калинин // *Теория, технология, оборудование и автоматизация обработки металлов давлением и резанием: сб. науч. тр.* – Тула: ТулГУ, 1999. – Вып.1. – С.129–134.

26. **Вовченко, А.В.** Моделирование формоизменения материала в процессах электровысадки методом граничных элементов (МГЭ) / **А.В.Вовченко** / ДГТУ – Ростов-на-Дону, 1999.–10с. Деп. в ВИНТИ 2.12.99, №3577-В99.

27. Резников, Ю.Н. Проектирование рациональных технологических процессов объёмной штамповки с применением численного метода граничных элементов / Ю.Н. Резников, **А.В. Вовченко**, А.В. Быкодоров // Труды Рубцовского индустр. инст. Вып.6: Техн. науки; под ред. А.В.Кутышкина / РИИ. – Рубцовск, 2000. – С. 126–130.

28. Резников, Ю.Н. Повышение прочности деталей машин путём совершенствования технологии изготовления заготовок для них / Ю.Н.Резников, **А.В.Вовченко** // Проблемы производства машин: Вестн. ДГТУ. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2000. – С.106–109.

29. **Вовченко, А.В.** Совершенствование гранично-элементных расчётов процессов объёмной штамповки: автореф. дис. ...канд.техн.наук: 05.03.05 / **Вовченко Арменак Владимирович**. – Ростов н/Д. – 2000.–20с.

30. **Вовченко, А.В.** Особенности обратного гранично-элементного моделирования процессов объёмной штамповки / **А.В. Вовченко** // Механика деформируемого твёрдого тела и обработка металлов давлением: сб.науч.тр.– Тула: ТулГУ, 2002. – Ч.1. – С.70–76.

31. Резников, Ю.Н. Оптимизация технологических процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие (гриф УМО) / Ю.Н. Резников, Б.С. Мороз, **А.В. Вовченко**. – Ростов-н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2002. – 94с.

32. Резников, Ю.Н. Об оптимизационных расчётах в обработке металлов давлением и средствах их машинной реализации / Ю.Н. Резников, **А.В. Вовченко**, С.А. Коломиец // Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки и сборки в машиностроении и приборостроении: матер. 5-го междунар. науч.-техн. сем. (22-24 февраля, Свалява, Карпаты). – Киев, 2005. – С.131–132.

33. Резников, Ю.Н. Разработка прогрессивных технологических процессов объёмной штамповки на основе моделирования формоизменения / Ю.Н. Резников, **А.В. Вовченко**, С.А. Коломиец // Прогрессивные технологические процессы в металлургии и машиностроении. Экология и жизнеобеспечение. Информационные технологии в промышленности и образовании: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Ростов н/Д: ДГТУ, ВЦ «Вертол Экспо», 2005. – С.83–84.

34. Резников, Ю.Н. Тенденции современного развития способов разработки технологических процессов объёмной штамповки / Ю.Н.Резников, **А.В.Вовченко** // Металлургия, машиностроение, станкоинструмент: сб. трудов МНПК. ВЦ «ВЕРТОЛЭКСПО». – Ростов-н/Д. – сентябрь 2006. – С. 3:20-3:22.

35. **Вовченко, А.В.** Исследование формоизменения в процессах объёмной штамповки с целью снижения металло- и энергозатрат, улучшения качества готовых поковок / **А.В. Вовченко** // Фундаментальные и прикладные проблемы современной техники: сб.раб. лауреатов конкурса молодых учёных им. акад. И.И.Воровича. –Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006.– Вып.9. – С.33–40.

36. **Вовченко, А.В.** Перспективное направление применения методов численного моделирования в проектировании процессов объёмной штамповки / **А.В. Вовченко** // Прогрессивные технологии в современном машиностроении:

сб. ст. IV междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПДЗ, июнь 2008. – С.56–59.

37. **Вовченко, А.В.** Сравнение результатов гранично-элементного и конечно-элементного решений обратной задачи формоизменения при объёмной штамповке / **А.В. Вовченко**, Ю.Н. Резников, И.Н. Варивода // Современные технологии в машиностроении: сб. ст. XII междунар. науч.-пр. конф. – Пенза: ПДЗ, декабрь 2008. – С. 92–94.

38. Резников, Ю.Н. Теория обработки металлов давлением: текст лекций / Ю.Н. Резников, **А.В. Вовченко**. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – 96с.

39. **Вовченко, А.В.** Перспективы применения численных методов в проектировании процессов объёмной штамповки / **А.В. Вовченко** // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: мат. междунар. науч.-практ. конф. в рамках 13-й междунар. агропромышленной выставки «Интерагромаш-2010». – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – С.195–199.

40. **Вовченко, А.В.** Критериальная концепция гранично-элементной реализации алгоритма реверсивного нагружения в решении обратных задач формоизменения для процессов объёмной штамповки / **А.В.Вовченко** / Прогрессивные технологии в современном машиностроении: сб. ст. VI междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПДЗ, июнь 2010. –С. 97–100.

41. **Вовченко, А.В.** Применение метода граничных элементов к моделированию процессовковки радиально-вырезными бойками / **А.В.Вовченко** // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: мат-лы II междунар. науч.-практ. конф. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, май 2011. – С. 82–86.

42. **Вовченко, А.В.** Совершенствование технологии процессов объёмной штамповки на основе применения гранично-элементных расчётов: монография / **А.В. Вовченко**. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2011. – 264с.

43. Свидетельство РФ № 2012661391 о гос. регистрации программы для ЭВМ. Модуль программного постадийного решения прямых и обратных задач пластического формоизменения металла методом граничных элементов (нелинейная реологическая модель) / **А.В. Вовченко** (Россия). – Заявка № 2012619255; поступила 29.10.2012; зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ 13.12.2012.

В печать 20.03.2013

Формат 60x84/16. Бумага тип №3. Офсет.

Объём 2,1 усл.п.л. Заказ №215. Тираж 100 экз.

Отпечатано в издательском центре ДГТУ

Адрес университета и полиграфического предприятия:

344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.