

На правах рукописи



РЕМНЕВ КИРИЛЛ СЕРГЕЕВИЧ

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ
АНИЗОТРОПНЫХ ЛИСТОВЫХ И ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК
В ПРОЦЕССАХ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

Специальность 05.02.09 - **Технологии и машины обработки
давлением**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Тула 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»

- Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Яковлев Сергей Сергеевич.
- Официальные оппоненты: Евсюков Сергей Александрович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»
(г. Москва), заведующий кафедрой МТ-6;
- Попов Игорь Петрович,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Самарский государственный аэро-
космический университет им. академика
С.П. Королева (Национальный исследователь-
ский университет)» (г. Москва), профессор ка-
федры «Обработка металлов давлением»;
- Шеркунов Виктор Георгиевич, доктор техниче-
ских наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Южно-
Уральский государственный университет»
(г. Челябинск), заведующий кафедрой «Машины
и технологии обработки материалов давлением».
- Ведущая организация: ОАО «Научно-производственное объединение
«СПЛАВ».

Защита состоится «9» июня 2015г. в 14 час. на заседании диссертационного совета Д 212.271.01 при ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» (300012, г. Тула, ГСП, просп. Ленина, д. 92, (9-101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте
ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»
(<http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/remnev-ks/>)

Автореферат разослан «10» апреля 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Черняев
Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Производство листового и трубного проката в России и других крупных промышленных странах развивается ускоренными темпами, который при дальнейшей переработке подвергается процессам пластического деформирования. Процессы пластического деформирования (обработки металлов давлением) относятся к числу высокоэффективных, экономичных способов изготовления металлических изделий, позволяющих повысить производительность труда, снизить энергоматериалоемкость производства, обеспечить высокое качество изготавливаемых изделий. Особенно быстро растет производство тонколистовой холоднокатаной стали.

Значительная часть листового металла подвергается различным методам обработки металлов давлением (штамповке) - вытяжке, формовке, обтяжке и т.д. Листовая штамповка позволяет получать сложные по форме и точные по размерам изделия при значительной экономии металла и высокой производительности труда. Большое значение приобретает дальнейшее совершенствование процессов пластического формообразования листового металла. В связи с этим важной проблемой теории обработки металлов давлением является устойчивость процессов пластического деформирования. Повышение устойчивости операций обработки металлов давлением обеспечивает снижение брака, значительную экономию металла, способствует увеличению надежности процессов пластического деформирования, улучшает качество продукции.

Одним из типов потери устойчивости является складкообразование. Она является следствием потери устойчивости на сжатых и сжато растянутых участках листовой заготовки и приводит к искажению формы изделия на начальном этапе пластического деформирования. Большинство исследований этого вопроса касались малых упругих деформаций изотропных материалов. Однако потеря устойчивости при обработке металлов давлением происходит при пластических деформациях. Устойчивость все еще остается сравнительно мало изученным разделом теории листовой штамповки.

Листовой и трубный прокат, используемый в процессах пластического деформирования, обладает начальной анизотропией, т.е. направленностью механических свойств в пластическом состоянии - ортотропией, характеризуемой главными осями анизотропии. Анизотропия механических свойств листового и трубного проката обусловлена маркой материала, технологическими режимами его получения, оказывает как положительное, так и отрицательное влияние на устойчивость протекания технологических процессов обработки металлов давлением (ОМД). Поэтому большой интерес представляет потеря устойчивости в виде складкообразования листового и трубного проката из анизотропного материала.

Широкое внедрение в промышленность процессов пластического деформирования деталей ответственного назначения сдерживается недостаточно развитой теорией пластической устойчивости тонколистовых и трубных заготовок из анизотропных материалов с учетом реальных свойств материала.

Решение этой научно-технической проблемы может быть достигнуто путем максимального использования внутренних резервов деформирования материала на базе создания научно обоснованных технологических процессов пластического деформирования тонколистовых и трубных заготовок, учитывающих анизотропию механических свойств, упрочнение, условия устойчивого протекания операций ОМД и другие особенности процессов обработки металлов давлением.

В этой связи развитие теории пластической устойчивости тонколистовых и трубных заготовок с учетом анизотропии механических свойств, упрочнения и других особенностей процессов деформирования и на ее основе разработка научно обоснованных технологических процессов пластического деформирования деталей ответственного назначения, обеспечивающих условия устойчивого протекания операций обработки металлов давлением, является актуальной, важной научно-технической проблемой, решение которой вносит значительный вклад в развитие страны.

Работа выполнена в соответствии с грантом Президента РФ на поддержку ведущих научных школ на выполнение научных исследований № НШ-4190.2006.8 (2006 – 2009 гг.), государственным контрактом Федерального агентства по науке и инновациям № 02.513.11.3299 (2007 г.), грантами РФФИ № 05-01-96705 (2005-2006 гг.), № 07-01-96409 (2007 – 2009 гг.), №10-08-97526 (2010 – 2012 гг.) и № 13-08-97518 р_центр_а (2013 – 2015 гг.) и научно-техническими программами Министерства образования и науки Российской Федерации «Развитие научного потенциала высшей школы (2006 – 2008 гг.)» (проект № РНП 2.1.2.8355) и «Развитие научного потенциала высшей школы (2009 – 2010 гг.)» (проекты № РНП 2.1.2/730 и № РНП 335), Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009 - 2013 гг.)» (проект № П1123), а также рядом хоздоговорных работ с машиностроительными предприятиями Российской Федерации.

Цель работы. Повышение эффективности изготовления деталей ответственного назначения на основе развития теории пластической устойчивости тонколистовых и трубных заготовок из анизотропных материалов с учетом реальных свойств материала (анизотропии механических свойств, упрочнения) и создание на ее базе научно обоснованных режимов операций правки растяжением, вытяжки, обжима и ротационной вытяжки с утонением.

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

1. Выявление видов потери устойчивости при пластическом деформировании тонкостенных листовых и трубных заготовок из анизотропных материалов.

2. Разработка условия потери устойчивости в виде образования складок тонкостенного листа из трансверсально-изотропного материала и материала, обладающего плоскостной анизотропией механических свойств, на основе энергетического метода.

3. Разработка математических моделей операций правки растяжением тонкой полосы из анизотропных материалов с малыми и большими относительными удлинениями, которые с использованием предложенного условия устойчивости позволяют оценить технологические режимы стабильного протекания исследуемых операций пластического деформирования без образования складок. Выявление закономерностей изменения критической толщины полосы от силовых режимов, технологических параметров и механических свойств при правке растяжением тонкой полосы из анизотропного материала при малом и большом относительном удлинении.

4. Разработка условия потери устойчивости фланца тонколистовой заготовки (кольцевой пластины с внутренним и внешним радиусами) из материалов, обладающих плоскостной анизотропией механических свойств, при вытяжке на основе энергетического метода.

5. Формулировка условия потери устойчивости конической оболочки (осесимметричной с образованием поперечных складок или несимметричной с

образованием продольных складок, направленных вдоль образующей оболочки) в очаге деформации при обжиге трубной заготовки из анизотропного материала на основе энергетического метода для определения критических режимов деформирования.

6. Разработка условия локальной потери устойчивости (шейкообразования) тонкостенной трубной заготовки при ротационной вытяжке с утонением коническими роликами тонкостенных трубных заготовок из материалов, обладающих цилиндрической анизотропией механических свойств, на основе критерия положительности добавочных нагрузок.

7. Выполнение теоретических и экспериментальных исследований операций правки растяжением тонкой полосы и вытяжки листовых заготовок, обжима и ротационной вытяжки трубных заготовок из анизотропных материалов, в результате которых выявление влияния анизотропии механических свойств исходных материалов, технологических параметров, геометрических размеров заготовки и инструмента, степени деформации, условий трения контактных поверхностей инструмента и заготовки на условия устойчивого протекания этих процессов.

8. Разработка практических рекомендаций и использование результатов исследований в промышленности и учебном процессе.

Объект исследования. Операции правки растяжением, вытяжки, обжима и ротационной вытяжки с утонением анизотропных тонколистовых материалов.

Предмет исследования. Условия устойчивого протекания рассматриваемых операций на начальном этапе пластического деформирования.

Методы исследования. В работе использован комплексный метод исследований, включающий теоретический анализ и экспериментальную проверку полученных результатов в лабораторных и производственных условиях.

Теоретические исследования операций правки растяжением тонкой полосы, вытяжки тонколистовой заготовки, обжима и ротационной вытяжки с утонением трубных заготовок из анизотропных материалов выполнены с использованием основных положений механики деформируемого твердого тела и теории пластичности жесткопластического тела. Условия потери устойчивости в виде образования складок тонкостенного листа, потери устойчивости фланца тонколистовой заготовки (кольцевой пластины с внутренним и внешним радиусами) из трансверсально-изотропного материала и материала, обладающего плоскостной анизотропией механических свойств, разработаны на основе энергетического метода. Условия пластической потери устойчивости (осесимметричной с образованием поперечных складок или несимметричной с образованием продольных складок, направленных вдоль образующей оболочки) в очаге деформации при обжиге трубной заготовки из анизотропного материала получены на основе энергетического метода. Условия локальной потери устойчивости (шейкообразования) тонкостенной трубной заготовки из анизотропного материала при ротационной вытяжке с утонением коническими роликами предложены на основе критерия положительности добавочных нагрузок. Анализ напряженного и деформированного состояний заготовки, силовых режимов в исследуемых процессах пластического деформирования осуществлен численно методом конечно-разностных соотношений с использованием ЭВМ путем совместного решения дифференциальных уравнений равновесия, условия пластичности Мизеса-Хилла и кинематических соотношений при заданных начальных и граничных условиях.

При проведении *экспериментальных исследований* использованы современные испытательные машины (испытательный комплекс «INSTRON 5982»,

универсальные испытательные машины Р-5, ГМС-50), гидравлический пресс модели ПА 7832, 3-роликовый давяльный раскатной станок В-280М и регистрирующая аппаратура. Определение параметров кривых упрочнения осуществлялось методом наименьших квадратов.

Автор защищает:

- условие потери устойчивости в виде образования складок тонкого листа из материала, обладающего плоскостной анизотропией механических свойств, разработанное на основе энергетического метода путем определения изменения полной потенциальной энергии плоской листовой заготовки, нагруженной силами, лежащими в ее плоскости, после перехода из плоской формы равновесия в криволинейную;

- выражения для определения удельной работы (потенциальной энергии деформации изгиба и кручения пластины на единицу площади срединной плоскости) изгибающих и крутящих моментов внутренних сил при образовании складок анизотропного элемента, а также для определения изменения потенциальной энергии деформации срединной плоскости при образовании складок анизотропного элемента;

- математические модели операций правки растяжением тонкой полосы из анизотропных материалов с малыми и большими относительными удлинениями;

- научно обоснованное условие потери устойчивости фланца листовой заготовки (кольцевой пластины с внутренним и внешним радиусами) из материала, обладающего плоскостной анизотропией механических свойств, при вытяжке тонколистовой заготовки, предложенное на базе энергетического метода;

- сформулированные условия потери устойчивости конической оболочки (осесимметричной с образованием поперечных складок или несимметричной с образованием продольных складок, направленных вдоль образующей оболочки) в очаге деформации при обжиге трубной заготовки из анизотропного материала, созданные на основе энергетического метода;

- условия локальной потери устойчивости (шейкообразования) тонкостенной трубной заготовки при ротационной вытяжке с утонением коническими роликами тонкостенных трубных заготовок из материалов, обладающих цилиндрической анизотропией механических свойств, разработанные на основе критерия положительности добавочных нагрузок;

- выявленные закономерности влияния анизотропии механических свойств исходных материалов, технологических параметров, геометрических размеров заготовки и инструмента, степени деформации, условий трения контактных поверхностей инструмента и заготовки на условия устойчивого протекания операций правки растяжением тонкой полосы и вытяжки листовых заготовок, обжима и ротационной вытяжки трубных заготовок из анизотропных материалов;

- научно обоснованные рекомендации по расчету и проектированию технологических процессов изготовления осесимметричных деталей ответственного назначения из анизотропных материалов, обеспечивающие условия устойчивого протекания операций вытяжки листовых заготовок, обжима и ротационной вытяжки трубных заготовок;

- технологические решения изготовления деталей «корпус конденсатора» из стали 08 кп, «корпус» и «стакан» из алюминиевого сплава АМг6М операциями глубокой вытяжки, детали «переходник» из латуни Л63 операцией обжима, детали «корпус» из стали 10 ротационной вытяжкой с утонением на специализированном оборудовании, обеспечивающие снижение трудоемкости и

металлоемкости, сокращения сроков подготовки производства новых изделий, повышение качества и надежности эксплуатации деталей ответственного назначения.

Научная новизна работы состоит в развитии теории устойчивости тонколистовых и трубных заготовок с учетом реальных свойств материала (анизотропии механических свойств, упрочнения), условий устойчивого протекания операций пластического деформирования и других особенностей процессов обработки металлов давлением, в частности:

- разработаны условия пластической потери устойчивости тонкостенного листа в виде образования складок, условия потери устойчивости фланца кольцевой пластины с внутренним и внешним радиусами при вытяжке тонколистовой заготовки на основе энергетического метода, учитывающие изотропное упрочнение, анизотропию механических свойств исходной заготовки и другие особенности процессов пластического деформирования;

- сформулированы условия потери устойчивости конической оболочки (осесимметричной с образованием поперечных складок или несимметричной с образованием продольных складок, направленных вдоль образующей оболочки) при обжиге трубной заготовки, условия локальной потери устойчивости (шейкообразования) тонкостенной трубной заготовки при ротационной вытяжке с утонением на базе энергетического метода и критерия положительности добавочных нагрузок, учитывающие упрочнение, анизотропию механических свойств исходной заготовки и другие особенности процессов пластического деформирования;

- выявлены закономерности влияния анизотропии механических свойств исходных материалов, технологических параметров, геометрических размеров заготовки и инструмента, степени деформации, условий трения контактных поверхностей инструмента и заготовки на условия устойчивого протекания операций правки растяжением тонкой полосы и вытяжки тонколистовых заготовок, обжима и ротационной вытяжки трубных заготовок из анизотропных материалов;

- научно обоснованы режимы операций правки растяжением тонкой полосы и вытяжки листовых заготовок, обжима и ротационной вытяжки трубных заготовок из анизотропных материалов.

Научная значимость работы состоит в развитии теории пластической устойчивости тонколистовых и трубных заготовок с учетом изотропного упрочнения, анизотропии механических свойств исходной заготовки и других особенностей процессов обработки металлов давлением, которая расширяет возможности и подходы к анализу процессов пластического деформирования анизотропных заготовок и определения условий устойчивого протекания операций пластического деформирования.

Практическая ценность. Разработаны рекомендации по расчету технологических параметров операций правки растяжением тонкой полосы и вытяжки листовых заготовок, обжима и ротационной вытяжки трубных заготовок из анизотропных материалов, обеспечивающие устойчивость протекания технологических операций, снижение трудоемкости и металлоемкости, сокращение сроков подготовки производства новых изделий ответственного назначения, экспериментально подтверждены рациональные технологические режимы исследованных операций пластического деформирования листовых и трубных заготовок из анизотропных материалов.

Реализация работы. Разработаны наукоемкие, конкурентоспособные технологические решения изготовления деталей «корпус конденсатора» из ста-

ли 08 кп, «корпус» и «стакан» из алюминиевого сплава АМгбМ операциями глубокой вытяжки, детали «переходник» из латуни Л63 операцией обжима, детали «корпус» из стали 10 ротационной вытяжкой с утонением на специализированном оборудовании, удовлетворяющие техническим условиям эксплуатации листовых и трубных заготовок из анизотропных материалов, которые внедрены в опытном производстве на ОАО «Тульский научно-исследовательский технологический институт» (г. Тула), ОАО «Центральное конструкторское бюро аппаратостроения» (г. Тула), ОАО «Научно-производственное объединение «СПЛАВ» (г. Тула) и на других предприятиях со значительным экономическим эффектом. Техничко-экономическая эффективность разработанных наукоемких, конкурентоспособных технологических процессов обеспечивается путем: уменьшения трудоемкости изготовления на 30...50 %, снижения металлоемкости производства на 20...40 %, сокращения сроков подготовки производства новых изделий в 1,5...2 раза, повышения качества и надежности изготавливаемых деталей за счет исключения сварных швов, точности геометрической формы и взаимного расположения поверхностей по сравнению с существующими технологическими процессами. При этом удалось исключить из технологического цикла изготовления ряд трудоёмких химических и прессово-термических операций.

Отдельные материалы научных исследований использованы в учебном процессе на кафедре «Механика пластического формоизменения» ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»:

- при чтении лекций, проведении лабораторных и практических занятий, при подготовке бакалавров техники и технологии направления 150700 «Машиностроение» профиля «Машины и технология обработки металлов давлением» и магистров по направлениям подготовки 150700 «Машиностроение» профиля «Машины и технологии обработки металлов давлением», а также в научно-исследовательской работе студентов;

- при подготовке кандидатских и магистерских диссертаций, исследовательских курсовых и дипломных проектов, выпускных квалификационных работ бакалавров;

- по материалам диссертационной работы опубликовано учебное пособие: «Устойчивость пластинок»: учеб. пособие / С.С. Яковлев, К.С. Ремнев [и др.] Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 200 с.

Апробация работы. Результаты исследований доложены на Международной научно-технической конференции «Современные проблемы математики, механики, информатики» (Тула: ТулГУ, 2003, 2008 гг.); на II Международной научно-технической конференции «Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов давлением» (Тула: ТулГУ, 2004 г.); на Международной научно-технической конференции «Автоматизация; проблемы, идеи, решения» (АПИР-13) (Тула: ТулГУ, 2008-2013 г.г.); на Международной научно-технической конференции «Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении» (Украина, Краматорск: ДГМА, 2008 г.); на Международной научно-технической конференции «Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением» (СПб.: БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2005 г.); на Международной научно-технической конференции «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов» (СПб.: Политехн. ун-т, 2005 г.); на Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии» (СПб.: Политехн. ун-т, 2013 г.); на Международной научно-технической

конференции «Современные технологии обработки материалов давлением: моделирование, проектирование, производство» (М.: ФГБОУ ВПО «МАМИ», 2013 г.); на Международной научно-технической конференции «Достижения и проблемы развития технологий и машин обработки давлением» (Украина, Краматорск: ДГМА, 2014 г.); на Международной научно-технической конференции «Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением» (СПб.: БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2014 г.), а также на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» (2002-2014 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 56 работ, среди них: монографий – 1, учебных пособий – 1, статей в рецензируемых изданиях и сборниках, входящих в «Перечень периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук» - 47; статей в различных сборниках научно-технических трудов – 8. Общий объем – 36 печ. л., авторский вклад – 14,5 печ. л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи разделов, заключения, списка использованных источников из 240 наименований, 5 приложений и включает 246 страниц основного текста, содержит 75 рисунков и 7 таблиц. Общий объем - 279 страниц.

Автор выражает глубокую благодарность доктору технических наук, профессору Кухарю Владимиру Денисовичу за оказанную помощь при выполнении работы, критические замечания, рекомендации и предложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой научно-технической проблемы, сформулирована цель работы, положения, выносимые на защиту, научная новизна, методы исследования, практическая ценность и реализация работы, приводятся данные об апробации работы, о публикациях, структуре и объеме диссертационной работы и краткое содержание разделов диссертации.

В первом разделе рассмотрено современное состояние теории и технологии изготовления осесимметричных деталей из листовых и трубных заготовок методами обработки металлов давлением, теории устойчивости тонких пластин и оболочек, существующие критерии устойчивости пластического деформирования листовых и трубных заготовок, а также вопросы теории пластического формообразования анизотропных материалов и влияние анизотропии механических свойств на процессы обработки металлов давлением. Обоснована постановка задач исследований.

Значительный вклад в развитие теории пластичности и методов анализа процессов обработки металлов давлением изотропных и анизотропных листовых и трубных заготовок и их применения в промышленности внесли Ю.А. Алюшин, В.Ф. Баркай, А.А. Богатов, К.Н. Богоявленский, С.И. Вдовин, В.А. Голенков, В.Д. Головлев, Ф.В. Гречников, С.И. Губкин, Г.Я. Гун, Г.Д. Дель, С.А. Евсюков, Г. Закс, В.А. Жарков, А.А. Ильюшин, И.И. Казакевич, Ю.Г. Калпин, В.Г. Капорович, Л.М. Качанов, С. Кобаяши, В.Л. Колмогоров, С.О. Колпакчиоглу, В.Д. Кухарь, Н.Н. Малинин, А.Д. Матвеев, Н.И. Могильный, И.А. Норицин, А.Г. Овчинников, В.А. Огородников, Е.А. Попов, Ю.Н. Работнов, С.Ю. Радченко, И.П. Ренне, В.П. Романовский, Ф.И. Рузанов, Г. Свифт, Е.И. Семенов, В.В. Смирнов, Л.Г. Степанский, Э. Томасетт, А.Д. Томленов,

В.И. Трегубов, Е.П. Унксов, С.Н. Уэллс, А.С. Чумадин, Р. Хилл, В.Г. Шеркунов, Л.А. Шофман, Л.Г. Юдин, С.П. Яковлев, Ч. Янг и др. В трудах этих ученых разработаны и усовершенствованы методы анализа процессов пластического деформирования, даны примеры их применения к анализу процессов обработки металлов давлением.

Обзор научно-технической литературы показал, что на напряженное и деформированное состояния, силовые режимы и условия устойчивого протекания процессов пластического деформирования листовых и трубных заготовок существенное влияние оказывает анизотропия механических свойств, и её необходимо учитывать при расчетах технологических параметров процессов обработки металлов давлением.

Несмотря на большое количество работ, посвященных теоретическому анализу напряженного и деформированного состояний, силовых режимов и предельных возможностей операций правки растяжением тонкой полосы и глубокой вытяжки листовых заготовок, обжима и ротационной вытяжки трубных заготовок из изотропных и трансверсально-изотропных материалов, вопросы теории формообразования ортотропных материалов, обладающих плоскостной или цилиндрической анизотропией механических свойств, практически не разработаны.

Обзор научно-технической литературы показал, что одним из типов потери устойчивости при пластическом деформировании листовых и трубных заготовок является складкообразование. Она является следствием потери устойчивости на сжатых и сжато-растянутых участках листовой заготовки и приводит к искажению формы изделия на начальном этапе пластического деформирования. Большинство исследований этого вопроса касались малых упругих деформаций изотропных материалов. Однако потеря устойчивости при обработке металлов давлением происходит при пластических деформациях. Поэтому большой интерес представляет изучение потери устойчивости в виде складкообразования листовых и трубных заготовок из анизотропных материалов. Необходимо проводить более глубокие теоретические и экспериментальные исследования условий устойчивого протекания процессов правки растяжением, глубокой вытяжки анизотропных листовых заготовок, обжима, ротационной вытяжки с утонением трубных заготовок из анизотропных материалов, учитывающие реальные свойства материалов, локальный характер деформирования и другие особенности процессов.

Из проведенного обзора работ следует, что при теоретических исследованиях операций правки растяжением тонкой полосы и глубокой вытяжки листовых заготовок, обжима и ротационной вытяжки трубных заготовок из изотропных и трансверсально-изотропных материалов вопросы условия устойчивого протекания операций пластического деформирования листовых и трубных заготовок из анизотропных материалов без образования складок в настоящее время практически не решены. При разработке перечисленных выше технологических процессов листовой штамповки в основном используют эмпирические зависимости из различных справочных материалов, которые не учитывают многие практически важные параметры. Во многих случаях это приводит к необходимости экспериментальной отработки указанных процессов, что удлиняет сроки подготовки производства новых изделий.

Во втором разделе приведены условие пластичности анизотропного материала Мизеса-Хилла и ассоциированный закон пластического течения, представлены соотношения между деформациями и напряжениями для пластически ортотропного материала в главных осях анизотропии и главных осях напряже-

ний, предложен разработанный критерий потери устойчивости пластин из анизотропного материала на основе энергетического метода.

Рассмотрен энергетический метод исследования потери устойчивости. Сущность этого метода заключается в определении изменения полной потенциальной энергии плоской листовой заготовки, которая нагружена силами, лежащими в ее плоскости, после перехода из плоской формы равновесия в криволинейную:

$$\Delta\Pi = \Delta U_0 + U_1 + U_2, \quad (1)$$

где ΔU_0 - изменение потенциальной энергии деформации срединной плоскости листовой заготовки при образовании складок; U_1 - потенциальная энергия деформации изгиба и кручения пластины; U_2 - изменение потенциала внешних сил, приложенных к пластине.

Принимаем, что листовой металл пластически ортотропен, приобретенная анизотропия в процессе пластического формообразования мала по сравнению с начальной анизотропией, материал заготовки несжимаем, упрочнение материала изотропно, эффект Баушингера отсутствует.

В случае потери устойчивости пластины возникает искривленная форма равновесия пластины. Этой новой форме равновесия соответствуют и новые значения внутренних сил. Одновременно с силами, соответствующими деформациям пластин в своей плоскости, появляются внутренние силовые факторы (изгибающие и крутящие моменты и поперечные силы), обусловленные изгибом пластины. На рисунке 1 показана схема действия этих внутренних силовых факторов после изгиба срединной поверхности пластины. Внутренние силовые факторы представлены в предположении, что они положительные. В работе получены выражения для определения удельной работы (потенциальной энергии деформации изгиба и кручения пластины на единицу площади срединной плоскости) изгибающих и крутящих моментов внутренних сил при образовании складок анизотропного элемента, а также выражения для определения изменения потенциальной энергии деформации срединной плоскости при образовании складок анизотропного элемента, позволяющие оценить изменение полной потенциальной энергии пластины при пластической потере ее устойчивости.

Заметим, что потенциальной энергией деформации пластины поперечными силами Q_{xz} и Q_{yz} пренебрегаем в силу ее незначительности.

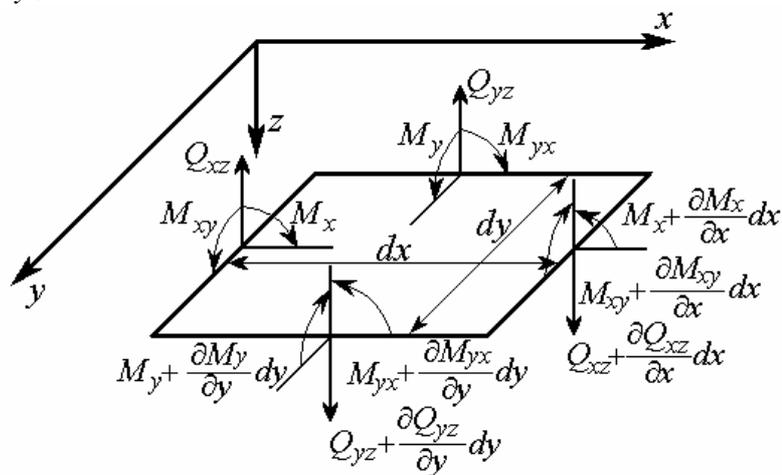


Рисунок 1 - Схемы действующих силовых факторов на элемент в срединной плоскости пластины после ее изгиба при пластической потере устойчивости

Приведем окончательное выражение для определения изменения полной потенциальной энергии пластины при образовании складок $\Delta\Pi$ в системе координат x, y главных осей анизотропии:

$$\Delta\Pi = \frac{1}{2} E_p J \int_0^b \int_0^a \left[\frac{1}{\mu g} (c_{22}\chi_x^2 - 2c_{12}\chi_x\chi_y + c_{11}\chi_y^2) + \frac{4}{\mu c_{33}} \chi_{xy}^2 - (1-n) \frac{\chi^2}{\sigma_i^2} \right] \times \\ \times dx dy + \frac{1}{2} \int_0^b \int_0^a \left[N_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + N_y \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 2T_{xy} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right] dx dy, \quad (2)$$

где $\chi_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$; $\chi_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$; $\chi_{xy} = -\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$; $\chi = \sigma_x \chi_x + \sigma_y \chi_y + 2\tau_{xy} \chi_{xy}$;

$$N_x = \int_{-t/2}^{+t/2} \sigma_x dz; N_y = \int_{-t/2}^{+t/2} \sigma_y dz; T_{xy} = \int_{-t/2}^{+t/2} \tau_{xy} dz; c_{11} = 1 + 1/R_x; c_{12} = -1;$$

$$c_{22} = 1 + 1/R_y; c_{33} = 2/R_{xy}; \mu = \frac{3}{2(1 + 1/R_x + 1/R_y)}; g = c_{11}c_{22} - c_{12}^2;$$

$$E_p = \sigma_i / \varepsilon_i; J = t^3 / 12; R_x = H/G; R_y = H/F; R_{xy} = H/N;$$

E_p - модуль пластичности анизотропного материала; J - момент инерции поперечного сечения элемента толщиной t и шириной, равной единице; σ_i и ε_i - величины интенсивностей напряжения и деформации ($\sigma_i = A\varepsilon_i^n$); R_x, R_y и R_{xy} - коэффициенты анизотропии по осям x, y и в плоскости xu соответственно; F, G, H, N - параметры анизотропии; a и b - длина и ширина пластины соответственно.

В системе координат u, v главных осей напряжений величина изменения полной потенциальной энергии пластины при образовании складок

$$\Delta\Pi = \frac{1}{2\mu} E_p J \int_0^b \int_0^a \left[\frac{1}{g} (c'_{22}\chi_u^2 - 2c'_{12}\chi_u\chi_v + c'_{11}\chi_v^2) + \frac{4}{c'_{33}} \chi_{uv}^2 - \frac{(1-n)}{K_\sigma} \chi^2 \right] \times \\ \times dx dy + \frac{1}{2} \int_0^b \int_0^a \left[N_u \left(\frac{\partial w}{\partial u} \right)^2 + N_v \left(\frac{\partial w}{\partial v} \right)^2 \right] du dv, \quad (3)$$

где $\chi_u = -\frac{\partial^2 w}{\partial u^2}$; $\chi_v = -\frac{\partial^2 w}{\partial v^2}$; $\chi = \sigma_u \chi_u + \sigma_v \chi_v$;

$$\left. \begin{aligned} c'_{11} &= c_{11} \cos^4 \alpha + (2c_{12} + c_{33}) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + c_{22} \sin^4 \alpha; \\ c'_{12} &= c_{12} + (c_{11} + c_{22} - 2c_{12} - c_{33}) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha; \\ c'_{22} &= c_{22} \cos^4 \alpha + (2c_{12} + c_{33}) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + c_{11} \sin^4 \alpha; \\ c'_{33} &= c_{33} + 4(c_{11} + c_{22} - 2c_{12} - c_{33}) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha; \\ k_\sigma &= c'_{11} + 2c'_{12} + c'_{22} m_\sigma^2; m_\sigma = \sigma_v / \sigma_u. \end{aligned} \right\}$$

Для вычисления значения $\Delta\Pi$ задается уравнение срединной поверхности пластины при образовании складок в виде одного или нескольких членов ряда:

$$w = \sum_{n=1}^{m=k} C_n f_n(x, y), \quad (4)$$

где $f_n(x, y)$ - функции, удовлетворяющие каждая в отдельности, геометрическим (граничным) условиям, налагаемым на срединную поверхность пластины устройством ее опор, например, в виде квадратичной функции параметров C_n .

Удовлетворение членов ряда также и граничным условиям силового типа, т.е. отсутствию моментов и сил по тем или иным краям пластины, упростит решение задачи. При некотором значении нагрузки наряду с плоской формой равновесия пластины возникает новая криволинейная форма равновесия. Общим признаком равновесия материальной системы является экстремальность полной потенциальной энергии Π системы.

В рассмотренном случае равновесия пластины при образовании складок полная потенциальная энергия

$$\Pi = \Pi_0 + \Delta\Pi, \quad (5)$$

где Π_0 - потенциальная энергия пластины до образования складок (независящая от параметров C_n).

Из условия экстремума энергии Π следуют уравнения

$$\frac{\partial\Pi}{\partial C_1} = 0; \quad \frac{\partial\Pi}{\partial C_2} = 0; \dots; \quad \frac{\partial\Pi}{\partial C_k} = 0, \quad (6)$$

которые являются уравнениями равновесия.

Полученная система линейных однородных уравнений (4) относительно параметров C_1, C_2, \dots, C_k имеет нулевые решения $C_1 = C_2 = \dots = C_k = 0$, которые соответствуют плоской форме равновесия пластины, и отличные от нуля решения, соответствующие равновесию искривленной пластины, при условии, если определитель Δ системы обращается в ноль и вычисляется критическое значение нагрузки, при котором становится возможным образование складок. В случае совпадения взятых членов ряда (4) с истинным уравнением срединной поверхности пластины (при весьма малых перемещениях) энергетический метод дает точное значение критической нагрузки. В противном случае энергетический метод позволяет определить критическую нагрузку, превышающую ее действительное значение. Когда уравнение срединной поверхности пластины аппроксимируется выражением, содержащим только один параметр C , уравнение $\partial\Pi/\partial C = 0$ может быть заменено непосредственным приравнением нулю изменения полной потенциальной энергии, т.е. $\Delta\Pi = 0$.

Предложенное условие потери устойчивости пластин позволяет вычислять критическое значение нагрузки (напряжений), при котором становится возможным образование складок, и используется в последующих теоретических исследованиях.

В третьем разделе изложены результаты теоретических исследований потери устойчивости листового металла при правке растяжением с малым и повышенными относительными удлинениями. Показано влияние анизотропии механических свойств на устойчивость полосы с малым и повышенными относительными удлинениями. Использован энергетический метод исследования потери устойчивости.

При правке растяжением полосу или лист 1 с двух сторон закрепляют в зажимах 2 правильно-растяжной машины и подвергают одноосному растяжению за пределом упругости силами P (рисунок 2).

Правка растяжением позволяет получать высокую степень плоскостности тонких широких полос и листов из высокопрочных сталей и специальных сплавов, правка которых другими способами не дает удовлетворительных результатов.

В процессе правки полоса может потерять устойчивость из-за образования складок (рисунок 2). Принималось, что правке растяжением подвергается длинная тонкая полоса с прямолинейными боковыми кромками. Совместим плоскость xu прямоугольной системы координат xoy с серединной плоскостью полосы. Ось x направим вдоль полосы, по линии действия растягивающих сил P , начало координат расположим в центре полосы. Образование складки при правке растяжением является следствием возникновения в полосе сжимающих напряжений σ_y , действующих поперек полосы.

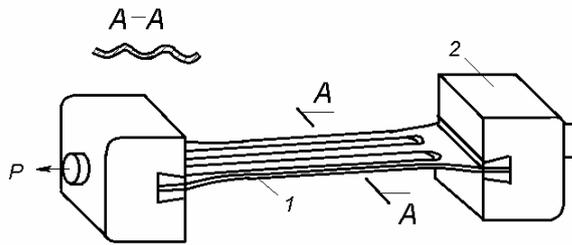
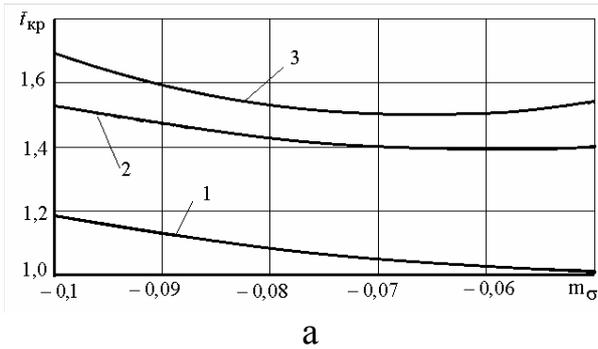


Рисунок 2 - Правка листа растяжением

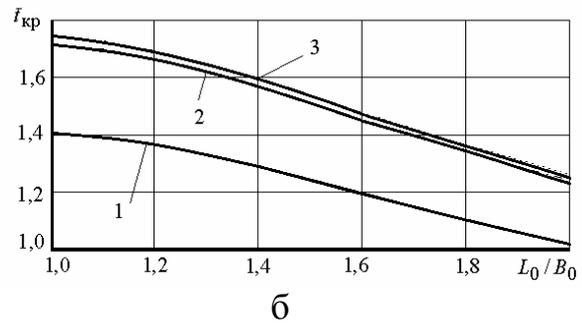
Разработаны математические модели операций правки тонкой полосы из анизотропных материалов с малыми (до 0,01) и большими (более 0,01) удлинениями, которые с использованием предложенного критерия устойчивости (разд. 2) позволили оценить условия устойчивого протекания исследуемых операций пластического деформирования без образования складок. Показано, что натяжение полосы предотвращает поворот кромок $u = 0$, $u = a$, и эти кромки можно считать защемленными. Указанным условиям удовлетворяет функция прогибов:

$$\omega = \frac{1}{2} \omega_0 \left(1 - \cos \frac{2\pi u}{\alpha} \right). \quad (7)$$

На рисунке 3 представлены графические зависимости изменения относительной критической толщины полосы $\overline{t_{кр}} = t_{кр} / t_*$ ($t_* = 1$ мм) от относительной длины полосы L_0 / B_0 , относительной величины $\overline{\Delta q_x}$ ($\overline{\Delta q_x} = \Delta q_x / \sigma_{i0}$) и отношения напряжений m_σ ($m_\sigma = \sigma_v / \sigma_u$) при следующих исходных данных: $B_0 = 300$ мм; $\alpha = 0^\circ$; $\overline{\Delta q_x} = 0,1$; q_x - продольная нагрузка, возникающая непосредственно под действием растягивающих сил P . Расчеты выполнены для ряда листовых материалов, широко используемых в промышленности, механические характеристики которых представлены в таблице 1.



($B_0 = 300$ мм; $L_0 = 600$ мм)



($m_\sigma = -0,1$)

Рисунок 3 - Зависимости изменения $\overline{t_{кр}}$ от m_σ (а) и отношения L_0/B_0 (б):

1 – сталь 08 кп; 2 – алюминиевый сплав АМгб; 3 – латунь Л63

Таблица 1 - Механические характеристики исследуемых материалов

Материал	$\sigma_{i0}, \text{МПа}$	$A, \text{МПа}$	n	R_0	R_{90}	R_{45}
Сталь 08кп	268	802,5	0,173	1,306	2,122	0,704
Алюминиевый сплав АМгб	298	461,3	0,124	0,725	0,653	0,85
Латунь Л63	216,4	665,1	0,278	0,666	0,759	0,82

Анализ графических зависимостей и результатов расчетов показывает, что при увеличении параметра m_σ от -0,1 до -0,05 значение относительной критической толщины полосы $\overline{t_{кр}}$ уменьшается на 17 % и лежит в интервале от 1,2 до 1 для стали 08 кп, от 1,55 до 1,4 - для латуни Л63 и от 1,7 до 1,55 - для алюминиевого сплава АМгб ($\Delta q_x = 0,1$).

Изменение относительной величины $\overline{\Delta q_x}$ от 0,1 до 0,2 приводит к повышению значения относительной критической толщины полосы $\overline{t_{кр}}$ на 42 %, для стали 08 кп от 1,0 до 1,42, а для латуни Л63 и алюминиевого сплава АМгб от 1,25 до 1,75. Уменьшение относительной длины полосы влечет за собой увеличение значения относительной критической толщины полосы $\overline{t_{кр}}$ на 40 %, здесь для латуни Л63 и алюминиевого сплава АМгб значения $\overline{t_{кр}}$ близки и лежат в интервале от 1,25 до 1,75, а для стали 08 кп относительная критическая толщина полосы $\overline{t_{кр}}$ возрастает от 1,0 до 1,4.

При правке с повышенными относительными удлинениями наблюдается значительное искривление боковых кромок полосы и его влияние на напряженное состояние необходимо учитывать. При правке с повышенными относительными удлинениями получены выражения для определения продольных растягивающих и поперечных сжимающих напряжений, функции прогибов, изменения ΔI полной потенциальной энергии пластины при образовании складок, величин критического напряжения и критической толщины полосы $\overline{t_{кр}}$.

Полученные соотношения позволили выявить влияние анизотропии механических свойств тонкой полосы на устойчивость при правке растяжением с повышенными удлинениями. Установлено, что значение относительной крити-

ческой толщины полосы $\overline{t_{кр}}$ увеличивается с ростом коэффициента анизотропии R_x от 0,2 до 3 ($R_{45} = 1$; $\alpha = 0^\circ$) при $R_y = 0,2$ на 50 % ($\delta_p = 0,02$), на 30 % ($\delta_p = 0,05$), на 40 % ($\delta_p = 0,1$). Показано, что с увеличением степени удлинения от 0,02 до 0,1 значения $\overline{t_{кр}}$ возрастают в 4...5 раз. При $R_y = 1,6$ и $R_y = 3$ относительная критическая толщина полосы $\overline{t_{кр}}$ интенсивно увеличивается, когда R_x лежит в интервале от 0,2 до 1, а затем уменьшается.

Четвертый раздел посвящен вопросам устойчивости кольцевой пластинки из анизотропных материалов при пластической деформации. На основе энергетического метода исследования потери устойчивости разработано условие потери устойчивости (складкообразования) тонколистовой заготовки при вытяжке. Выявлены закономерности влияния технологических параметров, геометрических размеров заготовки и рабочего инструмента и анизотропии механических свойств на условия устойчивого протекания операций вытяжки тонколистовых заготовок без образования складок.

Установленные зависимости в разделе 2, связанные с потерей устойчивости в виде складок для прямоугольной пластины, могут быть преобразованы в соответствующие зависимости для круглой листовой заготовки путем перехода к цилиндрической системе координат.

Сжато-растянутые участки листовой заготовки в процессе ее пластического формообразования могут потерять устойчивость вследствие образования складок. Сжато-растянутые участки заготовки при вытяжке деталей сложной формы располагаются вдоль криволинейных участков рабочего контура матрицы: во фланце 2 (рисунок 4) и на участке 4, не соприкасающемся со штампом, который находится между кромками матрицы 1 и пуансоном 3.

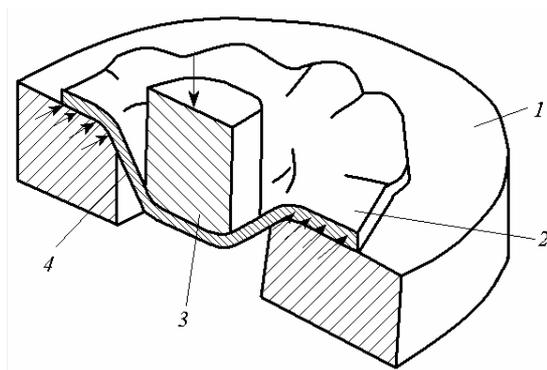


Рисунок 4 - Схема образования складок при вытяжке

Возникновение складкообразования влечет за собой нарушение нормального протекания процесса формообразования, приводит к образованию складок. Результатом является появление брака изделия.

Рассмотрена устойчивость криволинейного плоского участка фланца при вытяжке без перетяжных ребер. На этом участке фланца возникают окружные сжимающие σ_θ и радиальные растягивающие σ_r напряжения. Образование складок во фланце возможно на определенной стадии процесса вытяжки под влиянием окружных напряжений. Принимается, что листовой материал пластически ортотропен, приобретенная анизотропия в процессе пластического формообразования мала по сравнению с начальной, материал заготовки несжимаем, упрочнение материала изотропно, эффект Баушингера отсутствует. Напряженное состояние принимаем плоским.

Изменение полной потенциальной энергии плоской листовой заготовки (пластины), нагруженной силами, лежащими в ее плоскости, после перехода из плоской формы равновесия в криволинейную имеет вид (1). Потенциальной

энергией деформации заготовки поперечными силами пренебрегаем по ее малости.

Общим признаком равновесия материальной системы является экстремальность полной потенциальной энергии Π системы, поэтому определение экстремума выражения (5) позволит рассчитать нагрузку, при которой, наряду с плоской формой равновесия пластины, возникает новая криволинейная форма равновесия. Полная потенциальная энергия в рассмотренном случае равновесия фланца заготовки вычисляется по выражению (5).

При потере устойчивости пластины возникает новая искривленная форма равновесия. Новой форме равновесия соответствуют и новые значения внутренних сил. Наряду с силами N и T , соответствующими деформациям пластины, возникают другие внутренние силовые факторы (изгибающие и крутящие моменты и поперечные силы), обусловленные изгибом фланца заготовки (рисунки 5 и 6).

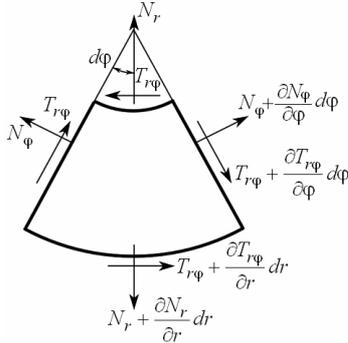


Рисунок 5 – Нормальные и сдвиговые силы в элементе срединной плоскости

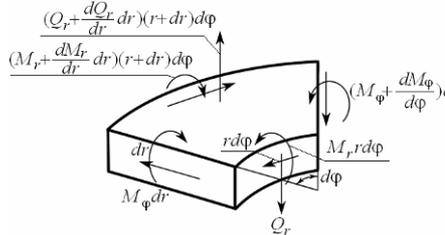


Рисунок 6 - Моменты и поперечные силы

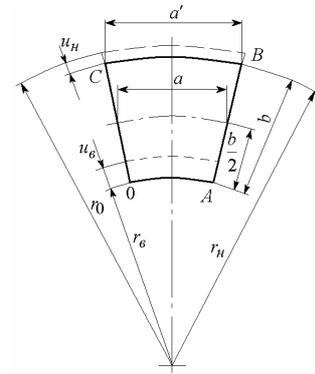


Рисунок 7 – Перемещения в элементе фланца

Используя общепринятые граничные условия элемента, выражение для определения изменения полной потенциальной энергии кольцевой пластины с внутренним $r = r_\epsilon$ и внешним $r = r_n$ радиусами при асимметричной потере устойчивости запишем в следующем виде:

$$\Delta\Pi = \frac{1}{2} E_p J \iint \left[\frac{1}{\beta g} (c_{22}\chi_r^2 - 2c_{12}\chi_r\chi_\phi + c_{11}\chi_\phi^2) + \frac{4}{\beta c_{33}} \chi_{r\phi}^2 - (1-n) \frac{\chi^2}{\sigma_i^2} \right] r dr d\phi + \frac{1}{2} \iint \left[N_r \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 + N_\phi \left(\frac{\partial w}{r \partial \phi} \right)^2 + 2T_{r\phi} \frac{\partial w}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \phi} \right] r dr d\phi, \quad (8)$$

где $J = \frac{1}{3} s \left(\frac{bs'}{r_n^0 - m_d} \right)^2$; b – ширина фланца; r_n^0 – относительный наружный радиус фланца; s' – относительная толщина листовой заготовки; $b = r_n - r_\epsilon$; $r_n^0 = r_n / r_0$; $s' = s / (2r_0) = s(r_n^0 - m_1) / (2b)$; $m_d = r_\epsilon / r_0$ – коэффициент вытяжки. Остальные условные обозначения приведены на рисунке 7.

Значения окружных σ_ϕ и радиальных σ_r напряжений определяются путем решения задачи о вытяжке до потери устойчивости по методике, разработанной д-р техн. наук, проф. Яковлевым С.П.

Для определения этих величин необходимо задать функцию прогибов, удовлетворяющую граничным условиям, которую аппроксимируем выражением

$$\omega = \omega_0 \left[1 - \cos \frac{\pi}{2b} (r - r_0) \right] \sin \frac{m\varphi}{2},$$

где m - количество волн.

Путем интегрирования выражения (8), которое определяет изменение полной потенциальной энергии элемента кольцевой заготовки с последующей минимизацией результата, найдем искомые параметры – критическую величину напряжения σ_ϕ , критические геометрические соотношения размеров элемента заготовки и относительную толщину заготовки.

В работе определены условия устойчивого протекания процесса вытяжки осесимметричных деталей из стали 08 кп, алюминиевого сплава АМгбМ и латуни Л63, механические свойства которых приведены в таблице 1. Расчеты выполнены при следующих геометрических размерах заготовки: $r_0 = 100$ мм, $s_0 = 1$ мм. На рисунке 8 приведены графические зависимости изменения $s_{кр}/d_0$ от m_d с учетом упрочнения. Штриховыми линиями показаны результаты, согласно рекомендациям В.Л. Шофмана ($D - d_1 \leq 20 s_0$).

Анализ графических зависимостей и результатов расчетов показывает, что с увеличением коэффициента вытяжки m_d с 0,5 до 0,8 критическое значение $s_{кр}/d_0$, соответствующее устойчивому протеканию процесса вытяжки, уменьшается на 50 %. Показано, что с увеличением перемещения края u_n критическое значение $s_{кр}/d_0$ возрастает на 10 %. Сопоставление результатов выполненных исследований и экспериментальных данных В.Л. Шофмана показывает, что учет реальных механических свойств материала заготовки накладывает более жесткие рамки на режимы деформирования.

Выявлено влияние коэффициентов цилиндрической анизотропии механических свойств на устойчивость листовой заготовки при вытяжке цилиндрических деталей. Выявлено влияние коэффициентов цилиндрической анизотропии механических свойств на устойчивость листовой заготовки при вытяжке цилиндрических деталей. Установлено, что коэффициенты плоскостной анизотропии механических свойств оказывают существенное влияние на критическую величину $s_{кр}/d_0$. У материалов с $R_0 < 1$ и $R_{45} > 1$ при $m_d = 0,5$ величина $s_{кр}/d_0$ больше на 15 %, а у материалов с $R_0 > 1$ и $R_{45} < 1$ при $m_d = 0,5$ величина $s_{кр}/d_0$ меньше на 25 % по сравнению с изотропным материалом ($R_0 = 1$, $R_{45} = 1$).

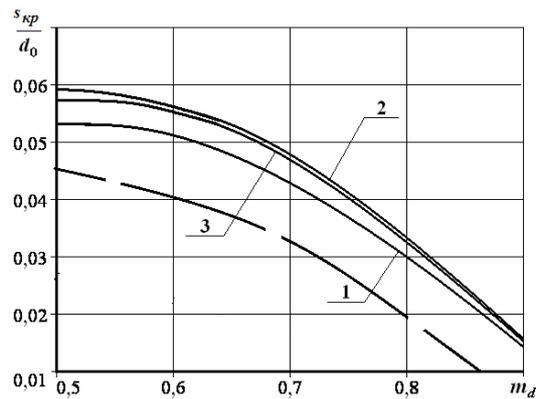


Рисунок 8 - Зависимости изменения $s_{кр}/d_0$ от m_d ($u_n = 1,5$ мм):

1 – сталь 08 кп; 2 – алюминиевый сплав АМгб; 3 – латунь Л63

Выполнены экспериментальные исследования операции вытяжки плоских круглых заготовок из стали 08 кп ($s_0=1,2$ мм) и латуни Л63 ($s_0=1,42$ мм) с целью определения условий устойчивого протекания операции (без образования складок). Экспериментально выявлено, что при вытяжке плоских круглых заготовок из стали 08 кп относительная критическая толщина $\bar{s}_{кр}^{np} = 0,025$ при $m_d = 0,731$ ($d_0 = 48$ мм); из латуни Л63 - $\bar{s}_{кр}^{np} = 0,031$ при $m_d = 0,740$ ($d_0 = 47$ мм).

Сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований по критическим значениям относительной толщины заготовки при вытяжке осесимметричных деталей из стали 08 кп и латуни Л63 указывает на удовлетворительное их согласование. Максимальная величина расхождения теоретических и экспериментальных данных не превышает 10 %.

Пятый раздел посвящен вопросам устойчивости конической оболочки из анизотропных материалов при пластической деформации. На основе энергетического метода исследования потери устойчивости разработаны условия потери устойчивости (складкообразования) тонкостенной трубной заготовки при обжиге. Выявлены закономерности влияния технологических параметров, геометрических размеров заготовки и рабочего инструмента и анизотропии механических свойств на условия устойчивого протекания операции обжима трубных заготовок без образования складок. Дано сравнение теоретических и экспериментальных результатов.

Круговые конические оболочки формируются путем обжима трубных заготовок в конической матрице (рисунке 9). Заготовка под действием продольной внешней силы перемещается относительно матрицы и по мере перемещения в ее рабочую полость принимает форму конической оболочки. В представленной схеме реализуется плоское напряженное состояние, при этом меридиональные и окружные напряжения являются сжимающими.

При достижении продольных наружных напряжений определенной критической величины на детали появляются поперечные или продольные волны. Потеря устойчивости какой-то определенной формы появляется в основном при определенных значениях ряда величин: от относительной толщины стенки s_0/D_0 заготовки, ее материала, условий закрепления заготовки в штампе и формы рабочей полости матрицы для обжима. Предположено, что материал трубной заготовки анизотропный и обладает цилиндрической анизотропией механических свойств. Использован энергетический метод для исследования потери устойчивости конической оболочки: работа внутренних сил изгиба и кручения оболочки A_1 приравнивается к работе внешних сил на контуре элемента A_2 в момент потери устойчивости оболочки: $A_1 = A_2$.

Уравнение критического состояния элемента конической оболочки при образовании складок имеет вид:

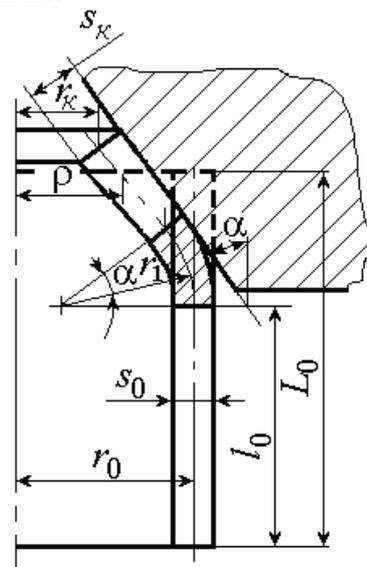


Рисунок 9 - Схема обжима трубной заготовки в конической матрице

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} E_p J \iint \left[\frac{1}{\beta g} \left(c_{22} \chi_\rho^2 - 2c_{12} \chi_\rho \chi_\theta + c_{11} \chi_\theta^2 \right) + \frac{4}{\beta c_{33}} \chi_{\rho\theta}^2 - (1-n) \frac{\chi^2}{\sigma_i^2} \right] \times \\ & \quad \times \cos \alpha \rho d\rho d\theta + \\ & + \frac{s_0}{2} \iint \left[\sigma_\rho \left(\frac{\partial w}{\partial \rho} \right)^2 + \sigma_\theta \left(\frac{1}{\rho \cos \alpha} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)^2 + 2\tau_{\rho\theta} \frac{\partial w}{\partial \rho} \frac{1}{\rho \cos \alpha} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right] \times \\ & \quad \times \cos \alpha \rho d\rho d\theta = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

где $J = s^3/12$ - момент инерции площади поперечного сечения шириной, равной единице; χ_ρ и χ_θ - изменения кривизны срединной поверхности в меридиональном и широтном направлениях; $\chi_{\rho\theta}$ - изменение кривизны кручения срединной поверхности.

В отличие от известных условий потери устойчивости конической оболочки при обжиге принято, что материал обладает цилиндрической анизотропией механических свойств, а также не используется предположение об осреднении величин интенсивности деформации по конической поверхности заготовки.

В зависимости от ожидаемой формы потери устойчивости (осесимметричной с образованием поперечных складок или несимметричной с образованием продольных складок, направленных вдоль образующей оболочки) для определения критических режимов деформирования необходимо задавать уравнение формы прогиба в виде

$$w = f_1(\rho) \text{ или } w = f_2(\rho) f_3(\theta). \quad (12)$$

Производится минимизация уравнения по входящим геометрическим параметрам, обеспечивающим $\sigma_\rho < \sigma_{\rho k\rho}$ и $\sigma_\theta < \sigma_{\theta k\rho}$.

На основе математической модели операции обжига тонкостенных трубных заготовок, обладающих цилиндрической анизотропией механических свойств, конической матрицей с углом конусности α и коэффициентом обжига $K_{об} = r_0/r_k$ (см. рисунок 9), разработанной на кафедре «Механика пластического формоизменения», выявлены закономерности влияния анизотропии механических свойств исходных материалов, технологических параметров, геометрических размеров заготовки и инструмента, коэффициента обжига, условий трения контактных поверхностей инструмента и заготовки на условия устойчивого протекания операции обжига трубных заготовок из анизотропных материалов. Предполагалось, что процесс обжига трубной заготовки протекает в условиях плоского напряженного состояния, на контактной границе реализуется закон трения Кулона. Материал принимается несжимаемым, изотропно упрочняющимся, обладающим цилиндрической анизотропией механических свойств, для которого справедливо условие текучести Мизеса-Хилла и ассоциированный закон пластического течения. В основу анализа положен метод расчета напряженного состояния и силовых режимов, основанный на совместном решении приближенных дифференциальных уравнений равновесия и условия текучести с учетом сопряжений на границах участков, а также изменения направления течения материала.

Графические зависимости изменения величины $K_{об}^{np}$ от угла конусности матрицы α при обжиге трубной заготовки ($r_0 = 50$ мм, $s_0 = 1$ мм; $\mu = 0,05$) из стали 08кп и алюминиевого сплава АМгб приведены на рисунке 10. Приняты обозначения: кривая 1 - материал сталь 08 кп; кривая 2 - материал АМгб (сплошная линия). Функция прогиба задавалась в следующем виде:

$$w = w_0 \left(1 - \cos \frac{2\pi\rho}{\rho_0} \right) \left(1 - \cos \frac{2\pi\rho}{\rho_k} \right) \cos(m\theta),$$

где m - число продольных волн.

На представленном рисунке штриховыми линиями приведены результаты расчетов согласно рекомендациям других авторов.

Анализ графических зависимостей показывает, что с увеличением угла конусности матрицы в диапазоне $\alpha = 10...45^\circ$ предельный коэффициент обжима $K_{об}^{np}$ уменьшается на 10...15 %. Установлено, что с повышением величины D_0/s_0 значения предельного коэффициента обжима $K_{об}^{np}$ резко уменьшаются.

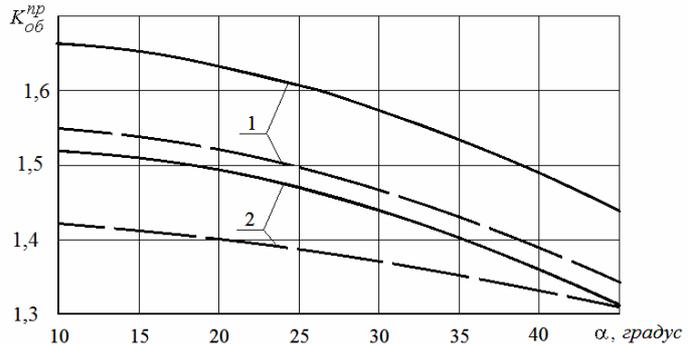


Рисунок 10 - Зависимости изменения $K_{об}^{np}$ от α

При увеличении D_0/s_0 с 25 до 250 наблюдается уменьшение предельного коэффициента обжима $K_{об}^{np}$ на 30 % при прочих равных условиях деформирования. Показано, что с ростом коэффициента трения μ предельный коэффициент обжима $K_{об}^{np}$ незначительно уменьшается (до 5...7 %). Установлено, что с увеличением числа продольных волн m от 1 до 9, значение предельного коэффициента обжима $K_{об}^{np}$ для трубной заготовки из стали 08 кп уменьшается на 63 %. Выявлено, что результаты теоретических исследований, выполненных другими авторами, дают заниженную величину предельного коэффициента обжима $K_{об}^{np}$ на 20...30 %.

Выявлено влияние анизотропии механических свойств на величину предельного коэффициента обжима $K_{об}^{np}$. Показано, что с ростом коэффициента нормальной анизотропии R от 0,2 до 2,0 происходит повышение предельного коэффициента обжима $K_{об}^{np}$ на 10...15 %. С увеличением коэффициента анизотропии R_ρ и уменьшением R_θ предельный коэффициент обжима $K_{об}^{np}$ возрастает на 15...25 %. Показано, что предельный коэффициент обжима $K_{об}^{np}$ снижается с увеличением коэффициента анизотропии R_θ и уменьшением коэффициента анизотропии R_ρ на 15...20 %.

Сравнение теоретических расчетов и экспериментальных данных по условиям устойчивого протекания операции обжима трубных заготовок указывает на удовлетворительное их согласование (расхождение не превышает 10 %).

В шестом разделе на основе критерия положительности добавочных нагрузок разработано условие локальной потери устойчивости (шейкообразования) тонкостенных трубных заготовок из анизотропного материала при ротационной вытяжке с утонением коническими роликами по прямому способу. Выявлены закономерности влияния технологических параметров, анизотропии механических свойств, геометрии ролика на условия устойчивого протекания процесса ротационной вытяжки с утонением стенки тонкостенных трубных заготовок.

В работе предложено условие локальной потери устойчивости (шейкообразования) тонкостенной трубной заготовки из анизотропного материала при ротационной вытяжке коническими роликами по прямому способу на основе критерия положительности добавочных нагрузок: $dP = 0$; $dM = 0$. В отличие от известных условий локальной потери устойчивости тонкостенных трубных заготовок из анизотропного материала при ротационной вытяжке принято, что процесс реализуется в условиях квазиплоской деформации, не используется предположение об осреднении приращений деформаций сдвига $d\gamma = d\epsilon_{z\theta}$ и осевой деформации $d\epsilon_z$ по очагу пластической деформации.

При разработке условия локальной потери устойчивости тонкостенных трубных заготовок, обладающих цилиндрической анизотропией механических свойств, использовалась предложенная на кафедре «Механика пластического формоизменения» математическая модель этой операции. Рассмотрена операция ротационной вытяжки тонкостенной трубной заготовки из анизотропно упрочняющегося материала с цилиндрической анизотропией механических свойств коническими роликами с углом конусности α_p , степенью деформации $\epsilon = 1 - t_k / t_0$ и подачи ролика S по прямому способу (рисунок 11).

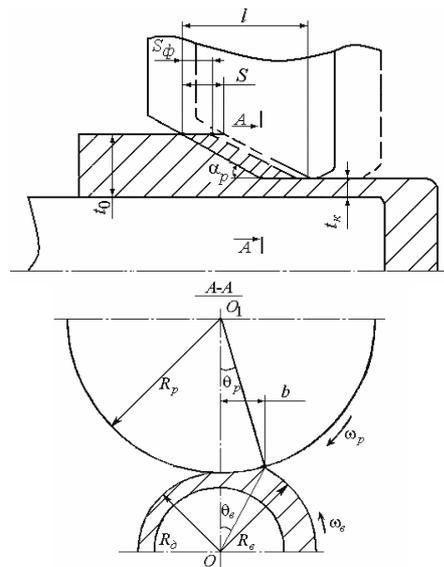


Рисунок 11 - Схема очага деформации при ротационной вытяжке

Предполагается, что эта часть заготовки будет находиться в пластическом состоянии и подвержена действию крутящего момента M и растягивающей силы P . Материал трубной заготовки принимается жесткопластическим, несжимаемым, обладающим цилиндрической анизотропией механических свойств, подчиняющимся условию пластичности Мизеса-Хилла и ассоциированному закону пластического течения. В основу анализа положен метод расчета напряженного состояния и силовых режимов, основанный на совместном решении уравнений равновесия в цилиндрической системе координат и уравнений пластического течения анизотропного материала, устанавливающих связи между напряжениями и скоростями деформаций с учетом изменения направления течения материала.

Приведем окончательное выражение для определения величины интенсивности напряжений σ_i , при которой $dP = 0$:

$$\sigma_i = A_z \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} \sqrt{\frac{3}{2(1 + R_\theta / R_z + R_\theta)}} \sqrt{R_\theta / R_z + R_\theta + 2R_{z\theta} B^2 c_1^2}, \quad (13)$$

где R_θ , R_z , $R_{z\theta}$ - коэффициенты анизотропии; $c_1 = d\gamma / d\varepsilon_z$; $d\gamma = d\varepsilon_{z\theta}$;

$$B = \frac{1}{2} \frac{R_\theta(1 + R_\theta / R_z + R_\theta)(1 + R_\theta + R_z)}{R_{z\theta}(R_z + R_\theta + R_\theta R_z)[1 + R_\theta / (1 + R_z)]}; \quad A_z = \frac{2}{3} \frac{R_z + R_\theta(1 + R_z)}{R_\theta(1 + R_\theta + R_z)} [1 + R_\theta / (1 + R_z)].$$

Значение интенсивности напряжений σ_i , при котором приращения крутящего момента $dM = 0$, определим по выражению

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{3}{2(1 + R_\theta / R_z + R_\theta)}} A_z \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} \left[R_\theta / R_z + R_\theta + 2R_{z\theta} B_1^2 c_1^2 \right]^{1/2}, \quad (14)$$

где $B_1 = (1 + R_\theta / R_z + R_\theta) / (3A_z)$.

Предложенное условие локальной потери устойчивости тонкостенной трубной заготовки из анизотропного материала использовано для оценки предельных возможностей операции ротационной вытяжки анизотропных трубных заготовок коническими роликами по прямому способу.

Условия устойчивого протекания операции ротационной вытяжки трубных заготовок ε_{np} исследовались в зависимости от угла конусности ролика α_p , рабочей подачи S и геометрических размеров трубных заготовок из сталей 12ХЗГНМФБА и 10. Расчеты выполнены для трубных заготовок из стали 12ХЗГНМФБА и стали 10 с наружным радиусом трубной заготовки $R_g = 64,15$ мм, толщиной стенки трубы $t_0 = 6,05$ мм, диаметром ролика $D_p = 280$ мм, частотой вращения шпинделя $n = 75$ мин⁻¹, коэффициентом трения на оправке $\mu_o = 0,15$. Графические зависимости изменения предельной степени деформации ε_{np} , вычисленной по критериям локальной потери устойчивости (13) или (14) тонкостенной трубной заготовки при ротационной вытяжке трубных заготовок из сталей 12ХЗГНМФБА и 10 от угла конусности ролика α_p и рабочей подачи S приведены на рисунке 12. Здесь введены обозначения: кривая 1 – величина ε_{np} - по данным М.А. Гредитора; кривая 2 – величина предельной степени деформации ε_{np} , вычисленной по критериям локальной потери устойчивости (13) или (14), соответствующая её минимальному значению; кривая 3 - величина ε_{np} - по результатам расчетов согласно рекомендациям О.В. Пилипенко.

Анализ графических зависимостей показывает, что рост предельной степени деформации ε_{np} на 52 % вызван увеличением угла конусности ролика α_p с 10 до 30°. Увеличение рабочей подачи S с 0,5 до 1,5 мм/об приводит к уменьшению предельной степени деформации ε_{np} , вычисленной по критериям шейкообразования тонкостенной трубной заготовки, на 30...45 %.

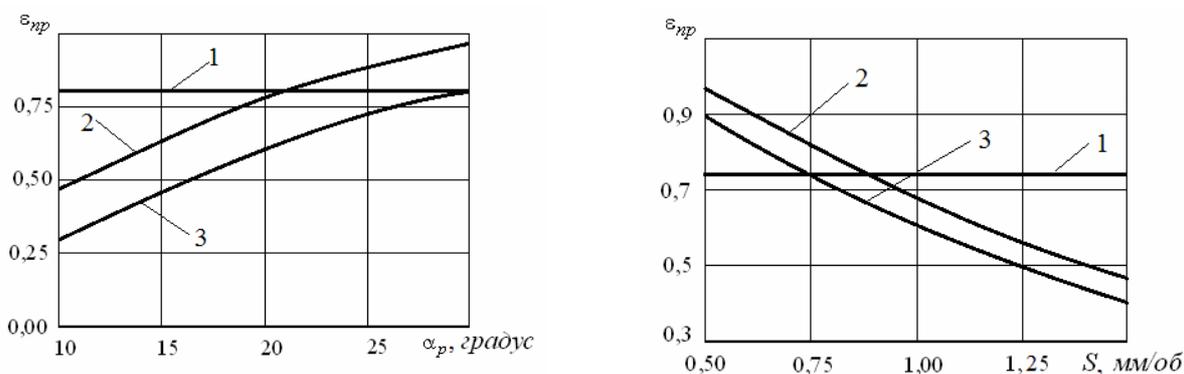


Рисунок 12 - Зависимости изменения $\epsilon_{нр}$ от α_p (а) и S (б):
 а - для стали 12ХЗГНМФБА ($S = 1$ мм/об); б - для стали 10 ($\alpha_p = 10^\circ$)

Показано, что эмпирические зависимости М.А. Гредитора не учитывают технологических параметров реального процесса, а дают лишь осредненные величины предельной степени деформации $\epsilon_{нр}$ при ротационной вытяжке.

Выявлено влияние анизотропии механических свойств материала заготовки на предельные возможности процесса ротационной вытяжки с утонением стенки по критериям локальной потери устойчивости тонкостенной трубной заготовки (13) и (14). Установлено, что с уменьшением характеристики анизотропии c и ростом коэффициента нормальной анизотропии R предельная степень деформации $\epsilon_{нр}$ увеличивается (в 2...3 раза).

В седьмом разделе приведены разработанные рекомендации по расчету научно обоснованных технологических параметров операций глубокой вытяжки листовых заготовок, обжима и ротационной вытяжки трубных заготовок из анизотропных материалов, а также технологические процессы пластического деформирования анизотропных материалов, обеспечивающие снижение трудоемкости и металлоемкости, сокращение сроков подготовки производства новых изделий, условия устойчивого протекания этих операций и повышение их качества, а также примеры их использования на предприятиях Российской Федерации.

На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработаны технологические рекомендации и созданы пакеты прикладных программ для ЭВМ по расчету научно обоснованных технологических параметров операций глубокой вытяжки листовых заготовок, обжима и ротационной вытяжки трубных заготовок из анизотропных материалов.

Разработаны прогрессивные наукоемкие технологические решения изготовления деталей «корпус конденсатора» из стали 08кп толщиной 0,5 мм, «корпус» и «стакан» из алюминиевого сплава АМг6М толщиной 2 мм операциями глубокой вытяжки. Новый технологический процесс принят к внедрению в опытных производствах на ОАО «ЦКБА» (г. Тула) и ОАО «ТНИТИ». Внедрение технологических процессов в промышленность позволит значительно сократить технологический цикл на 2 формоизменяющие и 4 промежуточные термохимические операции, снизить энергоемкость на 25 % и трудоемкость изготовления данной детали на 35 %, сократить сроки подготовки производства

новых изделий в 1,5 раза и повысить коэффициент использования металла на 20 %.

Предложены технологические решения изготовления осесимметричной детали «переходник» из латуни Л63 из трубной заготовки толщиной 08 мм. Технологический процесс принят к внедрению в опытном производстве на ОАО «ТНИТИ» (г. Тула). Техничко-экономическая эффективность описанного процесса связана с сокращением сроков подготовки производства новых изделий в 1,5...2 раза; трудоемкости изготовления деталей на 45 % и металлоемкости производства до 37 %.

Разработаны наукоемкие технологические решения изготовления тонкостенных осесимметричных деталей и сложнопрофильных оболочек с переменной толщиной стенки и наличием кольцевых центрирующих утолщений из стали 10 толщиной 2 мм с высокими эксплуатационными свойствами, которые внедрены в производство на ОАО «НПО «СПЛАВ» (г. Тула) со значительным экономическим эффектом, полученным за счет снижения трудоемкости изготовления и обеспечения качества. Технологический процесс позволил уменьшить трудоемкость изготовления детали «корпус» на 45 %, снизить металлоемкость производства до 40 %; сократить сроки подготовки производства новых изделий до двух раз; повысить качество и надежность изготавливаемых деталей путем исключения сварных швов, точности геометрической формы и взаимного расположения поверхностей. При этом удалось исключить из технологического цикла изготовления ряд трудоёмких химических и прессово-термических операций.

Образцы деталей ответственного назначения, изготовленные операциями глубокой вытяжки, обжима и ротационной вытяжки, представлены на рисунке 13: а - деталь «корпус конденсатора» из стали 08кп; б – деталь «стакан» из алюминиевого сплава АМгбМ; в – деталь «корпус» из алюминиевого сплава АМгбМ; г - деталь «переходник» из латуни Л63; д - деталь «корпус» из стали 10.



а



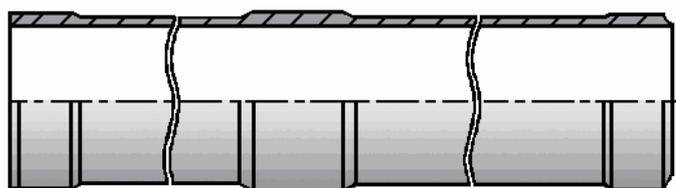
б



в



г



д

Рисунок 13 – Образцы деталей ответственного назначения, изготовленные операциями глубокой вытяжки, обжима и ротационной вытяжки

Отдельные материалы научных исследований использованы в учебном процессе на кафедре «Механика пластического формоизменения» ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации представлено решение **научной проблемы**, имеющей важное хозяйственное значение и состоящей в развитии теории пластической устойчивости тонколистовых и трубных заготовок с учетом анизотропии механических свойств, упрочнения и других особенностей процессов деформирования. Указанная проблема имеет важное хозяйственное значение, поскольку на ее основе разработаны научно обоснованные технологические процессы пластического деформирования (правки растяжением тонкой полосы и вытяжки листовых заготовок, обжима и ротационной вытяжки трубных заготовок) деталей ответственного назначения, обеспечивающие повышение эффективности их производства, условия устойчивого протекания операций обработки металлов давлением, уменьшение трудоемкости и металлоемкости, сокращение сроков подготовки производства новых изделий.

В процессе теоретического и экспериментального исследований получены следующие **основные результаты и сделаны выводы**:

1. Разработано условие потери устойчивости в виде образования складок тонкостенного листа из материала, обладающего плоскостной анизотропией механических свойств, на основе энергетического метода путем определения изменения полной потенциальной энергии плоской листовой заготовки, нагруженной силами, лежащими в ее плоскости, после перехода из плоской формы равновесия в криволинейную, которые дают возможность при разработке технологических процессов правки растяжением тонкой полосы определить предельные возможности формоизменения.

2. На основе созданных математических моделей операций правки растяжением тонкой полосы из анизотропных материалов с малыми и большими относительными удлинениями и предложенного условия потери устойчивости оценены технологические режимы стабильного протекания исследуемых операций пластического деформирования без образования складок. Установлено, что при правке с большими относительными удлинениями изменение отношения длины полосы к ее ширине от 3 до 6 приводит к уменьшению значения критической толщины полосы на 60 %. Изменение относительного удлинения от 0,02 до 0,05 значение критической толщины полосы увеличивается в 2,3 раза, а при увеличении до 0,1 - в 4 раза при фиксированном значении отношения длины полосы к ее ширине. Определены рациональные величины коэффициентов анизотропии исходного материала, при которых значения относительной критической толщины анизотропной полосы при правке растяжением с малыми и большими удлинениями принимают максимальное значение.

3. Разработано научно обоснованное условие потери устойчивости фланца кольцевой пластины с внутренним и внешним радиусами из материала, обладающего плоскостной анизотропией механических свойств, при вытяжке тонколистовой заготовки, предложенные на базе энергетического метода, позволяющие определить условия устойчивого протекания операции вытяжки.

4. Сформулированы условия потери устойчивости конической оболочки (осесимметричной с образованием поперечных складок или несимметричной с

образованием продольных волн, направленных вдоль образующей оболочки) в очаге деформации при обжиге трубной заготовки из анизотропных материалов, созданные на основе энергетического метода для определения критических режимов деформирования.

5. Разработаны условия локальной потери устойчивости (шейкообразования) тонкостенных трубных заготовок из анизотропных материалов при ротационной вытяжке с утонением коническими роликами на основе критерия положительности добавочных нагрузок с учетом локального очага деформации в условиях квазиплоской деформации, а также реальных величин приращений деформаций сдвига и осевой деформации в локальном очаге.

6. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования операций правки растяжением тонкой полосы и вытяжки листовых заготовок, обжига и ротационной вытяжки трубных заготовок из анизотропных материалов, в результате которых установлено влияние анизотропии механических свойств исходных материалов, технологических параметров, геометрических размеров заготовки и инструмента, степени деформации, условий трения контактных поверхностей инструмента и заготовки на условия устойчивого протекания этих процессов. Выявлено, что при правке с повышенными относительными удлинениями изменение отношения длины полосы к ее ширине от 3 до 6 приводит к уменьшению значения критической толщины полосы на 60 %, а при увеличении показателя упрочнения n от 0,1 до 0,5 к уменьшению относительной критической толщины полосы на 20 %. При изменении относительного удлинения от 0,02 до 0,05 значение критической толщины полосы увеличивается в 2,3 раза, а при увеличении до 0,1 - в 4 раза при фиксированном значении отношения длины полосы к ее ширине. Увеличение коэффициента вытяжки с 0,5 до 0,8 приводит к уменьшению на 50 % критического значения относительной толщины заготовки, соответствующего устойчивому протеканию операции вытяжки. Сопоставление результатов выполненных исследований и экспериментальных данных В.Л. Шофмана показывает, что учет реальных механических свойств материала заготовки накладывает более жесткие рамки на режимы деформирования.

7. Показано, что большие значения предельного коэффициента обжима достигаются за счет меньших значений показателя деформационного упрочнения n . Установлено, что с увеличением числа продольных волн от 1 до 9 значение предельного коэффициента обжима для трубной заготовки из стали 08кп уменьшается на 63 %. Выявлено, что результаты теоретических исследований, выполненных другими авторами, дают заниженную величину предельного коэффициента обжима $K_{об}^{np}$ на 20...30 %. При ротационной вытяжке тонкостенных трубных заготовок из анизотропных материалов рост предельной степени деформации на 52 % вызван увеличением угла конусности ролика с 10° до 30° . Увеличение рабочей подачи с 0,5 до 1,5 мм/об приводит к уменьшению предельной степени деформации, вычисленной по критериям локальной потери устойчивости (шейкообразования) тонкостенной трубной заготовки, на 30...45 %. Показано, что эмпирические зависимости М.А. Гредитора не учитывают технологических параметров реального процесса, а дают лишь осредненные величины предельной степени деформации ϵ_{np} при ротационной вытяжке.

8. Оценено влияние анизотропии механических свойств на условия устойчивого протекания операций правки растяжением тонкой полосы и вытяжки листовых заготовок, обжима и ротационной вытяжки трубных заготовок из анизотропных материалов. Выявлено, что неучет анизотропии механических свойств заготовки приводит к погрешности в оценке условий устойчивого протекания при анализе исследованных операций на 30...50 %.

9. Выполненные экспериментальные исследования показали удовлетворительную сходимость расчётных и экспериментальных значений технологических параметров, удовлетворяющих условиям устойчивого протекания исследованных операций и их силовых режимов, не превышающую 10...15 %.

10. Разработаны научно обоснованные рекомендации по расчету технологических параметров операций глубокой вытяжки листовых заготовок, обжима и ротационной вытяжки трубных заготовок из анизотропных материалов. Предложены технологические решения изготовления деталей «корпус конденсатора» из стали 08 кп, «корпус» и «стакан» из алюминиевого сплава АМгбМ операциями глубокой вытяжки, детали «переходник» из латуни Л63 операциями обжима, детали «корпус» (сложнопрофильная осесимметричная деталь с переменной толщиной стенки и наличием кольцевых центрирующих утолщений) из стали 10 ротационной вытяжкой с утонением на специализированном оборудовании, удовлетворяющих техническим условиям эксплуатации из листовых и трубных заготовок из анизотропных материалов, которые внедрены в опытном производстве на ОАО «ТНИТИ», ОАО «ЦКБА» и ОАО «НПО «СПЛАВ» и других предприятиях со значительным экономическим эффектом. Технологические процессы обеспечивают: уменьшение трудоемкости изготовления на 30...50 %, снижение металлоемкости производства на 30...40 %, сокращение сроков подготовки производства новых изделий в 1,5...2 раза; повышение качества и надежности изготавливаемых деталей путем исключения сварных швов, точности геометрической формы и взаимного расположения поверхностей по сравнению с существующими технологическими процессами. При этом удалось исключить из технологического цикла изготовления ряд трудоёмких химических и прессово-термических операций.

Отдельные результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

Монографии:

1. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Трегубов В.И. Устойчивость анизотропных заготовок в процессах пластического деформирования. Тула: Изд-во ТулГУ, РАРАН. 2014. 222 с.

Статьи в изданиях, входящих в «Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК России для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук»:

2. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Ремнев К.С. Математическая модель многооперационной вытяжки ступенчатых осесимметричных деталей из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 2. С. 409-416.

3. Ремнев К.С., Яковлев С.С. Технологические параметры операций обжима и раздачи трубных заготовок из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 2. С. 513-526.
4. Яковлев С.С., Ремнев К.С. Многооперационная вытяжка полусферических тонкостенных днищ // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 3. С. 420-427.
5. Яковлев С.С., Ремнев К.С. Математическая модель осесимметричного деформирования толстостенных трубных заготовок из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 4. С. 36-47.
6. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Калашников А.Е. Влияние анизотропии механических свойств на образование складок при вытяжке осесимметричных деталей // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 4. С. 98-109.
7. Яковлев С.С., Ремнев К.С. Оценка влияния анизотропии механических свойств трубных заготовок на технологические параметры раздачи // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 2. С. 502-513.
8. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Фам Дык Тхиен. Вопросы теории штамповки ортотропных анизотропно-упрочняющихся материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 4. С. 130-135.
9. Яковлев С.С., Ремнев К.С. Математическая модель анизотропного упрочнения ортотропного материала, разносопротивляющегося растяжению и сжатию // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 4. С. 91-98.
10. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Калашников А.Е. Энергетический критерий устойчивости анизотропной тонколистовой прямоугольной пластины // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 4. С. 114-123.
11. Яковлев С.С., Ремнев К.С. Критерий локальной потери устойчивости ортотропного анизотропно-упрочняющегося листа // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 4. С. 109-113.
12. Яковлев С.С., Ремнев К.С. Основные уравнения и соотношения пластического течения начально-ортотропного упрочняющегося разносопротивляющегося материала // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 5. С. 147-151.
13. Яковлев С.С., Ремнев К.С. Критерий шейкообразования ортотропного анизотропного упрочняющегося листового материала // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 5. С. 176-180.
14. Ремнев К.С., Чудин В.Н., Бессмертная Ю.В. Вытяжка коробки с большими угловыми радиусами // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 5. С. 191-202.
15. Ремнев К.С., Бессмертная Ю.В., Чудин В.Н. Вытяжка коробки с малыми угловыми радиусами // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 6. С. 165-171.
16. Яковлев С.С., Фам Дык Тхиен, Ремнев К.С. Математическая модель последующей операции комбинированной вытяжки анизотропного упрочняющегося материала // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 6. С. 202-207.
17. Кухарь В.Д., Яковлев С.С., Ремнев К.С. Влияние технологических параметров на образование складок при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала // Кузнечно-штамповочное производство. 2011. № 12. С. 3-10.

18. Яковлев С.С., Пилипенко О.В., Ремнев К.С. Вытяжка с утонением стенки деталей из двухслойных анизотропных заготовок // Кузнечно-штамповочное производство. 2011. №11. С. 20-26.

19. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Ремнев К.С. Ротационная вытяжка с утонением стенки трубных заготовок из анизотропного материала // Кузнечно-штамповочное производство. 2011. № 12. С. 10-17.

20. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Ремнев К.С. Технологический процесс изготовления полусферических деталей // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 1. С. 185-191.

21. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Ремнев К.С., Талалаев А.К. Технологический процесс изготовления полуторовых днищ // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 2. С. 148-155.

22. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Ремнев К.С. Многооперационная вытяжка куполообразных тонкостенных деталей ответственного назначения // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 3. С. 144-151.

23. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Ремнев К.С. Предельные степени деформации при ротационной вытяжке с утонением стенки анизотропного материала // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 4. С. 78-85.

24. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Трегубов В.И. Технологические рекомендации по проектированию технологических процессов глубокой вытяжки полусферических днищ // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 4. С. 98-102.

25. Яковлев С.С., Грязев М.В., Ремнев К.С. Критерий устойчивости трубной заготовки из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 5. С. 3-11.

26. Ремнев К.С., Яковлев С.С., Грязев М.В. Закономерности влияния цилиндрической анизотропии механических свойств трубных заготовок на устойчивость в виде образования складок // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 5. С. 11-16.

27. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Трегубов В.И. Технологические процессы холодной штамповки полусферических тонкостенных днищ из титанового сплава // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 6. С. 5-12.

28. Грязев М.В., Ремнев К.С., Яковлев С.С. Влияние коэффициента нормальной анизотропии трубных заготовок на устойчивость в виде образования складок // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 8. С. 55-59.

29. Яковлев С.С., Грязев М.В., Ремнев К.С. Предельные возможности деформирования при раздаче анизотропных трубных заготовок // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 8. С. 59-64.

30. Яковлев С.С., Грязев М.В., Ремнев К.С. Силовые режимы операции раздачи анизотропных трубных заготовок // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 8. С. 70-79.

31. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Ларина М.В. Технологические параметры раздачи трубных заготовок из трансверсально-изотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 8. С. 146-155.

32. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Ремнев К.С. Механические свойства изготавливаемых деталей ротационной вытяжкой // Кузнечно-штамповочное производство, 2012, № 12. С. 35-40.

33. Грязев М.В., Яковлев С.С., Трегубов В.И., Ремнев К.С. Технологии изготовления полых осесимметричных сложнопрофильных деталей // Кузнечно-штамповочное производство. 2012. № 12. С. 3-6.

34. Трегубов В.И., Осипова Е.В., Ремнев К.С. Шейкообразование тонкостенной трубной заготовки из анизотропного материала при ротационной вытяжке коническими роликами по прямому способу // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 1. С. 13-20.

35. Трегубов В.И., Осипова Е.В., Ремнев К.С. Оценка предельных степеней деформации при ротационной вытяжке с утонением стенки тонкостенных трубных заготовок из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 3. С. 529-537.

36. Ремнев К.С. Устойчивость тонкой полосы из анизотропного материала при правке растяжением // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 4. С. 96-108.

37. Ремнев К.С. Влияние анизотропии механических свойств тонкой полосы на устойчивость при правке растяжением // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 5. С. 8-13.

38. Ремнев К.С. Влияние механических свойств тонкой полосы на устойчивость при правке растяжением // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 6. С. 41-43.

39. Яковлев С.С., Ремнев К.С. Выпучивание анизотропного листового металла при правке с повышенными удлинениями // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 7. С. 200-205.

40. Ремнев К.С. Влияние плоскостной анизотропии механических свойств тонкой полосы на устойчивость при правке с повышенными удлинениями // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 8. С. 384-388.

41. Ремнев К.С. Потеря устойчивости панелей // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 8. С. 400-408.

42. Ремнев К.С. Влияние механических свойств тонкой полосы на устойчивость при правке с повышенными удлинениями // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 9. С. 389-393.

43. Ремнев К.С. Влияние механических свойств и геометрических размеров панелей на их потерю устойчивости // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 10. С. 353-361.

44. Грязев М.В., Яковлев С.С., Ремнев К.С. Математическая модель операции вытяжки с утонением стенки двухслойных анизотропных материалов в конической матрице // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 1. С. 66-76.

45. Ремнев К.С., Пилипенко О.В., Осипова Е.В., Ларина М.В. Критерий устойчивого протекания операции ротационной вытяжки изотропных трубных заготовок // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 5. С. 93-97.

46. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Калашников А.Е., Коротков В.А. Экспериментальные исследования складкообразования анизотропной листовой заготовки при вытяжке // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 6. С. 3-9.

47. Ремнев К.С., Яковлев С.С. Условие потери устойчивости в виде гофров при обжиге трубной заготовки из анизотропного материала // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 8. С. 48 – 55.

48. Яковлев С.С., Ремнев К.С. Складкообразование при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 9. С. 39 - 47.

Публикации в сборниках международных и всероссийских научных конференциях и в различных сборниках научно-технических трудов:

49. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Крылов Д.В. Технологические параметры операции обжима анизотропных трубных заготовок // Вестник ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 1. С. 171-179.

50. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Крылов Д.В. Технологические параметры операции обжима анизотропных трубных заготовок // Вестник ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 1. С. 171-179.

51. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Ремнев К.С. Неоднородность механических свойств материала детали при ротационной вытяжке с утонением стенки // Вестник ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 8. С. 138-142.

52. Теория пластического деформирования анизотропных упрочняющихся материалов / С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь, В.Ю. Травин, К.С. Ремнев // Международная научно-техническая конференция «Современные металлические материалы и технологии». Санкт-Петербург. 2013. С. 442-445.

53. Ремнев К.С. Правка тонкой полосы из анизотропного листового металла с повышенными удлинениями // Вестник ТулГУ. Автоматизация: проблемы, идеи, решения. Тула: ТулГУ, 2013. С. 171-176.

54. Яковлев С.С., Ремнев К.С., Осипова Е.В. Условия устойчивого протекания операции ротационной вытяжки с утонением стенки трубных заготовок из анизотропных материалов // Вестник ТулГУ. Автоматизация: проблемы, идеи, решения. Тула: ТулГУ, 2013. С. 181-186.

55. Ремнев К.С. Устойчивость при правке растяжением с малыми удлинениями анизотропной тонкой полосы // Материалы научно-технической конференции «Новые аспекты в обработке металлов давлением». Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. С. 40-41.

56. Грязев М.В., Яковлев С.С., Ремнев К.С. Гофрообразование при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропных материалов // Международная научно-техническая конференция «Современные металлические материалы и технологии». Санкт-Петербург. 2013. С. 331-336.

Подписано в печать 5.03.2015.

Формат бумаги 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 2,1. Уч.-изд. л. 2,0.

Тираж 100 экз. Заказ .

Тульский государственный университет.

300012, г. Тула, просп. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ.

300012, г. Тула, просп. Ленина, 97а.