На правах рукописи

Merel-

#### КОНОНОВ Павел Васильевич

# РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ХОЛОДНОЙ УГЛОВОЙ РАСКАТКИ ДЕТАЛЕЙ С ФЛАНЦАМИ ИЗ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Специальность: 05.16.05 – Обработка металлов давлением

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном

#### учреждении высшего образования

«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

#### Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Востров Владимир Николаевич, профессор кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения ФГАОУ ВО «СПбПУ»

#### Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Данилин Геннадий Александрович, заведующий кафедрой высокоэнергетических устройств автоматических систем ФГБОУ ВПО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» (г. Санкт-Петербург)

кандидат технических наук Лукьянов Алексей Александрович,

ведущий инженер лаборатории 81 НПК-8 ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научноисследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» (г. Санкт-Петербург)

#### Ведущая организация:

ФАНО России ФГБУН «Институт Проблем Машиноведения Российской академии наук» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «09» июня 2016г. в 16<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.03 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан " апреля 2016г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.229.03 кандидат технических наук

(Rec)

Климова О.Г.

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Осесимметричные детали с фланцами широко промышленности, используются различных отраслях например, В В металлургической, машиностроительной, электротехнической, химической, строительной газовой. нефтяной, пищевой, и др. Детали С фланцами обеспечивают надежное соединение в гидроприводах различного назначения, стыковку деталей в изделиях машиностроения, являются основными элементами стеновых проходов, которые защищают трубопроводы от разрушения.

Изготовление деталей с фланцами методами резания в настоящее время является распространенным способом формообразования деталей. Достоинствами методов резания являются широкая номенклатура изделий и относительно низкие энергозатраты процесса. К существенным недостаткам процесса следует отнести большую трудоемкость и высокий отход металла в стружку (до 75 %). Сварные соединения позволяют экономить материал при изготовлении детали с фланцами. Однако технология требует увеличения количества операций. Дополнительные трудности вызывают тепловые деформации в зоне стыковки деталей втулки и фланца. Наиболее эффективными для получения деталей с фланцами являются методы объемного формообразования, позволяющие получать детали достаточной точностью, практически без потерь материала. Известные методы объемного формообразования не обеспечивают возможность изготовления деталей с фланцами из материала заготовок с относительным удлинением не менее 30 % с диапазонами отношений диаметра фланца  $D_{\Phi}$  и длины  $l_{\rm B}$  втулочной части к наружному диаметру втулочной части  $D_{\rm B}$  в интервалах  $1.5 \le D_{\Phi}/D_{\rm B} \le 2.0$  $0.2 \le l_{\rm B}/D_{\rm B} \le 1.0$ . Эти недостатки сдерживают внедрение технологий холодной объемной штамповки (ХОШ) для деталей данного класса.

На основании изложенного тема работы «Разработка технологии холодной угловой раскатки деталей с фланцами из медных сплавов» является актуальной.

<u>Целью работы</u> является разработка и обоснование технических рекомендаций по совершенствованию процессов ХОШ осесимметричных деталей с фланцами на срединной части, уменьшению трудоемкости изготовления и металлоемкости изделия за счет создания благоприятных условий течения металла и устранения причин образования дефектов.

Решение этих вопросов имеет важное народнохозяйственное значение для развития машиностроения.

Для достижения поставленной цели решали следующие заdau:

1. Предложить и исследовать способ ХОШ деталей с фланцами на срединной части, повышающий эффективность процессов ХОШ за счет создания благоприятных условий течения металла и устранения причин образования дефектов, обеспечивающий требуемое качество изделия, высокую производительность процесса, увеличение коэффициента использования металла, снижение капитальных вложений.

2. На основе компьютерного моделирования процесса холодной угловой раскатки деталей с фланцами с использованием критерия разрушения Кокрофта-Латама установить благоприятные схемы течения металла и изменения напряженно-деформированного состояния на всех стадиях раскатки, не приводящие к разрушению заготовок.

3. Разработать методики и экспериментальный стенд, позволяющие выполнить физико-механический анализ образования трещин на всех стадиях процесса угловой раскатки деталей с фланцами, построить статистические модели параметров процессов, оценить адекватность компьютерных моделей, влияние технологических параметров, геометрических размеров заготовки и инструмента, степени деформации на кинематику течения материала, напряженное и деформированное состояния заготовки, силовые режимы и предельные возможности формоизменения. Установить величины остаточных напряжений в изготовленных деталях, используя стандартное оборудование.

4. Разработать методику проектирования технологических процессов угловой раскатки деталей с фланцами на основе симплексного метода оптимизации с использованием комплекса компьютерных и статистических моделей процессов.

5. Проверить в условиях опытно-промышленного производства эффективность разработанной технологии угловой раскатки деталей с фланцами.

Научная новизна диссертационной работы:

– установлены причины образования дефектов деталей с фланцами на срединной части при ХОШ. Определены благоприятные условия течения металла, обеспечивающие устранение причин образования дефектов.

– на основе компьютерного моделирования процесса угловой раскатки деталей с фланцами и выявления предельных значений критериев разрушения Кокрофта-Латама установлены схемы изменения напряженно-деформированного состояния и технологические режимы всех стадий раскатки, не приводящие к разрушению заготовок из медных сплавов.

– разработан алгоритм проектирования оптимальных технологических процессов холодной угловой раскатки деталей с фланцами с использованием комплекса компьютерных и статистических моделей.

## *Практическая значимость* результатов работы:

1. Разработаны методики и экспериментальный стенд, обеспечивающие возможность физико-механического анализа образования трещин на всех стадиях угловой раскатки деталей фланцами, процесса с оценки адекватности моделей, построения компьютерных статистических моделей параметров процессов, влияния технологических параметров, геометрических размеров заготовки и инструмента, степени деформации на кинематику течения материала, напряженное и деформированное состояния заготовки, силовые режимы и предельные возможности формоизменения. Экспериментальный стенд защищен патентом на полезную модель RU 116079 U1.

2. Разработана и принята к внедрению в условиях серийного производства ОАО «Станкостроительный завод» г. Киров технология угловой раскатки деталей с фланцами. Детали установлены в гидравлической системе механизма заточки ножей станка ТчН8. Внедрение новых технологий увеличит производительность

труда в 2,0–2,5 раза и коэффициент использования металла в 1,5–2,0 раза, снизит приведенные затраты на продукцию в 1,5–2,0 раза.

<u>Достоверность положений, выводов и рекомендаций диссертации</u> обеспечиваются результатами лабораторно-производственных исследований и опытно-промышленными испытаниями разработанных технологий; результатами экспериментальных исследований, проведенных на сертифицированном оборудовании; использованием лицензионного программного обеспечения, а также экспериментальными решениями и их статистической обработкой.

<u>Личный вклад</u> автора заключается в участии в постановке задач исследования, в разработке нового способа ХОШ, проведении экспериментов, разработке алгоритмов проектирования технологических процессов холодной раскатки деталей с фланцами с использованием комплекса компьютерных и статистических моделей, анализе и изложении результатов исследований.

## Основные положения выносимые на защиту:

1. Анализ и научное обоснование причин образования дефектов деталей с фланцами на срединной части при ХОШ и создание благоприятных условий течения металла, обеспечивающих устранение причин их образования.

2. Новый способ и конструкторские решения объемного формообразования деталей с фланцами, обеспечивающие повышение эффективности процессов ХОШ. Способ защищен патентом на изобретение *RUS* 2499648.

3. Научно обоснованные методики компьютерного моделирования процессов холодной угловой раскатки деталей с фланцами.

4. Методики и экспериментальные стенды для обеспечения возможности физико-механического анализа образования трещин, оценки адекватности компьютерных моделей и остаточных напряжений в изготовленных деталях, построения статистических моделей параметров процессов, определения бездефектных технологических режимов угловой раскатки деталей с фланцами.

5. Методики проектирования технологических процессов угловой раскатки деталей с фланцами на основе симплексного метода оптимизации с использованием комплекса компьютерных и статистических моделей процессов.

6. Результаты проверки в условиях опытно-промышленного производства эффективности разработанной технологии угловой раскатки деталей с фланцами.

<u>Апробация результатов работы.</u> Результаты диссертационной работы докладывали и обсуждали на следующих конференциях, семинарах и школах:

- на международных: на 2-й Международной научно-практической конференции • «Современное машиностроение. Наука и образование», Санкт-Петербург, 14-15 Международной июня 2012 Г.; 3-й научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование», Санкт-Петербург, 20-21 Международной научно-практической 2013 Г.; 4-й конференции июня «Современное машиностроение. Наука и образование», Санкт-Петербург, 19-20 июня 2014 г.
- <u>на всероссийских</u>: VI Всероссийской школе-семинаре студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур», Рязань, 16-20 сентября 2013 г.; Всероссийской молодежной школе-семинаре

«Диагностика наноматериалов и наноструктур», Рязань, 21-23 октября 2013 г.; 16 Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, 24-28 ноября 2014 г.

научно-практической конференции с Международным участием «XLI неделя науки СПБГПУ», Санкт-Петербург, 3-8 декабря 2012 г.; II научно-технической конференции с международным участием «Наноиндустрия и технологии будущего» для студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 10 апреля 2013 г.; 68-й научно-технической конференции, посвящённой Дню Радио, Санкт-Петербург, 18-26 апреля 2013 г.; шестнадцатой научной молодёжной школе по твердотельной электронике с международным участием «Материалы и технологии гибкой электроники», Санкт-Петербург, 12 ноября 2013 г.; научнопрактической конференции с международным участием. Неделя науки СПбГПУ, Санкт-Петербург, 1-6 декабря 2014 г.; XVIII-й Санкт-Петербургской ассамблеи молодых ученых и специалистов, Санкт-Петербург, 13 декабря 2013 г.; XIX-й Санкт-Петербург, 19 декабря 2014 г.

<u>Публикации.</u> Основные теоретические и практические результаты диссертации отражены в 29 печатных работах, в том числе 7 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных перечнем ВАК РФ, и 2 патента.

Диссертационная работа была выполнена при поддержке «Гранта для студентов и аспирантов ВУЗов и академических институтов Правительства Санкт-Петербурга» в 2013, 2014 г.г. (ПСП № 13211, ПСП № 14245); гранта РФФИ № 14-08-31655 в 2014-2015 г.г.; стипендии президента РФ в 2014-2015г.г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами, И библиографического заключения списка, включающего 92 работы наименования. Основная часть изложена на 179 страницах машинописного текста, содержит 126 рисунка и 28 таблиц.

# ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована научная новизна, практическая значимость полученных в работе результатов и научные положения, выносимые на защиту.

**В** первой главе представлена область применения деталей с фланцами, удаленными от торца, анализ технологических методов их изготовления и современное состояние компьютерного моделирования процессов объемного формообразования.

Подход к процессам получения методами ХОШ деталей с фланцами как к совершенствование технологической системе, которой происходит BO взаимосвязи с основными направлениями работ по экономии ресурсов в показывает необходимость решения машиностроении, задачи на основе достижений и дальнейшего развития теории и технологии малоотходных процессов ХОШ деталей и точных заготовок. Большое значение для решения задач теоретических, экспериментальных и технологических основ горячего и

формообразования деталей холодного с фланцами имеют результаты проведенных исследований в различных аспектах, выполненные отечественными учеными Смировым В.С., Целиковым А.Н., Богоявленским К.Н., Смирновым-Аляевым Г.А., Сторожевым М.В., Рудским А.И., Аксеновым Л.Б., Рыбиным Ю.И., Золотовым А.М., Востровым В.Н., Данилиным Г.А. и другими. Вопросы совершенствования процесса формообразования деталей с фланцами отражены в работах зарубежных ученых: Adams B., Altan T., Arumugam U., Bartnicki J., Behrens B-A., Landgrebe D., и других. Несмотря на большое количество работ, возникают задачи расширения номенклатуры деталей с фланцами, формообразуемых методами ХОШ и поиска эффективных технологий и оборудования.

На основании проведенного анализа литературы сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

*Вторая глава посвящена* анализу методов ХОШ деталей с фланцами и разработке способа, расширяющего их технологические возможности.

Анализ методов ХОШ деталей с фланцами, выполненный на основе разработанной классификации, показал границы применимости известных технологий и необходимость отыскания новых решений для обеспечения возможности формообразования деталей с фланцами из материалов заготовок с относительным удлинением  $\delta \ge 30$ % с диапазонами отношений диаметра фланца  $D_{\Phi}$  и длины  $l_{\rm B}$  втулочной части к наружному диаметру втулочной части  $D_{\rm B}$  в интервалах  $1,5 \le D_{\Phi}/D_{\rm B} \le 2,0; 0,2 \le l_{\rm B}/D_{\rm B} \le 1,0$ . Данные технологические параметры превышают возможности известных процессов ХОШ деталей с фланцами (таблица 1).

Возможность объемного формообразования деталей с вышеуказанными параметрами обеспечил разработанный способ холодной угловой раскатки деталей с фланцами. Способ защищен патентом на изобретение *RUS* 2499648.

Реализация разработанного способа раскатки деталей с фланцами, удаленными от торцов заготовки, представлена на рисунке 1. Формообразование детали с фланцем выполняют в три стадии. В исходном состоянии (рисунок 1 а) первый раскатной валок 1 устанавливают под углом β<sub>1</sub> к оси приводной матрицы 2, а второй раскатной валок 6 располагают под углом а. Исходную заготовку 3 одевают на стержневой участок выталкивателя 4 и размещают в приводной матрице 2. Высота деформируемого участка заготовки равна  $l_{II}$ . Длина базового участка заготовки l<sub>H</sub>. Опора выталкивателя 5 подводится к выталкивателю 4 и вводится с ним в контакт для повышения жесткости системы заготовкаинструмент. Заготовка имеет наружный диаметр базового участка D<sub>H</sub>, внутренний диаметр *D*<sub>вн</sub> и диаметр деформируемого участка *D*<sub>л</sub>. На первой стадии раскатки детали с фланцем (рисунок 1б) приводную матрицу 2 с заготовкой 3 приводят во вращение. Раскатной валок 1 подводят к заготовке 3 под углом β1. В процессе деформирования выставленной части заготовки осуществляют ротационную высадку и формируют усеченный конус. На второй стадии раскатки (рисунок 1 в) формируется предварительный фланец. При этом первый раскатной валок 1 устанавливают под углом  $\beta_2$  к оси приводной матрицы 2. На заключительной стадии раскатывают предварительный фланец вторым раскатным валком 6, установленным под углом  $\alpha$  к оси приводной матрицы 2 (рисунок 1 г), где  $h_{\Phi}$  – высота фланца,  $l_{\rm B}$  – длина втулочной части,  $D_{\rm B}$  – наружный диаметр втулочной части,  $D_{\Phi}$  – наружный диаметр фланца.

Вид операции ОМД	Относительное удлинение материала заготовки δ, %	Относительное удаление фланца от торца заготовки $\frac{l_{\rm B}}{D_{\rm B}}$	Относительный диаметр $\phi$ ланца $\frac{D_{\phi}}{D_{\rm B}}$	Относительная толщина $\phi$ ланца $\frac{h_{\Phi}}{D_{B}}$	
Поперечная прокатка	$30~\% \le \delta$	$0,1 \le \frac{l_{\rm B}}{D_{\rm B}} \le 10$	$1,1 \le \frac{D_{\Phi}}{D_{\rm B}} \le 1,3$	$0,5 \le \frac{h_{\Phi}}{D_{B}} \le 1,0$	
Осадка заготовок обкатыванием	$30\% \le \delta$	$0 \le \frac{l_{\rm B}}{D_{\rm B}} \le 0, 5$	$1,1 \le \frac{D_{\Phi}}{D_{B}} \le 1,2$	$0, 2 \le \frac{h_{\Phi}}{D_{\rm B}} \le 0, 3$	
Торцовая раскатка	$30\% \le \delta$	$0 \le \frac{l_{\rm B}}{D_{\rm B}} \le 0,3$	$1,5 \le \frac{D_{\Phi}}{D_{\rm B}} \le 2,0$	$0,1 \le \frac{h_{\Phi}}{D_{\rm B}} \le 0,3$	
Высадка в наклонной матрице	$30\% \le \delta$	$0,5 \le \frac{l_{\rm B}}{D_{\rm B}} \le 1,5$	$1,2 \le \frac{D_{\Phi}}{D_{\rm B}} \le 1,4$	$0,1 \le \frac{h_{\Phi}}{D_{\rm B}} \le 0,2$	
Радиальное выдавливание	$30~\% \le \delta$	$0,3 \le \frac{l_{\rm B}}{D_{\rm B}} \le 2,0$	$1,3 \le \frac{D_{\Phi}}{D_{\rm B}} \le 1,5$	$0,1 \le \frac{h_{\Phi}}{D_{B}} \le 1,3$	
Высадка на многопозиционном автомате	$40\% \le \delta$	$0,1 \le \frac{l_{\rm B}}{D_{\rm B}} \le 1,0$	$1,3 \le \frac{D_{\Phi}}{D_{B}} \le 1,5$	$0, 2 \le \frac{h_{\Phi}}{D_{B}} \le 0, 3$	
Раскатка наклонными валками в две стадии	$40\% \le \delta$	$0, 2 \le \frac{l_{\rm B}}{D_{\rm B}} \le 0, 8$	$1,3 \le \frac{D_{\Phi}}{D_{\rm B}} \le 2,0$	$0,1 \le \frac{h_{\Phi}}{D_{\rm B}} \le 0,3$	
Разработанный способ угловой раскатки	$30~\% \le \delta$	$0, 2 \le \frac{l_{\rm B}}{D_{\rm B}} \le 1, 0$	$1,5 \le \frac{D_{\Phi}}{D_{\rm B}} \le 2,0$	$0,1 \le \frac{h_{\Phi}}{D_{\rm B}} \le 0,3$	

Таблица 1 – Технологические возможности процессов холодной объемной штамповки деталей с фланцами







Рисунок 1 – Последовательность формообразования детали с фланцем раскаткой: а – исходные состояние заготовки и положение раскатных валков; б, в, г – первая, вторая и третья стадии раскатки

Заготовки в исходном состоянии, а также после первой и второй стадий раскатки подвергались отжигу при температуре на 300–350 °C выше начала рекристаллизации исследуемых медных сплавов (рисунок 2). Отжиг устранил упрочнение и восстановил ресурс пластичности материала заготовки.



Рисунок 2 – График цикла термической обработки заготовки в исходном состоянии после первой и второй стадий раскатки детали с фланцем из Л63 и Л68

В качестве моделей материалов деформируемых образцов выбраны медные сплавы Л63, Л68 и МС. Латунь Л68 однофазный сплав, состоящий из кристаллов α-твердого раствора цинка в меди. Все α-латуни пластичны и хорошо обрабатываются давлением в холодном состоянии. Латунь Л63 имеет небольшое количество β-фазы и является двухфазной (α+β) латунью. Малое количество βфазы практически не влияет на пластические свойства латуни Л63. Однако при быстром охлаждении после отжига содержание β-фазы может оказаться значительным и пластичность снизится. При отжиге в латуни Л68 и Л63 снимаются напряжения сохраняется эффективно остаточные И высокая прочность. Латуни марок Л68, Л63 имеют широкое распространение в различных отраслях промышленности благодаря сочетанию высоких механических и технологических свойств.

Сплав МС представляет собой низколегированную марку меди. Имеет незначительную ползучесть при неизменной электро- и теплопроводности, что достигается легированием серебром. Применяется в электротехнике, машиностроении, металлургии и строительстве в качестве электротехнических приборов, бесшовных труб, ответственных устройств трубопроводной арматуры.

Реологические свойства исследуемых материалов (сопротивление деформации) сплавов Л68, Л63 и МС для моделирования в комплексах *Deform-3D* и *Simufact.Formin* заданы таблично на основании кривых упрочнения, полученных экспериментально при испытаниях на растяжение в диапазоне скоростей деформации 0,1–15 с<sup>-1</sup> (рисунок 3). Согласно полученным данным скорость деформации практически не влияет на ход экспериментальных кривых. Химический состав исследуемых сплавов представлен в таблицах 2 и 3.

	1				5		/	
Сплав	Си	Fe	Р	Pb	Bi	Sb	Zn	Примеси
Л68	6770	0,1	0,001	0,03	0,002	0,005	Остальное	0,3
Л63	6265	0,2	до 0,01	до 0,07	до 0,002	до 0,005	Остальное	0,5

Таблица 2 – Химический состав в % латуней (по ГОСТ 15527-2004)

Таблица 3 – Химический состав меди МС в % (ТУ 4	48-21-137-88)
---	---------------

Ag	Bi	Sb	As	Fe	Ni	Pb	Sn	S	$O_2$	Zn	Р	Си	Примеси
0,12	0,001	0,002	0,002	0,004	0,002	0,004	0,002	0,004	0,0035	0,0001	0,002	остальное	0,05

Для рекомендации новой технологии к промышленному использованию необходимо оценить качество раскатанных деталей с фланцами.

**В** третьей главе поставлена задача оценки качества деталей формообразованных по разработанной технологии на основании компьютерного моделирования процесса угловой раскатки в программах комплексах Deform-3D, Simufact.Formin и критерия разрушения материала заготовки Кокрофта-Латама.



Исходя из того, что процесс сопровождается раскатки большими пластическими деформациями, на контактной поверхности задан закон трения по Зибелю, в соответствии с которым напряжения контактного трения  $\tau_T$  заданы зависимостью:  $\tau_T = \nu \sigma_S$ , где  $\sigma_S - \tau_S$ текучести предел металла заготовки, V – показатель трения.  $\tau_T$  имеет знак, противоположный знаку скорости течения материала на поверхности контакта заготовки и раскатного валка.

При компьютерном моделировании исследуемого процесса использовались следующие граничные условия: модель среды заготовки – жесткопластическая с упрочнением; модель среды инструмента – жесткая; на контактной поверхности задан закон трения по Зибелю; показатель трения принят v = 0,15; число конечных элементов сетки заготовки 120–150 тыс.; подача валка 0,1–0,5 мм/об; скорость вращения заготовки 60–120 об/мин; свойства материала заготовки соответствовали температуре T=20 °C.

На примере первой стадии деформирования заготовки из латуни Л68 (формирование конуса) на рисунке 4 показана схема задания граничных условий. На свободных поверхностях, где нет контакта заготовки с раскатным валком и матрицей, задавали нулевые силовые условия в виде сил, действующих по нормали к поверхности  $\{P\}=0$ . Кинематические условия перемещения  $f_Y$  определяли на контактных поверхностях в направлении оси Y, а в двух других направлениях – проекции напряжения контактного трения  $\tau_T$  на оси  $X(\tau_{TX})$  и  $Z(\tau_{TZ})$ . Исходная твердотельная геометрия заготовки и инструмента создавались в *АutoCAD* и импортировались в программные комплексы *Deform*–3D и *Simufact.Forming*. В расчете инструмент представлен в виде абсолютно твердого тела для уменьшения времени расчета.



Рисунок 4 – Схема задания граничных условий на первой стадии угловой раскатки

Для описания процесса разрушения выбран нормализованный критерий  $C_{\kappa-\pi}$ . Кокрофта-Латама Предельные значения данного критерия  $C_{\text{K-Л}}^{\text{ПР}}$  определены последовательного методом подбора конечных диаметров в месте разрушения виртуальных образцов при моделировании в *Deform*-2*D* И пакете испытаныхх на экспериментальном комплексе Gleeble-3800. Экспериментально-расчетная методика включает следующие этапы: растяжение образцов до разрушения на комплексе Gleeble-3800; фиксирование диаметра образца в месте конечно-элементное разрушения; его моделирование растяжения образца до разрушения. Критерий С<sub>к-п</sub> вычисляется по

формуле: 
$$C_{\text{K-Л}} = \int_{0}^{c_i} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon_i$$
, где  $\varepsilon_i$  – накопленная интенсивность деформации,  $\sigma_1$  –

главное растягивающее напряжение,  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений по Мизесу.

На рисунке 5 представлены: конечно-элементная сетка образца (рисунок 5 а), финальная стадия разрушения образца при компьютерном моделировании (рисунок 5 б) и финальная стадия разрушения физического образца (рисунок 5 в). Испытания выполнены в диапазоне скоростей деформации  $\dot{\varepsilon} = 0,1-15,0$  с<sup>-1</sup>.

Установлены значения  $C_{\text{K-Л}}^{\text{ПР}}$  для образцов из исследуемых материалов: латунь Л68 –  $C_{\text{K-Л}}^{\text{ПР}} = 1,85$ ; латунь Л63 –  $C_{\text{K-Л}}^{\text{ПP}} = 1,75$ ; медь МС –  $C_{\text{K-Л}}^{\text{ПP}} = 1,35$ .



Конечно-Рисунок 5 сетка элементная образца компьютерном при моделировании В пакете Deform-2D (a); поля распределения значений критерия разрушения (б) и вид образца для испытаний (в) на стадии окончательного разрушения при температуре *T*=20 °C

Компьютерное моделирование показало, что на всех стадиях угловой фланцем только за пределами геометрического раскатки детали с очага действуют деформации растягивающие напряжения **(**ОД**)** (рисунок 6). Максимальные значения интенсивности деформации сосредоточены В приконтактных слоях (рисунок 7).



Рисунок 6 – Поля распределения главных напряжений в ОД: а – первая стадия раскатки, β<sub>1</sub>=30°; б – вторая стадия, β<sub>2</sub>=15°; в – третья стадия, α =45°



Рисунок 7 – Поля распределения интенсивности деформаций: а – первая стадия раскатки, β<sub>1</sub>=30°; б – вторая стадия, β<sub>2</sub>=15°; в – третья стадия, α =45°

В местах действия главных растягивающих напряжений и максимальных значений деформаций наблюдаются максимальные значения  $C_{\text{к-л}}$  (рисунок 8).



Рисунок 8 – Поля распределения значений  $C_{\text{к-л}}$  для первой (а), второй (б) и третьей (в) стадии раскатки детали с фланцем: 1,2 – области сосредоточения максимальных расчетных значений критерия

Расчетные значения  $C_{\text{K-Л}}$  для исследуемых областей заготовки представлены в таблице 4. При использовании рекомендуемых режимов угловой раскатки деталей с фланцами расчетные значения  $C_{\text{K-Л}}$  не превышают допустимых значений, определенных экспериментально.

Таблица 4 – Значения C<sub>к-л</sub> для исследуемых областей заготовки (рисунок 8)

№ стадии	Исследуемой области				
раскатки	1	2			
1	0,42	0,33			
2	0,71	_			
3	1,46	1,34			

Распределение критерия разрушения  $C_{\text{K-Л}}$  в заготовке на первой стадии раскатки детали с фланцем при различных значениях угла наклона  $\beta_1$  раскатного валка показано на рисунке 9.

По результатам компьютерного моделирования установлено что на первой стадии раскатки, при углах наклона  $\beta_1$  раскатного валка менее 25 ° могут образовываться трещины в области основания конуса (рисунок 10 а), что свидетельствует об активном

течении металла в радиальном направлении и исчерпании ресурса пластичности материала заготовки. Последующая раскатка данной заготовки невозможна. Углы наклона раскатного валка, превышающие  $35^{\circ}$ , направляют течение металла преимущественно во втулочную часть заготовки. В результате на третьей стадии раскатки формируется деталь с фланцем, не превышающим диаметр раскатываемого участка исходной заготовки (рисунок 10 в). Рациональный диапазоны углов наклона раскатных валков на первой стадии  $\beta_1 = 25 - 35^{\circ}$ . На рисунке 10 б показана заготовка требуемого качества, полученная при  $\beta_1 = 30^{\circ}$ .

13



Рисунок 9 – Поля распределения  $C_{\text{к-л}}$  в заготовке на первой стадии раскатки детали с фланцем при различных значениях  $\beta_1$ : а –  $\beta_1 = 15^\circ$ ; б –  $\beta_1 = 30^\circ$ ; в –  $\beta_1 = 45^\circ$ 



Рисунок 10 – Заготовки, полученные раскаткой при различных значениях β<sub>1</sub> на первой стадии раскатки

Поля распределения критерия разрушения  $C_{\text{к-л}}$  в заготовке на второй стадии раскатки детали с фланцем представлены на рисунке 11.



Рисунок 11 – Поля распределение  $C_{\text{K-Л}}$  в заготовке на второй стадии раскатки детали с фланцем при различных значениях  $\beta_2$ : а –  $\beta_2 = 0^\circ$ ; б –  $\beta_2 = 15^\circ$ ; в –  $\beta_2 = 30^\circ$ 

Значения углов наклона раскатного валка  $\beta_2$  на второй стадии раскатки эффективно назначать в промежутке от 10 до 20°. При углах менее 10° образуются закаты на торцовой поверхности фланца на третьей стадии раскатки вследствие преимущественного течения металла в радиальном направлении (рисунок 12 а).

При углах  $\beta_2$ , превышающих 20°, формируются фланцы неполного объема на третьей стадии раскатки вследствие активного течения металла в осевом направлении (рисунок 12 в). На рисунке 12 б показана заготовка рациональной формы после второй стадии раскатки при  $\beta_2 = 15^\circ$ .

 $\begin{array}{c} a & 6 & e \\ \hline \end{array}$ 

Рисунок 12 – Заготовки, полученные раскаткой при различных значениях β<sub>2</sub> на второй стадии раскатки

Окончательное формирование контуров фланца и втулочной части детали осуществляется на третьей стадии раскатки. Рациональные значения углов  $\alpha$  наклона раскатного валка к оси заготовки находятся в интервале  $45^{\circ} \leq \alpha \leq 75^{\circ}$ . Применение углов  $\alpha$  менее  $45^{\circ}$  ограничивает длину раскатываемой втулочной части детали соотношением  $l_{\rm B}/D_{\phi} \leq 0, 2-0, 22$ . Использование углов  $\alpha$  более  $75^{\circ}$  затрудняет течение металла в радиальном направлении и ограничивает размеры формируемых фланцев соотношением  $D_{\phi}/D_{\rm B} \leq 1, 2-1, 4$ .

Таким образом, моделирование течения металла заготовки в процессе угловой раскатки детали с фланцем в комплексах *Deform*-3D и *Simufact.Forming* позволило определить рациональные диапазоны углов наклона раскатных валков на всех стадиях деформирования заготовки: на первой стадии  $\beta_1 = 25^\circ - 35^\circ$ , на второй стадии  $\beta_2 = 10 - 20^\circ$  и на третьей стадии –  $\alpha = 45 - 75^\circ$ .

Результаты исследования напряженного и деформированного состояний заготовки в процессе раскатки деталей с фланцами на основе компьютерного моделирования в программных комплексах *Deform-3D* и *Simufact.Formin*, а также анализ нормализованного критерия разрушения материала заготовки Кокрофта-Латама показали, что раскатанные детали обладают достаточным для эксплуатации запасом ресурса пластичности и могут быть рекомендованы для промышленного использования.

На рисунке 13 представлены изображения, в левой части которых приведена половина экспериментальной раскатанной заготовки, а в правой части – половина виртуального образца, построенного в *Deform*–3D. Изображения реальной и виртуальной заготовок, построенных в программном комплексе *Deform*–3D после трех стадий их деформирования, практически не отличаются.

15



Рисунок 13 – Сопоставление формы раскатанной заготовки в лабораторных условиях (левая часть изображения) с формой модели, полученной в *Deform*–3D (правая часть изображения) после трех стадий раскатки детали с фланцем из латуни Л63: а – первая; б – вторая; а – третья

Результаты экспериментального исследования разработанной технологии угловой раскатки деталей с фланцами представлены в следующей четвертой главе.

Четвертая глава посвящена разработке методик и экспериментального стенда, позволяющих выполнить физико-механический анализ образования трещин на всех стадиях процесса угловой раскатки деталей с фланцами; построить статистические модели параметров процессов; оценить адекватность компьютерных моделей, влияние технологических параметров, геометрических размеров заготовки и инструмента, степени деформации на кинематику течения материала, напряженное и деформированное состояния заготовки, силовые режимы и предельные возможности формоизменения.

Для экспериментального исследования основных параметров новой технологии спроектирован и изготовлен стенд, выполненный на базе токарного станка ДИП 300, обеспечивающий кинематику разработанного метода раскатки деталей с фланцами. Экспериментальный стенд защищен патентом на полезную модель *RU* 116079 *U*1.

параметры Энергосиловые предопределяют выбор технологического оборудования для процесса раскатки деталей с фланцами. Точность деталей является одним из основных критериев, характеризующих качество деталей конструкционного назначения. Регрессионные модели энергосиловых параметров процесса и параметров точности (отклонение от цилиндричности *EFZ*, радиальное биение ECR, отклонение от круглости EFK, торцовое биение ECA) деталей с фланцами разработаны на основе метода планирования эксперимента. В качестве эксперимента выбран оптимальный трехуровневый план 34. плана Характеристика плана: D-эффективность,  $e^{(D)} = 0,966$ ; A-эффективность,  $e^{(A)} =$ 0,872;  $\vec{E}$ -эффективность,  $e^{(\vec{E})} = 0,647$ ; Q-эффективность,  $e^{(Q)} = 0,913$ . В каждой точке планов эксперимента сделано по три повторных опыта. В качестве факторов на первой стадии формообразования детали с фланцем использованы следующие комплексы безразмерных величин:  $B_{11} = D_{II}/D_{OK}$ ;  $B_{12} = S_1/D_{OK}$ ;  $B_{13} = \beta_1$ ;  $B_{14} = n_1/n_{max}$ ; на второй стадии:  $B_{21} = D_{\rm B}/D_{\Phi}$ ;  $B_{22} = S2/D_{\Phi}$ ;  $B_{23} = \beta_2$ ;  $B_{24} = n2/n2_{max}$ ; на третьей стадии:  $B_{31} = D_{\rm B}/D_{\Phi}; B_{32} = S3/D_{\Phi}; B_{33} = \alpha; B_{34} = n3/n3_{max}$  где  $D_{\rm II}$  – наружный

диаметр раскатываемого участка заготовки;  $D_{OK}$  –диаметр основания раскатанного усеченного конуса;  $D_B$  – наружный диаметр ступицы;  $D_{\Phi}$  – наружный диаметр фланца; S3 – единичное обжатие заготовки (величина подачи раскатного валка) на третьей стадии раскатки;  $\alpha$  – угол наклона раскатного валка к оси заготовки, n3 – скорость вращения заготовки на третьей стадии раскатки;  $n3_{max}$  – предельно допустимая скорость вращения заготовки на третьей стадии раскатки.

Комплексы преобразованы в нормированные переменные:  $x_i = (B_i - B_i^0)/\Delta B_i$ , где  $B_i^0 = (B_{iB} + B_{iH})/2$ ,  $\Delta B_i = (B_{iB} - B_{iH})/2$ .

Регрессионные модели энергосиловых параметров процесса раскатки фланцев на трех стадиях формообразования заготовки имеют вид:

первая стадия угловой раскатки деталей с фланцами:

$$\frac{P}{\sigma_s D_{\Phi}^2} = 0,1272 \pm 0,026 x_2^2 \pm 0,027 x_1 \pm 0,044 x_2 \pm 0,088 x_3 \pm 0,097 x_4 - 0,025 x_1 x_3 \pm 0,008 x_2 x_3$$
(4.3.6)

вторая стадия угловой раскатки деталей с фланцами:

$$\frac{P}{\sigma_s D_{\Phi}^2} = 0,1541 \pm 0,036 x_1^2 \pm 0,068 x_2^2 \pm 0,038 x_3^2 \pm 0,013 x_2 \pm 0,019 x_3 \pm 0,085 x_4 \pm 0,016 x_1 x_2 \pm 0,047 x_2 x_3$$
(4.3.7)

третья стадия угловой раскатки деталей с фланцами:

$$\frac{P}{\sigma_s D_{\Phi}^2} = 0,1816 + 0,025x_1^2 + 0,077x_1 + 0,091 x_2 + 0,036 x_3 + 0,043 x_4 - 0,084 x_1 x_3 + 0,106 x_2 x_3,$$
(4.3.8)

где P – усилия деформирования;  $\sigma_S$  – предел текучести обрабатываемого материала;  $D_{\Phi}$  –диаметр фланца.

Построенные статистические модели адекватны, поведение остатков удовлетворительное, погрешности моделей не превышают 15 %, допустимой величины для регрессионных моделей, построенных методами планирования эксперимента. Следовательно, статистически модели могут быть рекомендованы для практического применения.

Установлено, что точность раскатанных деталей соответствует 9–10 степеням точности по ГОСТ 24642–81. Показатели шероховатости поверхностей деталей отвечают 6*a*–6*b* классам по ГОСТ 25142–82. Точность и качество поверхности раскатанных деталей по разработанной технологии удовлетворяют техническим требованиям.

Анализ микроструктуры раскатанных деталей с фланцами до и после отжига (рисунок 14) показал, что упрочнение металла раскатанных деталей привело к изменению их структуры: формы и ориентировки зерен, образованию полос деформации и т.д., по всей поверхности контакта инструмента с заготовкой частицы материала имеют значительную неоднородность. С упрочнением повысился уровень внутренней энергии в металле, а, следовательно, и склонность наклепанного материала к процессам разупрочнения при нагреве. Плотность дислокаций в деформированных металлах составляет  $10^9-10^{11}$  на 1 см<sup>2</sup>.



Рисунок 14 – Микроструктура раскатанной детали с фланцем из латуни Л63 после заключительной стадии раскати: а – область перехода от втулочной части к фланцу до отжига (x50); б – область втулочной части до отжига (x100); в – Область перехода от втулочной части к фланцу после отжига (x50); г – область втулочной части после отжига (x100)

Согласно предложенной технологии исходная заготовка и заготовки после первых двух стадий раскатки подвергаются отжигу. После заключительной стадии операция отжига не выполняется, и в поверхностных слоях раскатанных деталей с фланцами зерна имеют форму вытянутой строчной ориентации.

В результате в готовой раскатанной детали значительно уменьшилась анизотропия материала и остаточные напряжения, что оказало положительное влияние на эксплуатационные свойства детали.

Остаточные напряжения в раскатанной детали эффективно исследовать с применением дифрактометра XSTRESS 3000G3R с модифицированным гониометром.

Калибровка дифрактометра проводилась с использованием эталонного порошкового образца из меди с параметром решетки  $a = 0,36148 \pm 0,0001$  нм. Положение и интенсивность пиков остаточных напряжений определялось на основе функции Пирсона VII:  $F(X) = \frac{a_0}{\left[1 + 4\left(\frac{X - a_1}{a_2}\right)^2 \left(2^{1/a_3} - 1\right)\right]^{a_3}}$ , где  $a_0$  –

интенсивность дифракционной линии;  $a_1$  – центр дифракционной линии,  $a_2$  – ширина дифракционной линии на полувысоте дифракционного максимума,  $a_3$  – ширина дифракционной линии на основании пика; X – координата в направлении измерения. Анализ остаточных напряжений показал, что в поверхностных слоях материалов деталей с раскатанными фланцами действуют преимущественно остаточные напряжения порядка (+35)...(-150) МПа, которые оказывают положительное влияние на эксплуатационные свойства детали.

Результаты компьютерных и экспериментальных исследований показали, что детали с фланцами, сформированные раскаткой наклонными валками, соответствуют предъявляемым техническим требованиям и могут быть рекомендованы для промышленного использования.

Внедрению новой технологии в промышленности, способствуют оптимальные технологические параметры процесса раскатки деталей с фланцами.

Пятая глава посвящена разработке методики проектирования оптимальных технологических процессов холодной угловой раскатки деталей с фланцами и опытно–промышленным испытаниям разработанной технологии.

Для оптимизации технологических режимов предложена имитационная модель процесса холодной угловой раскатки деталей с фланцами. Имитационная модель содержит компьютерные и статистические модели. Структура имитационной модели исследуемого процесса показана на рисунке 15.

Вектор экзогенных параметров A(A1 - A5) содержит параметры, которые не меняются в ходе использования модели: A1 - функция упрочнения материала изделия; <math>A2 -относительное удлинение материала изделия; A3 -предел текучести материала изделия; A4 -геометрические размеры изделия; A5 -геометрические размеры раскатных валков. Эндогенные параметры V(Y1 - Y32) определены целями проектирования. Параметр Y32 (приведенные затраты на продукцию) представляет собой целевую функцию. Условием решения задачи является

# $Y_{\text{OITT}} = min_X Y32.$

На вход имитационной модели подаются управляющие параметры: X1 – подача S1 раскатного валка на первой стадии раскатки заготовки; X2 – подача S2 раскатного валка на второй стадии раскатки заготовки; X3 – подача S3 раскатного валка на заключительной стадии раскатки заготовки; X4 – угол наклона  $\beta_1$  раскатного валка на первой стадии раскатки заготовки; X5 – угол наклона  $\beta_2$  раскатного валка на второй стадии раскатки заготовки; X6 – угол наклона  $\alpha$  раскатного валка на второй стадии раскатки заготовки; X6 – угол наклона  $\alpha$  раскатного валка на заключительной стадии раскатки заготовки; X6 – угол наклона  $\alpha$ 

Выбор наилучшего варианта технологического процесса осуществляется последовательным симплексным методом оптимизации. В качестве примера расчета технологических режимов холодной угловой раскатки деталей с фланцами определены параметры процесса детали «Втулка ПВ 20М–60.051» трубного соединения из латуни Л68 (ОАО «Станкостроительный завод», г. Киров). Деталь имеет следующие технические характеристики: диаметр и ширина фланца, соответственно, равны 68 мм и 5 мм, диаметр и длина цилиндрической втулки – 40 мм и 25 мм. Годовая программа 3000 шт/год.



Рисунок 15 – Имитационная модель процесса раскатки детали с фланцем

Целевая функция У24 достигает области оптимума начиная с 22 опыта. После 29 опыта симплекс выходит из области экстремума. Наименьшее значение приведенных затрат на продукцию З<sub>ПР</sub> = 242 руб/год/шт функция принимает в 25 опыте (рубль условная денежная единица). Экстремальная величина целевой функции получена при значениях управляющих параметров:  $S_1 = 0.81$  мм/об;  $S_2 = 0.45$  мм/об;  $S_3 = 0.28$  мм/об;  $\beta_1 = 0.51$  рад  $= 29^\circ$ ;  $\beta_2 = 0.25$  рад  $= 14^\circ$ ;  $\alpha = 0.84$  рад  $= 48^\circ$ .

Проанализированы возможные дефекты изготовленных деталей с фланцами и разработаны рекомендации по устранению дефектов. Фотографии типовых образцов раскатанных деталей представлены на рисунке 16.



Рисунок 16 – Фотографии типовых образцов раскатанных деталей

Разработанная технология обеспечивает повышение производительности труда в 2,0 – 2,5 раза, увеличение коэффициента использования металла в 1,5 – 2,0 раза, снижение приведенных затрат на продукцию в 1,5 – 2,0 раза. Технология принята к внедрению на ОАО «Станкостроительный завод» (г. Киров). Деталь «Втулка ПВ–20М 60.051» из латуни Л68 с раскатанным фланцем на срединной части установлена в гидравлической системе механизма заточки ножей станка ТчН8.

## Общие выводы

1. Разработан способ ХОШ деталей с фланцами на срединной части, повышающий эффективность процессов ХОШ за счет создания благоприятных И устранения причин образования дефектов, течения металла vсловий обеспечивающий требуемое качество изделия, высокую производительность увеличение коэффициента использования процесса. металла. снижение приведенных затрат на продукцию. Способ защищен патентом на изобретение RUS 2499648.

Разработана обоснованная 2. научно методика проектирования технологических процессов формообразования деталей с фланцами на срединной основанная симплексном методе оптимизации комплексе части. на И компьютерных и статистических моделей процессов, позволяющая осуществить стадии разработки технологии выбор технологических режимов на И оборудования, определить возможность изготовления деталей.

3. На основе компьютерного моделирования процесса холодной угловой раскатки деталей с фланцами с использованием критерия разрушения Кокрофта-Латама установлены благоприятные схемы течения металла и изменения напряженно-деформированного состояния на всех стадиях раскатки, не приводящие к разрушению заготовок.

4. Разработаны методики и экспериментальный стенд, позволяющие выполнить физико-механический анализ образования трещин на всех стадиях процесса угловой раскатки деталей с фланцами; построить статистические модели параметров процессов; оценить адекватность компьютерных моделей, влияние технологических параметров, геометрических размеров заготовки и инструмента, степени деформации на кинематику течения материала, напряженное и деформированное состояния заготовки, силовые режимы И предельные возможности формоизменения. Экспериментальный стенд защищен патентом на полезную модель RU 116079 U1. Установлены величины остаточных напряжений в изготовленных деталях, используя стандартное оборудование.

5. Разработаны и реализованы в промышленном производстве технологии изготовления типовых деталей с фланцами на срединной части, проектируемые с применением научно обоснованных в диссертации методик расчета и рекомендаций. Новая технология увеличила производительность труда в 2,0 – 2,5 раза и коэффициент использования металла в 1,5 – 2,0 раза, снизила приведенные затраты на продукцию в 1,5 – 2,0 раза.

## Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Востров В.Н. Исследование методом дифракции рентгеновских лучей остаточных напряжений в деталях с раскатанным фланцем из сплава Л63 [Текст] / В.Н. Востров, Н.А. Яблокова, П.В. Кононов / Металлообработка. 2012. 4(70). – С. 38-42.

2. Востров В.Н. Исследование остаточных напряжений в раскатанных деталях методом дифракции рентгеновских лучей [Текст] / В.Н. Востров, Н.А. Яблокова, П.В. Кононов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. 1(166). – С. 223-230.

3. Кононов П.В. Моделирование процесса угловой раскатки конуса на торце трубчатой заготовки [Текст] / П.В. Кононов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. № 2 (195). – С. 117-120.

4. Востров В.Н. Деформируемость и условия разрушения заготовки при раскатке фланца [Текст] / В.Н. Востров, П.В. Кононов, В.В. Мишин и др. // Деформация и разрушение материалов. 2016. № 3 (195). – С. 20-25.

5. Kononov P.V. Application of atomic force microscopy for analysis of deformation conditions of machine components with brass flanges [Text] / P.V. Kononov, I.E. Kononova, D.Tz. Dimitrov., V.N. Vostrov // Journal of Materials Science and Technology. 2015. V. 23. No. 3. – P. 220-233.

6. Кононов П.В. Применение атомно–силовой микроскопии для анализа напряженного и деформированного состояния детали с фланцем из латуни [Текст] / П.В. Кононов, И.Е. Кононова, В.Н. Востров // Известия Санкт–Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. 2014. № 6. – С. 7-11.

7. Кононов П.В. Остаточные напряжения в деталях с раскатанными фланцами из сплавов Л63 и АК7 [Текст] / В.Н. Востров, П.В. Кононов И.Е. Кононова // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. № 8. – С. 20-28.

8. Кононов П.В. Исследование детали с фланцем из латуни методом атомносиловой микроскопии [Текст] / П.В. Кононов, В.Н. Востров, И.Е. Кононова // Молодой ученый. 2014. № 14 (73). – С. 51-54.

9. Кононов П.В. Моделирование формоизменения трубчатых заготовок в процессе холодной угловой раскатки [Текст] / П.В. Кононов, В.Н. Востров // Современное машиностроение. Наука и образование. 2014. – С. 593-600.

10. Кононов П.В. Конечно–элементное моделирование процесса раскатки фланца на трубчатой заготовке [Текст] / П.В. Кононов, В.Н. Востров // Молодой ученый. 2013. № 9. – С. 46-49.

11. Кононов П.В. Анализ текстуры заготовок с раскатанным фланцем методом дифракции рентгеновских лучей [Текст] / П.В. Кононов, В.Н. Востров // Современное машиностроение. Наука и образование. 2013. – С. 852–857.

12. Кононов П.В. Формообразование фланцев деформированием на образующей части трубчатых заготовок [Текст] / П.В. Кононов, В.Н. Востров // Современное машиностроение. Наука и образование. 2012. – С. 391-396.

13. Востров В.Н., Кононов П.В. Устройство для раскатки буртов на трубных заготовках. Патент на полезную модель *RU* 116079 *U*1. Дата подачи заявки 07.12.2011. Заявка № 2011149805. Опубликовано: 20.05.2012. Бюл. № 14.

14. Востров В.Н., Кононов П.В. Способ раскатки фланцев трубчатых заготовок / Патент на способ *RUS* 2499648. Дата подачи заявки 25.06.2012. Заявка № 2012126429. Опубликовано: 27.11.2013. Бюл. № 33.