



п. 20а – «...переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта»



Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Mechanical Engineering Research Institute named A. A. Blagonravov  
of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN)

Department «Mechanics of Machines and Control over Machine»  
Laboratory Control of technological processes and systems

*Afonin V. L., Gavrilina L. V., Ibragimov A.R., Kondrat'ev I. M., Morozov S.V.,  
Rakov D. L., Smolentsev A. N., Sukhorukov R.Yu., Shitov A. M.*

**RESEARCH AND DEVELOPMENT  
OF INNOVATIVE TECHNOLOGICAL PROCESSES  
AND INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS  
FOR THE MANUFACTURE OF GAS-TURBINE ENGINE (GTE) PARTS**

Under Edition Ph.D. Sukhorukov R. Yu.

Moscow  
2019

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации (Минобрнауки России)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук  
(ИМАШ РАН)

Отдел «Механика машин и управление машинами»  
Лаборатория управления технологическими процессами и системами

*Афонин В.Л., Гаврилина Л.В., Ибрагимов А.Р., Кондратьев И.М., Морозов С.В.,  
Раков Д.Л., Смоленцев А.Н., Сухоруков Р.Ю., Шитов А.М.*

**ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА  
ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
(ГТД)**

Под редакцией к.т.н. Сухорукова Р.Ю.

Москва  
2019

УДК 621.7, 621.923

ББК 34.5

**Афонин В.Л., Гаврилина Л.В., Ибрагимов А.Р., Кондратьев И.М., Морозов С.В., Раков Д.Л., Смоленцев А.Н., Сухоруков Р.Ю., Шитов А.М.** Исследования и разработка инновационных технологических процессов и интеллектуальных систем управления для изготовления деталей газотурбинных двигателей (ГТД). – Москва: ИМАШ РАН, 2019. – 137 с.

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание производственных интеллектуальных технологий формообразования деталей ГТД из жаропрочных сплавов методом раскатки в изотермических условиях.

Показана возможность «управления» структурообразованием материала заготовки при формообразовании в сверхпластических условиях на разработанных станах за счет выбора оптимальных режимов температуры, величины и скорости деформации в процессе раскатки, т.е. получение однородной (или регламентированной) УМЗ структуры, обеспечивающей повышение механических свойств материала на 10–15%.

Рассмотрены особенности технологического процесса финишной обработки лопаток ГТД, дана методология разработки интеллектуальных систем управления робототехническими комплексами обработки сложнопрофильных поверхностей этих деталей.

Даны примеры использования структурного синтеза и систем диагностики при проектировании новых технологических процессов.

Предназначена для инженеров-технологов предприятий, научных работников, разрабатывающих новые технологии, оборудование, инструмент и оснастку для изготовления деталей из жаропрочных сплавов для ГТД и наземных установок.

Полезна для магистрантов, аспирантов и студентов металлургических и машиностроительных специальностей.

**ISBN 978–5–904282–07–3**

**Afonin V.L., Gavrilina L.V., Ibragimov A.R., Kondratyev I.M., Morozov S.V., Rakov D.L., Smolentsev A.N., Sukhorukov R.Yu., Shitov A.M.** Research and development of innovative technological processes and intelligent control systems for the manufacture of gas-turbine engine (GTE) parts. Moscow: IMASH RAN, 2019. – 137 p.

The results of theoretical and experimental research aimed to develop new intelligent technologies in metal forming for industrial manufacturing of gas turbine components made of high temperature alloys by isothermal roll forging technique are presented.

It is shown a possibility of “managing” the metal structure in superplastic forming performed on self-developed equipment by choosing an optimal temperature conditions, deformation value and rate for roll forging process; this means a generation of homogeneous (or regulated) ultrafine grain structure that provides an increasing of mechanical properties of metal by 1015%.

The features of the GTE blade finishing technology are treated; a development methodology of the intelligent control system to manage a robotized machinery for free-form surface machining is given.

The examples of usage of the structural synthesis and the diagnostics systems for a development of the new technological processes are considered.

It is intended for manufacturing engineers and researchers who develop new technologies, equipment and tools to produce GTE and terrestrial facilities components from high temperature alloys.

It is useful for the Students of the Magister Program and Post-graduate students in metallurgical and machine building engineering.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	6
1. Автоматизированное оборудование для формообразования деталей ГТД из жаропрочных сплавов методом раскатки в изотермических и сверхпластических условиях ( <i>к.т.н. Сухоруков Р.Ю., Гаврилина Л.В., Ибрагимов А.Р., Морозов С.В.</i> ) .....	9
1.1. Экспериментальный образец стана для раскатки дисков (СРЖД-800) из титановых и никелевых сплавов .....	11
1.2. Модернизированный промышленный образец стана АЛРД-800 для раскатки дисков из жаропрочных сплавов .....	13
1.3. Экспериментальный стан для раскатки полых валов диаметром до 400 мм, длиной до 500 мм (СРВ) из жаропрочных сплавов из штампованных и листовых заготовок .....	20
1.4. Конструктивно-технологические особенности станов для формообразования деталей ГТД методом раскатки .....	24
1.5. Методы расчета основных силовых параметров раскатного стана для формообразования осесимметричных деталей .....	26
1.6. Исследование влияния температуры нагрева на основные узлы стана в процессе раскатки .....	31
2. Теоретические исследования создания инновационных технологических процессов изготовления осесимметричных деталей ГТД из жаропрочных сплавов и сталей в изотермических и сверхпластических условиях ( <i>к.т.н. Сухоруков Р.Ю.</i> ) .....	37
2.1. Теоретическое обоснование эффективности формообразования осесимметричных деталей из жаропрочных сплавов в условиях сверхпластической деформации .....	37
2.2. Математическое моделирование процесса формообразования дисков .....	40
2.3. Математическое моделирование процесса формообразования полых валов .....	44
2.4. Физическое моделирование процесса формообразования полых валов .....	48
2.5. Технология и образцы деталей, изготовленных из промышленных сплавов раскаткой в сверхпластических условиях на стане СРВ .....	49
3. Интеллектуальные системы управления робототехническими комплексами финишной обработки сложнопрофильных изделий ГТД ( <i>д.т.н., проф. Афонин В.Л., к.т.н. Смоленцев А.Н.</i> ) .....	54
3.1. Особенности технологического процесса обработки пера лопаток ГТД .....	54
3.2. Интеллектуальная экспертная система, основанная на правилах для управления технологическими комплексами финишной обработки пера лопаток ГТД .....	56
3.3. Вейвлет-преобразования в системах распознавания и управления .....	60
3.4. Позиционно - силовое управление шестикоординатным промышленным роботом при обработке сложных поверхностей .....	62
3.5. Анализ и синтез динамических характеристик робота-станка, построенного на основе вращательно-линейных модулей .....	65
3.5.1. Вращательно - линейный модуль .....	65
3.5.2. Робот-станок на основе вращательно-линейных мехатронных модулей .....	66
4. Исследования и разработка методов и средств диагностики автоматизированного технологического оборудования и металлорежущих станков с ЧПУ ( <i>к.т.н. Шитов А.М., к.т.н. Кондратьев И.М.</i> ) .....	67
4.1. Методы измерения и контроля параметров шпиндельных узлов .....	70
4.2. Устройство оперативной вибродиагностики станков ВК-1И .....	76
5. Применение структурного анализа и синтеза для выбора и обоснования технических и технологических решений, разрабатываемых инновационных технологий ( <i>к.т.н. Раков Д.Л.</i> ) .....	78
Заключение .....	81
Литература .....	81

## ВВЕДЕНИЕ

В лаборатории управления технологическими процессами и системами ИМАШ РАН в период с 2013 по 2018 гг. выполнен комплекс НИОКР<sup>1</sup> по разработке и созданию инновационных технологических процессов формообразования ответственных деталей ГТД (дисков, полых валов) из жаропрочных сплавов методом раскатки в изотермических условиях, а также финишной обработки сложнопрофильных поверхностей деталей (лопатки и др.) ГТД на основе роботизированных систем.

Разработаны научные основы создания новых технологических процессов (оборудования и систем управления):

- математическое моделирование деформационно-термического процесса, обеспечивающего формирование однородной ультрамелкозернистой структуры в заготовках из жаропрочных сплавов для реализации процесса раскатки;
- методы расчета кинетических, энергосиловых, термомеханических параметров специального оборудования — станов для раскатки осесимметричных деталей ГТД в изотермических условиях;
- математическое моделирование процесса раскатки дисков, полых валов, напряженно-деформированного состояния материала заготовки и инструмента с учетом влияния параметров процесса формообразования на структуру и свойства полученных деталей, а также влияния температуры на жесткость инструмента с применением программных комплексов DEFORM-3D, ANSYS, MATLAB (разработка специальных пользовательских программ);
- физическое моделирование процесса формообразования деталей с использованием модельного сплава: от выбора оптимальных размеров и геометрии заготовки до отработки режимов раскатки, а также определение траектории, скорости перемещения и подачи инструмента;
- методы исследования влияния параметров (осевого и радиального усилия раскатки, температуры в рабочей печи, скорости подачи инструмента и вращения заготовки) на структуру и механические свойства материала;
- методики и средства исследовательских испытаний раскатных станов и их основных узлов;
- методы проектирования систем управления автоматизированным технологическим оборудованием (структурные схемы, алгоритмы и программное обеспечение) для управления технологическими процессами изотермической раскатки деталей, финишной обработки лопаток, а также систем для диагностирования автоматического оборудования и станков с ЧПУ (структурные схемы, алгоритмы и программное обеспечение).

---

1 НИОКР проводились в 2013-2018 гг. совместно с ИПСМ РАН г. Уфа в рамках ФЦП Минобрования, ФЦП Минпромторга, договоров с АО «ОДК» корпорация «Ростех», промышленными предприятиями АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» (АО «НПЦ Газотурбостроения «Салют», г. Москва, ПАО «Кузнецов», г. Самара), ООО «Савеловский станкостроительный завод» компания ООО «Группа Стан».

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Разработаны и изготовлены опытные образцы автоматизированного оборудования — станов (СРЖД-800 для раскатки дисков и СРВ для полых валов), проведены исследовательские испытания станов и отработка технологий на деталях из жаропрочных сплавов, в том числе АЛРД-800 (ИМАШ РАН принимал участие в разработке системы контроля режимов раскатки заготовок на промышленном образце стана АЛРД-800), подготовлены комплекты рабочей и эскизной документации на опытные образцы оборудования и оснастки, разработан (лабораторный) технологический регламент для изотермической раскатки деталей (полых валов), создана робототехническая экспериментальная установка для финишной обработки пера лопаток на базе робота КУКА, а также аппаратно-программный комплекс для диагностирования автоматизированного оборудования и станков с ЧПУ.

Конструкции станов для раскатки дисков, полых валов, способы формообразования осесимметричных деталей из жаропрочных сплавов в изотермических условиях, а также финишной обработки пера лопаток защищены патентами (правообладатель ИМАШ РАН).

Результаты теоретических исследований и расчетов конструкций были подтверждены при испытаниях созданных станов СРЖД-800, СРВ, АЛРД-800 и изготовлении образцов деталей из промышленных жаропрочных сплавов.

НИОКР были проведены в кооперации с промышленными предприятиями АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» (АО «НПЦ Газотурбостроения «Салют» г. Москва, ПАО «Кузнецов» г. Самара), ООО «Савеловский станкостроительный завод» компания ООО «Группа Стан» г. Кимры, Тверская обл. и др.

В результате проведенных лабораторией НИОКР за 2013-2018 гг. выполнено 14 научно-исследовательских отчетов, опубликовано 5 монографий, более 60 научных статей, в т.ч. 22 в журналах Scopus и Web of Science, получено 11 патентов, защищены 2 кандидатские диссертационные работы, сделано 15 докладов на международных научных конференциях, получено 12 дипломов на международных выставках («Импортозамещение», «Металлообработка», «Технофорум» за период 2015-2018 гг.)

Реализация полученных результатов фундаментальных и прикладных исследований позволит создать конкурентоспособные производственные технологии изготовления деталей из жаропрочных сталей и сплавов в изотермических условиях, а также финишной обработки сложно-профильных деталей (лопаток).

НИОКР по созданию технологий и оборудования для изотермической раскатки ответственных деталей ГТД из жаропрочных сплавов были начаты и получили дальнейшее развитие в институте по инициативе и постоянной поддержке академика РАН Ганиева Р.Ф. (директор, научный руководитель ИМАШ РАН), а также участия и научно-методическом руководстве чл.-корр. АНБ, д.т.н., г.н.с. ИПСМ РАН, г.Уфа, Утяшева Ф.З., д.т.н. МЭИ Кошавцева Н.Ф.

*Заведующий лабораторией управления  
технологическими процессами и системами,  
к.т.н.*



*Сухоруков Р.Ю.*

# 1. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ РАСКАТКИ В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ И СВЕРХПЛАСТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Технологии, применяемые ведущими мировыми производителями авиадвигателей (Евросоюз, США), основаны на «гэторайзинг»-процессе (gatorizing process), который требует использования дорогостоящих горизонтальных прессов с усилием свыше 20 тыс. тонн для предварительной подготовки прутков с ультрамелкозернистой структурой, а также вакуум-штамповочных комплексов с такими же усилиями и дорогостоящие штампы из молибденовых сплавов для формообразования деталей ГТД.

Отечественные технологии (горячая штамповка литых сплавов, газостатическое прессование порошковых сплавов) включают многочисленные операции «нагрева-штамповки-мехобработки», и не позволяют получить однородную структуру и высокие прочностные характеристики, исключить пористость, а также имеют низкий КИМ.

Разработанная в рамках НИОКР технология и оборудование для формообразования деталей ГТД из жаропрочных сплавов методом раскатки в изотермических условиях устраняет указанные недостатки и имеет ряд преимуществ:

- обеспечение высокой степени однородности микроструктуры, что позволяет увеличить ресурс деталей из жаропрочных сплавов за счёт повышения (до 10÷15%) механических свойств материала;
- получить регламентированно изменяющуюся микроструктуру сплава полотна диска от ступицы до обода;
- снижение номинального припуска на механическую обработку до 2 мм, в зависимости от назначения и размеров деталей;
- повышение коэффициента использования металла (КИМ) в 3÷5 раз;
- возможность создания гибких перенастраиваемых автоматизированных комплексов за счет использования типовых технологических модулей универсального инструмента и исполнительных механизмов-модулей.

Технология и оборудование для изготовления деталей из жаропрочных сплавов методом раскатки в изотермических (сверхпластических) условиях запатентована в России и является приоритетом России (патент № 2254195, опубликовано 20.06.2005 г. Бюл. № 17 «Способ изготовления осесимметричных деталей», патент № 75164, опубликовано 27.07.2008 г. Бюл. № 21 «Стан изготовления осесимметричных деталей», патент № 2475327, опубликовано 20.02.2013 г. Бюл. № 16 «Способ раскатки дисков» — правообладатель АО «НПЦ Газотурбостроения «Салют», патент № 2567084, опубликовано 27.10.2015 г. Бюл. № 30 «Способ изготовления детали типа диска», патентообладатели ИМАШ РАН и ИПСМ РАН; патент № 2548349, опубликовано 20.04.2015 г. Бюл. №11 «Способ изготовления осесимметричных деталей типа дисков», патентообладатель ИМАШ РАН; патент № 146549, опубликовано 10.10.2014 г. Бюл. № 28 «Стан для раскатки осесимметричных деталей», патентообладатель ИМАШ РАН).

В результате проведения фундаментальных и прикладных научных исследований ИМАШ РАН, ИПСМ РАН г. Уфа, АО «ОДК», АО «НПЦ Газотурбостроения «Салют» разработаны и испытаны экспериментальные и промышленные образцы станков для изотермической раскатки дисков СРЖД-800, АЛРД-800, а также раскатки полых валов — СРВ. (ИМАШ РАН принимал участие в разработке системы контроля режимов раскатки линии АЛРД-800).

## 1.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ СТАНА ДЛЯ РАСКАТКИ ДИСКОВ (СРЖД-800) ИЗ ТИТАНОВЫХ И НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ<sup>2</sup>

Рис. 1. Общий вид стана СРЖД-800

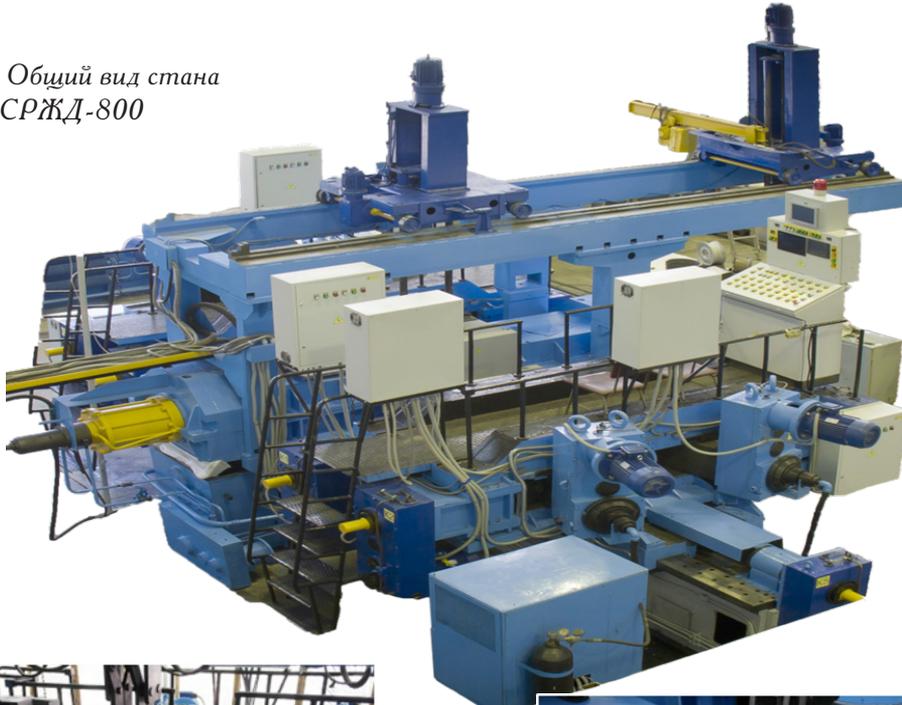


Рис. 2. Транспортировка заготовки манипулятором



Рис. 3. Установка заготовки в печь нагрева



Рис. 4. Раскатка заготовки в печи нагрева

2 Государственный контракт с Министерством промышленности и торговли РФ от 07 октября 2011 г. № 11411.1003704.05.028 на выполнение НИОКР «Разработка оборудования для формообразования деталей из жаропрочных сплавов на основе титана и никеля методами пластической деформации» Шифр «Пластика» в рамках Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» на 2007-2011 годы по подпрограмме «Развитие отечественного станкостроения и инструментальной промышленности» на 2011-2016 годы.

СРЖД-800 предназначен для изготовления экспериментальных образцов деталей ГТД из сплавов на основе титана и никеля, проведения исследований, испытаний и отработки режимов технологических процессов изготовления осесимметричных деталей типа дисков, колец, обечаек из различных жаропрочных сплавов в условиях сверхпластической деформации в ручном и автоматизированном режимах (рис. 1 - 4).

Разработан комплект рабочей и эксплуатационной документации на СРЖД-800, с литерой О1 [2, 7, 26].

### ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

№	Наименование характеристики	Значение
1	Суммарный крутящий момент на шпинделях, кНм	до 5
2	Скорость вращения шпинделей, об/мин	0,07 – 7
3	Крутящий момент на раскатном ролике, кНм	до 3
4	Скорость вращения раскатных роликов, об/мин	1-40
5	Осевое усилие раскатного ролика, кН	до 100
6	Радиальное усилие на раскатном ролике, кН	до 100
7	Угол поворота раскатной головки в плоскости раскатки, град.	30°
8	Макс. усилие зажима заготовки пинолями шпинделей, кН	до 230
9	Скорость внедрения ролика в тело заготовки, мм/мин	1,2 – 20
10	Температура раскатки, °С	500 – 1150
11	Макс. диаметр и толщина изготавливаемой детали, мм	800x180

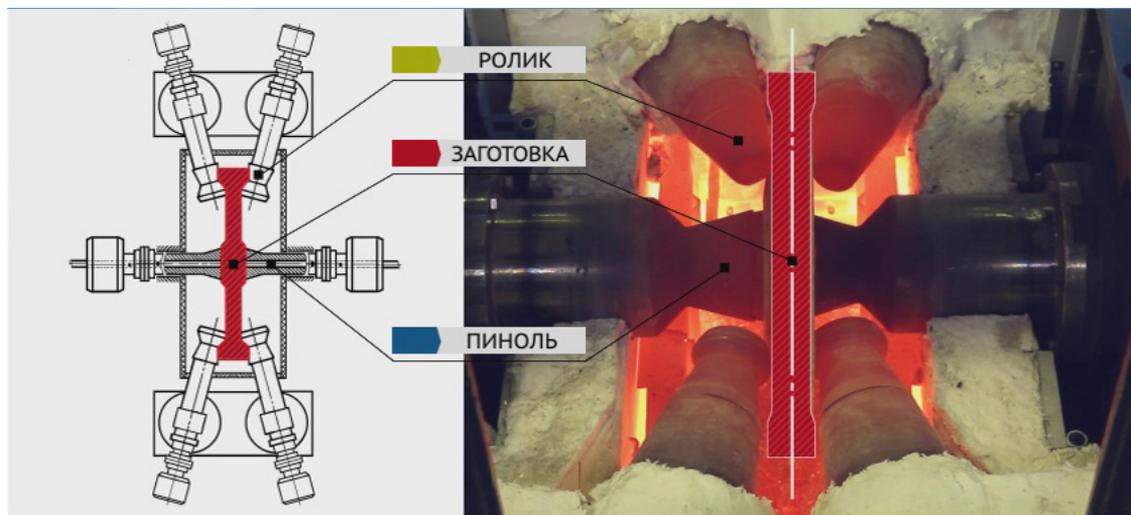


Рис. 5. Принципиальная схема раскатки дисков стана СРЖД-800

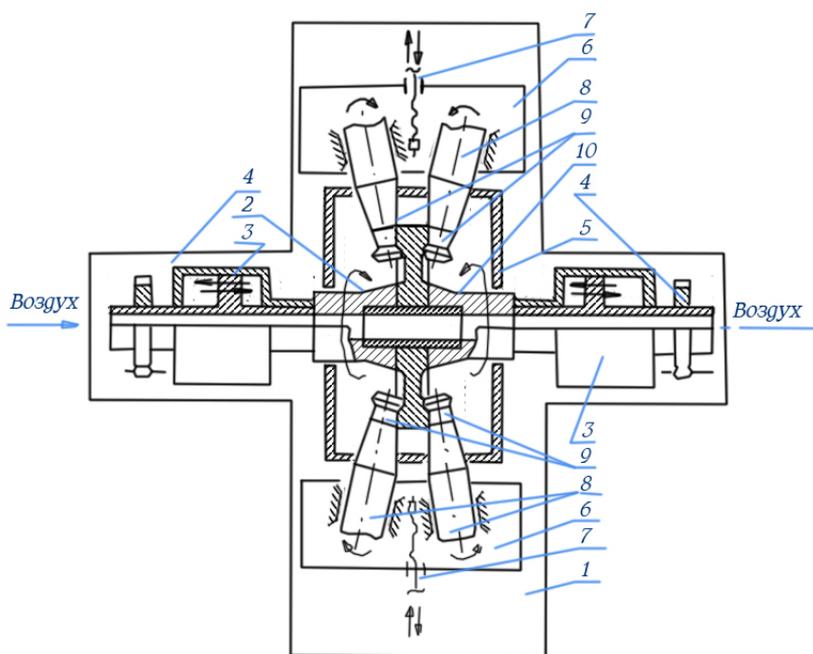


Рис. 6. Конструктивная схема стана

На рисунках 5, 6 условно приведены следующие обозначения: 1 — станина, 2 — пиноли, 3 — гидроцилиндры для зажима заготовки, 4 — левый и правый приводы вращения заготовки (показана лишь шестерня редуктора), 5 — камера нагрева (печь), 6 — передняя и задняя каретки, 7 — винтовые пары перемещения кареток, 8 — раскатные головки, 9 — инструментальные ролики. Раскатные головки с роликами укреплены на каретках, вращаются отдельным приводом и могут быть установлены винтовыми парами под определенным углом наклона к горизонтальной плоскости обрабатываемой детали. В шпинделях с пинолями и в раскатных головках предусмотрены каналы для подачи сжатого воздуха для охлаждения пинолей и инструмента.

#### Автоматизированная система управления (АСУ) стана СРЖД-800

АСУ обеспечивает перемещение кареток, роликов, вращение и подачу роликов, вращение шпинделей, установление и поддержание температуры в печи нагрева, контроль температуры подшипниковых опор, регулировку нагрузки на роликах, управление гидростанцией и механизмами перемещения пинолей, управление манипулятором вертикального и горизонтального привода крышки печи нагрева. Все операции отображаются в режиме реального времени в виде мнемосхем, графиков и численных значений на дисплее оператора (рис. 7).

АСУ позволяет выполнять оперативное программирование технологического процесса при автоматическом или ручном управлении, вычисление отклонения исполнительных органов на основании текущей информации о фактической нагрузке на роликах, температуре камеры нагрева с внесением в управляющую технологическую программу необходимых корректировок. АСУ обеспечивает автоматическую синхронизацию скоростей вращения шпинделей и роликов, формообразование детали по заданной программе при отображении на экране хода выполнения всех технологических операций и положения рабочих органов стана (дисплей оператора и технолога) (рис. 8, 9, 10).

## Система управления СРЖД-800 Блок-схема

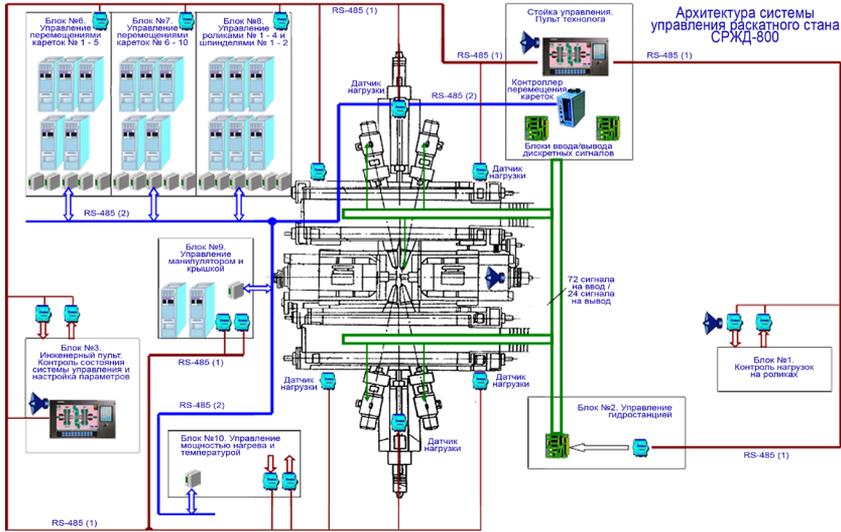


Рис. 7. АСУ СРЖД-800

АСУ выполнена в виде многоуровневой распределённой системы управления [26]:

- верхний уровень — контроллеры, управляющие ходом технологического процесса в целом и обеспечивающие человеко-машинный интерфейс.
- средний уровень — контроллеры, выполняющие в режиме online вычисления параметров скорости вращения роликов и шпинделей пинолей, а также синхронизацию их работы, корректировку скоростей перемещения раскатных головок в зависимости от изменения нагрузок на роликах.
- нижний уровень — PLC-контроллеры, управляющие скоростями вращения шпинделей пинолей и роликов, а также контроллеры, управляющие перемещением кареток с раскатными головками.

Программная реализация обмена данных производится посредством протокола обмена данных Modbus RTU.

Рис. 8. Дисплей технолога

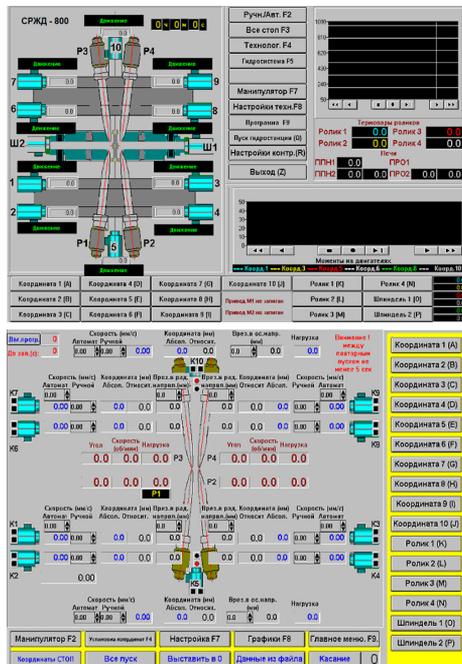


Рис. 9. Дисплей оператора



Рис. 10. Пульт управления с дисплеями технолога и оператора

## Примеры образцов (разрезы) раскатанных дисков на СРЖД-800



Рис. 11. Примеры раскатанных деталей на СРЖД-800 (материал ВТ6)



Рис. 12. Образцы диска (разрезы) с однородной структурой (материал ВТ6)



а)  $\times 100$



б)  $\times 1000$

Рис. 13. Микроструктура сплава ЭП742 в состоянии поставки (а) и после изотермической раскатки (б) при температуре  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\gamma + \gamma'$  - области)



Рис. 14. Макроструктура раскатанного диска из сплава ЭП742 при  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\gamma + \gamma'$  - области)

## 1.2. МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ОБРАЗЕЦ СТАНА АЛРД-800 ДЛЯ РАСКАТКИ ДИСКОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ [13, 27]

Стан АЛРД-800 предназначен для изготовления дисков диаметром до 800 мм из промышленных жаропрочных сплавов, отработки режимов технологического процесса раскатки дисков в производственных условиях, оценки работоспособности и надежности основных узлов, а также автоматизированной системы управления линией и системы контроля режимов раскатки (разработчик АО «НПЦ Газотурбостроения «Салют» — филиал НИИД) (рис. 15).

Преимущества АЛРД-800:

- обеспечение оптимальных усилий для реализации изотермической раскатки дисков из титановых и никелевых сплавов не менее 150 кН;
- повышение механических свойств материала деталей за счет высокой степени однородности структуры и последующей термообработки;

- повышение производительности в 2÷3 раза за счет реализации единого цикла процесса раскатки с применением рабочей печи, обеспечивающей температуру до 1200 °С с поддержанием ее в пределах  $\pm 5$  °С, и печи для предварительного нагрева и термообработки заготовки (3 камеры);
- повышение КИМ в 3÷5 раз за счет снижения трудоемкости механообработки заготовки;
- повышение надежности работы АЛРД-800 за счет применения отдельных гидравлических станций для основных узлов (кареток, роликов, пинолей);
- использование эффективной системы охлаждения пинолей, обеспечивающих зажим и вращение заготовки, а также охлаждения в подшипниковых опорах роликов-инструментов;
- наличие системы определения касания роликами заготовки по перемещению пинолей (гидравлическая схема позволяет в автоматическом режиме кроме точного позиционирования заготовки выполнять операцию ее обжатия);
- обеспечение мониторинга параметров раскатки и состояния основных узлов системой контроля режимов (СКР) в составе 14 датчиков.

### Автоматическая линия для раскатки дисков (АЛРД-800)



### ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

№	Наименование характеристики	Значение
1	Суммарный крутящий момент на шпинделях для вращения заготовки, кНм	до 30,0
2	Скорость вращения шпинделей, об/мин	0,05 – 4
3	Крутящий момент на раскатном ролике, кНм	до 5,0
4	Скорость вращения раскатных роликов, об/мин	0,1-8
5	Осевое усилие внедрения раскатного ролика в тело заготовки (вдоль от оси шпинделей), кН	до 150
6	Радиальное усилие на каждом наклонном ролике (перпендикулярно оси шпинделей), кН	до 150
7	Угол поворота раскатной головки в плоскости раскатки, град.	30°
8	Усилие зажима заготовки шпинделем, кН	до 400
9	Скорость внедрения ролика в тело заготовки, мм/мин	0,1-3
10	Температура раскатки, °С	500 – 1150
11	Макс. диаметр и толщина изготавливаемой детали, мм	800x180

Общий вид и основные узлы АЛРД-800 (рис. 16 - 22)



Рис. 16. Загрузка манипулятором разогретой до 1150 °С заготовки в рабочую печь

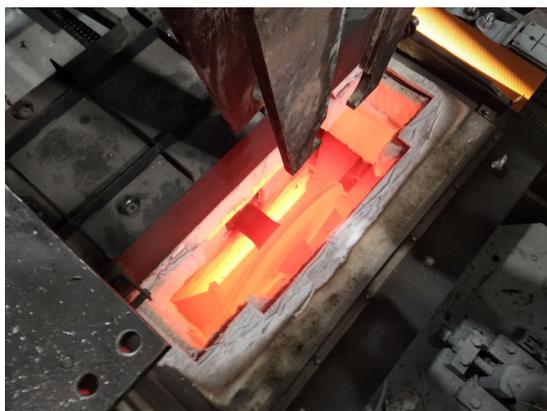


Рис. 17. Раскатка заготовки из титанового сплава ВТ9



Рис. 18. Выгрузка раскатанной заготовки из рабочей печи



Рис. 19. Транспортировка манипулятором раскатанной заготовки в камеру для термообработки



Рис. 20. Печь предварительного нагрева (3 камеры)



Рис. 21. Блок управления камерами предварительного нагрева и пульт управления линией



Рис. 22. Гидростанция управления пинолями зажима заготовки

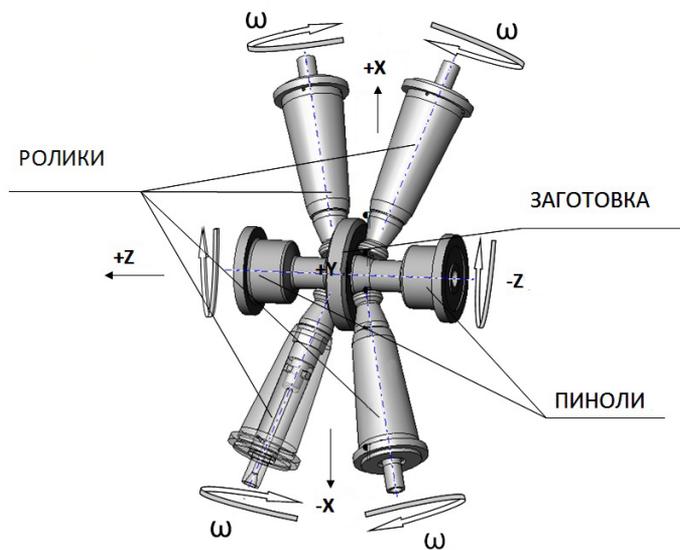


Рис. 23. Схема изотермической раскатки АЛРД-800

## Система управления АЛРД-800

Система управления является локально распределенной и состоит из подсистем.

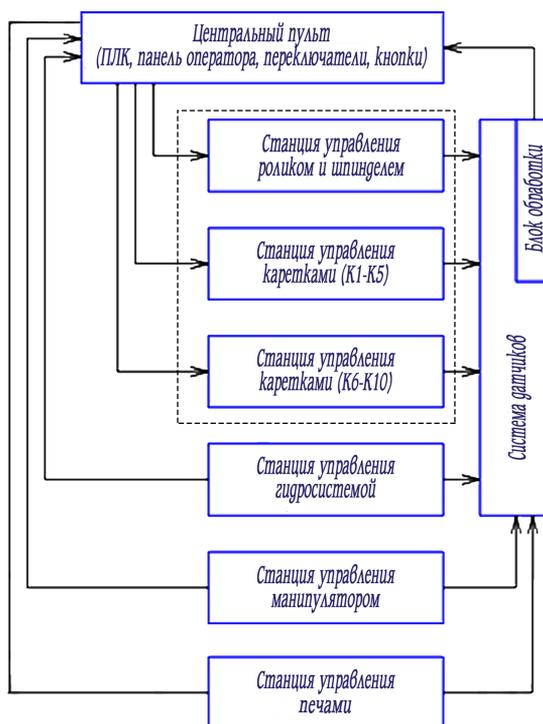


Рис. 24. Структура системы управления

### Станции управления:

- станция управления роликами и шпинделями позволяет осуществлять совместную работу раскатывающих роликов и поддерживающих изделие шпинделей по заданной технологической цепочке, соблюдая температурные и силовые режимы раскатки (рис. 23);
- две станции управления каретками обеспечивают выставление каретки на заданные углы и необходимую для технологического процесса синхронность движения кареток;
- станция управления обеспечивает позиционирование плавающих шпинделей, осуществляет процесс поджима заготовок с фиксированным усилием, а также поджим роликов для раскатки дисков;
- станция управления манипулятором обеспечивает загрузку-выгрузку изделия в/из зону нагрева, обработки, охлаждения и также предоставляет информацию компьютеру центрального пульта;
- станция управления печами нагрева: рабочей печью, обеспечивающей нагрев до  $1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и печью с 3-мя камерами предварительного нагрева и термообработки.

Система управления обеспечивает контроль и автоматическое поддержание следующих параметров (рис. 24):

- температуры заготовки на всех стадиях, с момента начала ее установки в печь и до ее удаления с точностью  $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в диапазоне от  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $1140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- времени выполнения каждой операции и полного технологического цикла;
- величины перемещений, подачи инструмента (с точностью  $\pm 0,5\%$ );
- скорости вращения заготовки (с точностью  $\pm 1\%$ ) в диапазоне от 0,05 до 4 об/мин;
- скорости вращения каждого из 4-х инструментальных роликов (с точностью  $\pm 0,1\%$ ) в диапазоне от 0,1 до 8 об/мин;
- усилия зажима заготовки в пинолях до 400 кН (с точностью  $\pm 1\%$ ).

Кроме того система управления обеспечивает согласование в заданных пределах скоростей вращения роликов и заготовки (рассогласование не более  $\pm 1\%$ ).

Система управления обеспечивает одновременную работу силовых механизмов для реализации этапов технологического процесса: раскатки, транспортировки дисков, управления печами и накопителями, нагрева и охлаждения заготовок в печах предварительного нагрева и в печах регламентированного охлаждения.

### Система контроля режимов раскатки

Для обеспечения стабильности процесса раскатки разработана система контроля термомеханических и энергосиловых параметров. Предложены методы контроля параметров, средства контроля и схема их размещения на основных узлах линии АЛРД-800 (разработчик – ИМАШ РАН)<sup>3</sup> [27].

Схема оснащения стана средствами контроля (рис. 25)

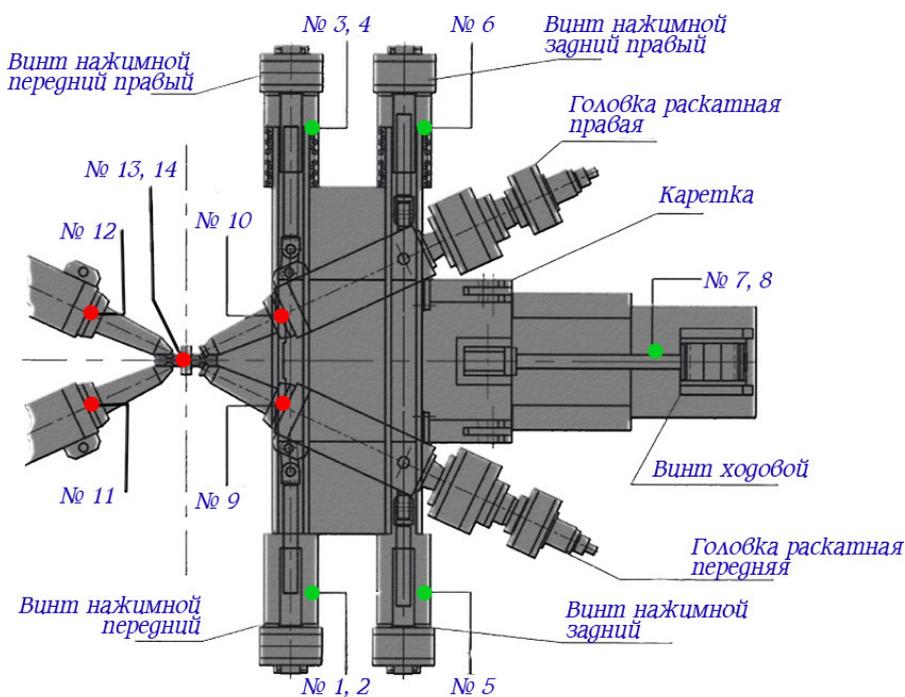


Рис. 25. Средства контроля стана

Перечень датчиков, передающих сигнал системе управления с исполнительных механизмов:

№1, 2, 3, 4 – датчики на узлах привода винтов нажимных передних опор правой и левой раскатных головок,

№5, 6 – датчики на узлах привода винтов нажимных задних опор правой и левой раскатных головок,

№7, 8 – датчики на кронштейнах, передающих силы от привода винта ходового на каретку,

№9, 10, 11, 12 – термопары в подшипниковых опорах раскатных головок,

№13, 14 – термопары в подшипниковых опорах шпинделей пинолей.

3 Федеральная целевая программа № 1, договор №1272и-102 от 02.08.2015г. между Заказчиком и Акционерным обществом «Объединённая двигателестроительная корпорация» (АО «ОДК») (далее – договор с АО «ОДК»), договор Шифр «Демонстратор-ПД-1-Салют-НИИД-ИМАШ» 2016 г.



*Рис. 26. Набор инструментальных роликов из жаропрочных сплавов*

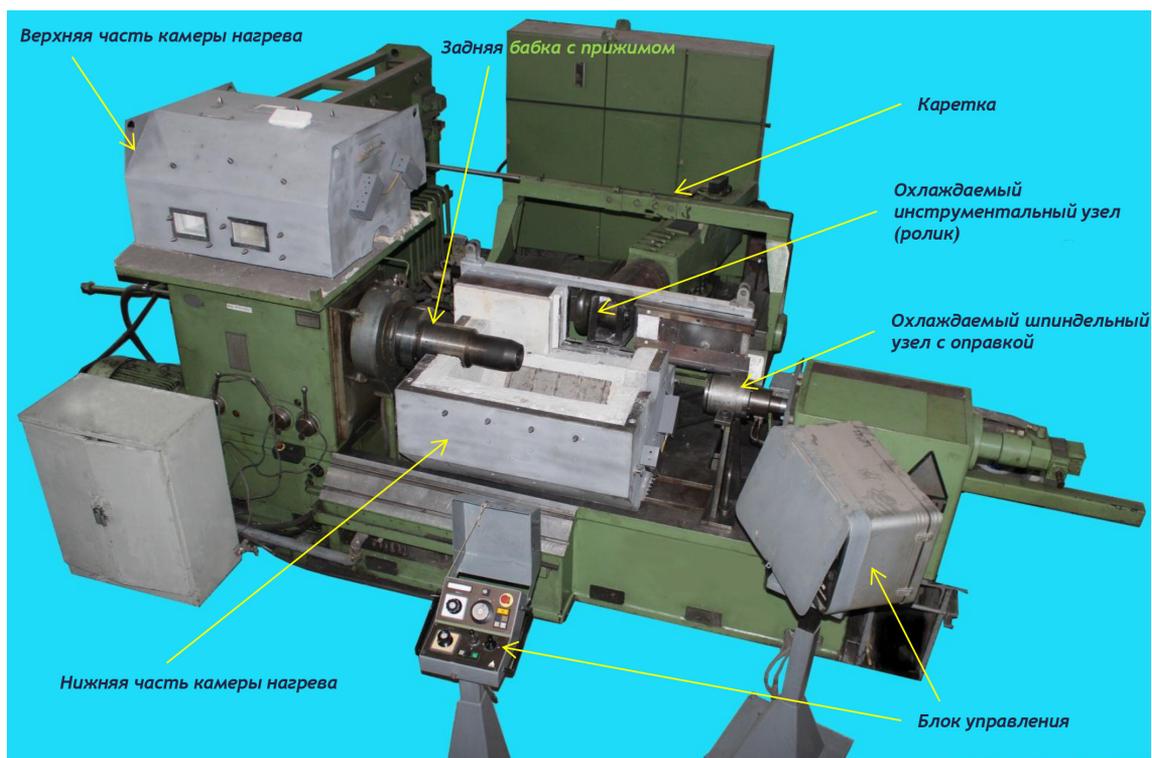
*Примеры заготовок и раскатанных на АЛРД-800 дисков из сплава ВТ9*



*Рис. 27. Исходная заготовка из сплава ВТ9  $\varnothing 400$  мм, толщина 60 мм*

*Рис. 28. Раскатанные диски  $\varnothing 800$  мм –  $\varnothing 850$  мм из сплава ВТ9*

### 1.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТАН ДЛЯ РАСКАТКИ ПОЛЫХ ВАЛОВ ДИАМЕТРОМ ДО 400 ММ, ДЛИНОЙ ДО 500 ММ (СРВ) ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ИЗ ШТАМПОВАННЫХ И ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК<sup>4</sup> [25]



*Загрузка заготовки*



*Раскатка конической части*



*Завершение раскатки*

*Рис. 29. Общий вид стана СРВ и основные узлы*

Стан СРВ создан на базе ротационно-вытяжного станка РНС-600 и предназначен для изготовления экспериментальных образцов полых валов, обечаек, диаметром до 400 мм и длиной до 500 мм, а также проведения исследований и отработки технологических режимов раскатки полых валов из жаропрочных сталей и сплавов как из листовых, так и из штампованных заготовок (рис. 29).

Разработаны комплект эскизной документации на стан СРВ и лабораторный регламент изготовления полых валов из жаропрочных сталей и сплавов (рис. 30-34) [26, 27].

<sup>4</sup> Соглашение Минобрнауки о предоставлении субсидии № 14.604.21.0091 от 08 июля 2014 , в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» по теме: «Разработка научных основ высокоэффективной технологии и оборудования для изготовления в условиях сверхпластичности широкой номенклатуры полых валов газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов и сталей (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60414X0091).

## Технические характеристики стана для раскатки полых валов (СРВ)

№	Технические характеристики	Значение
1	Размеры изготавливаемой детали, мм <ul style="list-style-type: none"> <li>• наибольший диаметр</li> <li>• наибольшая длина</li> </ul>	до 400 до 500
2	Усилие на ролике, кНм <ul style="list-style-type: none"> <li>• осевое</li> <li>• радиальное</li> </ul>	100 80
3	Количество давящих роликов	1
4	Скорость перемещения каретки, мм/мин <ul style="list-style-type: none"> <li>• в продольном направлении</li> <li>• в поперечном направлении</li> </ul>	1 – 40 1 – 40
5	Скорость вращения шпинделя, об/мин	1 – 300
6	Крутящий момент на шпинделе, кНм	20
7	Температура раскатки	800 – 1150°C

### Основные узлы стана СРВ



Рис. 30. Печь нагрева с подвижной створкой для продольного перемещения инструментального узла



Рис. 31. Оправка



Рис. 32. Охлаждаемый шпиндельный узел



Рис. 33. Охлаждаемая кассета для ролика



Рис. 34. Инструментальный ролик

Изготовлена печь нагрева 13, которая состоит из двух секций — нижней и верхней, а также подвижной панели с окном для ввода в печь раскатного инструментального ролика. Подвижная панель имеет опорные ролики для обеспечения продольного перемещения синхронно с раскатным инструментальным роликом. В верхней секции печи имеются смотровые окна из кварца для наблюдения процесса раскатки. В обеих секциях предусмотрены отверстия для термопар. Нагрев печи осуществляется нагревателями, которые обеспечивают температуру в пределах от 200 до 1150 °С с точностью ±10%.

Инструментальный узел 6 включает раскатную головку с охлаждаемым роликом, изготовленным из сплава ЖС6У. Ролик формирует профиль и геометрические размеры раскатываемого вала. Верхний крестовый суппорт стана обеспечивает перемещение и поворот инструментального узла. Перемещение инструментального узла вдоль заготовки обеспечивается гидромотором продольной подачи. Основные детали инструментального узла охлаждаются сжатым воздухом.

Охлаждаемый шпиндельный узел 12 предназначен для закрепления заготовки и ее вращения. Заготовка зажимается опорным валом задней бабки 14. Шпиндельный узел разделен на холодную (в расположении коробки передач) и горячую зоны (в месте крепления заготовки). Горячая зона шпиндельного узла охлаждается сжатым воздухом. Раскатка валов производится на оправках, вставляемых в отверстие заготовки. Оправки изготавливаются из жаропрочных сплавов. В оправках предусмотрен канал системы охлаждения для подачи воздуха.

Раскатываемый вал укрепляется на шпинделе и фиксируется опорным валом задней бабки, установленной на станине. Между камерой нагрева и задней бабкой при длинном раскатываемом вале устанавливаются люнеты 15, обеспечивающие зажим невращающейся части цилиндра задней бабки. В задней бабке предусмотрен гидроцилиндр, обеспечивающий прижим оправки и заготовки.

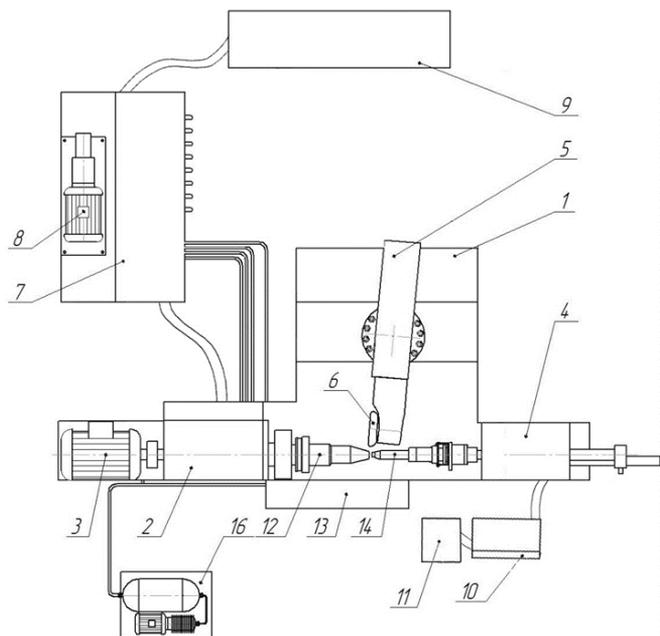
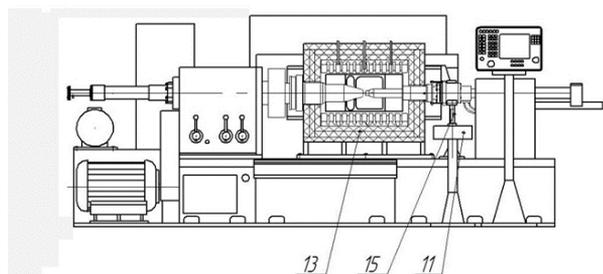


Рис. 35. Схема стана СРВ

- 1 — станина; 2 — коробка передач; 3 — электродвигатель с муфтой в сборе; 4 — задняя бабка в сборе; 5 — верхний суппорт; 6 — охлаждаемый инструментальный узел — головка раскатная с роликом; 7 — гидростанция; 8 — электродвигатель с гидронасосом в сборе; 9 — шкаф электропитания станка; 10 — система управления с блоком системы контроля режимов; 11 — пульт управления; 12 — охлаждаемый шпиндельный узел; 13 — печь нагрева; 14 — опорный вал задней бабки; 15 — люнет; 16 — компрессор.



## Система управления стана СРВ

Система управления стана СРВ обеспечивает управление основными узлами (гидросистемой, установлением и поддержанием температуры печи нагрева с точностью  $\pm 10$  °С, перемещением каретки с роликом-инструментом, скоростью вращения охлаждаемого шпинделя, поперечной и продольной подачей ролика-инструмента, системой охлаждения ролика и шпинделя). В систему управления входят пульт управления и блок системы контроля режимов (СКР) (рис. 36 - 38).

Система контроля режимов (СКР) предназначена для мониторинга термомеханических и энергосиловых параметров процесса раскатки, заготовки вала, узлов крепления и обработки поперечной и продольной силы раскатки, положения ролика — инструмента, температуры в печи, в подшипниковых опорах ролика и шпиндельном узле [26, 27].



Рис. 36. Шкаф управления станом



Рис. 37. Блок системы контроля режимов (СКР)



Рис. 38. Блок управления режимом

## Полые валы, изготовленные из промышленных сплавов на стане СРВ

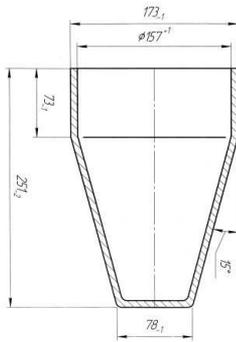


Рис. 39. Полый вал, раскатанный из листа сплава ЭИ962-Ш

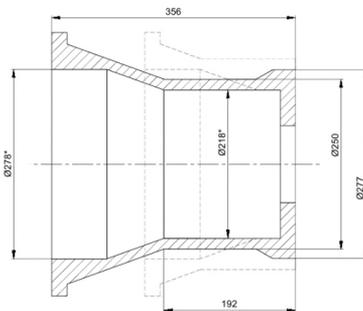


Рис. 40. Полый вал, раскатанный из штампованной заготовки сплава ЭК-79

#### 1.4. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТАНОВ ДЛЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД МЕТОДОМ РАСКАТКИ

Получение заданных термомеханических и энергосиловых параметров формообразования деталей методом раскатки в сверхпластических условиях определяется рядом основных конструктивно-технологических особенностей стана и техническими требованиями, предъявляемыми к конструкции стана и его основным узлам, выбором кинематической схемы.

- *Реализация условий сверхпластичности для жаропрочных сплавов в раскатных станах. Обеспечение равномерности распределения температуры в рабочей камере в зоне раскатки в условиях сверхпластичности.* В конструкции рабочей печи необходимо предусмотреть возможность точного измерения распределения температуры в зоне раскатки и объеме камеры, так как неравномерное распределение температуры влияет на качество получаемой детали. Так, равномерность температуры в различных сечениях деформируемого диска, во-первых, позволяет вести процесс формообразования методом раскатки в заданных силовых и скоростных режимах, во-вторых, способствует отсутствию термических напряжений в объеме диска. Поэтому требование к точности измерения не только величины температуры сверхпластичности в зоне раскатки и ее поддержание в заданном интервале, но и ее распределение по всему объему рабочей печи является важным фактором.

- *Проектирование рабочей камеры с учетом технологических и конструктивных решений для использования оптических приборов, ПЭС-матриц для мониторинга процесса формообразования.*

Рабочая печь для нагрева заготовки и поддержания заданной температуры (например, сверхпластичности), должна обеспечивать температуру во всем объеме печи, где находится заготовка, причем с точностью  $\pm 5$  °С. В конструкции печи должна быть предусмотрена возможность измерения (с помощью лазерного луча, ПЭС-матрицы и др. средствами) толщины заготовки диска, отклонения раскатной головки-инструмента, синхронности вращения заготовки и инструмента. Печь должна быть также оснащена термодатчиками для автономного регулирования температуры, датчиками контроля процесса раскатки, которые обеспечат взаимодействие с системой управления станом.

- *Компенсирование перемещений исполнительных механизмов, вызванных упругими деформациями конструкций раскатных головок, рабочих органов стана, погрешностями изготовления деталей и узлов, а также влиянием сил деформации и температуры в процессе формообразования.* В процессе раскатки конструкции раскатных головок подвергаются упругим деформациям в холодном и горячем состоянии при нагружении различными технологическими факторами, поэтому жесткость конструкции раскатных головок определяет величину максимального прогиба контактной поверхности роликов под действием максимальной силы в процессе раскатки дисков.

Консольно закрепленные ролики в процессе раскатки изгибаются и фактическое положение их рабочих поверхностей не совпадает с теоретическим (расчетным) положением (экспериментально подтверждено на несколько миллиметров).

Поэтому отклонения оси шпинделя раскатных головок, связанные с упругими деформациями, должны контролироваться и компенсироваться системой управления станом.

- *Использование эффективной системы охлаждения подшипниковых узлов шпинделей пинолей, раскатных головок в процессе раскатки.* При нагреве детали находящиеся в зоне раскатки подшипниковые узлы шпиндельных головок с переходниками для крепления роликов и шпинделей пинолей, фиксирующих заготовку диска, изменяют свои характеристики и размеры, что приводит к изменению фактического положения конструкций раскатных головок, а также заготовки относительно ролика-инструмента. Поэтому необходимо максимально

уменьшить влияние этих отклонений оси шпинделя раскатных головок с роликом-инструментом под воздействием температуры в условиях сверхпластичности за счет создания эффективной системы охлаждения силовых элементов роликов и шпинделей пинолей.

- *Необходимость разработки и использования новых материалов для ролика-инструмента раскатных головок с рабочей температурой до 1200 °С для формообразования заготовок из новых никелевых сплавов и интерметаллидов.*

При раскатке никелевых заготовок дисков рабочие части роликов и шпинделей пинолей должны быть на 100÷150 °С ниже температуры внутри печи. Вместе с тем необходимо учитывать, что чрезмерное охлаждение повышает стойкость роликов, но приводит к изменению структуры поверхностного слоя раскатываемой заготовки, а недостаточное охлаждение — снижает стойкость инструмента.

Таким образом, надежность передачи шпинделями поверхностей пинолей момента вращения требуемой величины диску должна обеспечиваться подстуживанием (охлаждением) ступицы заготовки воздухом.

- *Создание специальной многоуровневой и распределенной системы управления станом и основными узлами, оснащенной информационно-измерительными комплексами, оптическими, тензометрическими датчиками.* Особенностью процесса раскатки является необходимость оснащения стана силоизмерительными, оптоэлектронными устройствами, ПЗС-матрицами для регистрации и мониторинга температуры, перемещений узлов, сил, действующих на ролики-инструменты, шпиндели пинолей, каретки с раскатными головками непосредственно в процессе формирования заготовки в рабочей печи.

Кроме того эти устройства также необходимы для определения момента касания раскатных роликов с заготовкой, контроля положения инструмента-ролика относительно заготовки, а также контроля толщины диска в процессе раскатки. Толщина полотна диска должна контролироваться фактически в любой точке диска. Система управления для раскатных станов не может быть создана на базе традиционных устройств ЧПУ отечественного или импортного производства, а должна быть разработана для раскатных станов в виде специальной многоуровневой распределенной системы, обеспечивающей управление основными узлами стана и их взаимодействием, а также формообразование детали с получением однородной структуры с заданными механическими свойствами сплава.

- *Кинематическая схема стана должна быть оптимальной для реализации требуемых энергосиловых и термомеханических параметров и создавать необходимые условия сверхпластичности в процессе формообразования.* Обеспечение синхронизации вращения шпинделей пинолей, фиксирующих заготовку (диска) и вращения каждого ролика-инструмента, вращение винтовых пар, обеспечивающих наклон роликов, является важным для достижения равномерного распределения деформации на различных участках заготовки диска, т.е. гарантии получения однородности микроструктуры сплава. Одновременно поддержание заданной скорости деформации и ее мониторинг в процессе раскатки является важным фактором структурообразования материала. Эти факторы для процесса формообразования безусловно определяются кинематикой стана, т.е. выбором оптимальной схемы.

- *Универсальность инструмента-ролика. Выбор оптимальных геометрических размеров рабочих поверхностей.* Ролик-инструмент для станов является практически универсальным инструментом для раскатки широкой номенклатуры осесимметричных деталей.

Для создания универсальных инструментов для раскатки — роликов также используются жаропрочные сплавы (ЖСБУ). Конструктивные особенности роликов определяются выбором геометрии рабочей поверхности ролика-инструмента, углом конусности рабочей поверхности, обеспечивающих требуемый размер площади контактной поверхности и влияющих на усилия деформации при раскатке.

- *Блочно-модульная конструкция стана. Гибкие переналаживаемые комплексы с интеллектуальной системой управления.* Конструкции основных узлов стана для раскатки осесимметричных деталей должны быть выполнены в виде модулей: блок шпинделей зажима заготовки, печь нагрева с подвижными стенками, печи предварительного нагрева и термообработки, роликовая кассета со сменными роликовыми головками, каретки радиального перемещения и подачи ролика-инструмента, манипулятор загрузки-выгрузки заготовок, электронные блоки контроля параметров с набором датчиков измерения (температуры, перемещений узлов и измерения усилий), оптических информационно-измерительных блоков контроля и мониторинга параметров технологического процесса, в том числе геометрии раскатываемых заготовок во время процесса раскатки и т.д.)

Из таких модулей можно создавать гибкие переналаживаемые станы для изготовления конкретного класса деталей ГТД из жаропрочных сплавов в изотермических условиях.

### 1.5. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ РАСКАТНОГО СТАНА ДЛЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

В выполненных проектах проведен анализ различных конструктивных схем станов для формообразования в изотермических условиях дисков, полых валов, колец ГТД, рассмотрены примеры конструкций силовых механизмов разработанных станов СРЖД-800 и СРВ, даны методы расчета энергосиловых и термомеханических параметров для типовых схем станов и их основных силовых узлов [25, 26, 33, 38].

Макетирование отдельных узлов при проектировании, исследовательские испытания и эксплуатация станов СРЖД-800, АЛРД-800, СРВ при изготовлении опытных образцов осесимметричных деталей из жаропрочных сплавов в условиях сверхпластичности подтвердили эффективность и достоверность разработанных методов расчета энергосиловых и термомеханических параметров станов для формообразования деталей ГТД методом раскатки.

#### *Методика расчета основных силовых параметров стана СРЖД-800 (на примере опор каретки и конструкции ролика-инструмента)*

Определены аналитические зависимости, характеризующие взаимосвязи сил раскатки от реакций в опорах ролика — инструмента для различных конструктивных схем станов.

Для стана раскатки дисков СРЖД-800 получена система уравнений, определяющих соотношения сил раскатки  $F_y$  и  $F_z$ , зависящих от реакций в опорах ролика — инструмента  $R1_z, R2_y, R2_z$ .

Определение основных усилий механизма  $F_y$  и  $F_z$ , зависящих от силы давления металла на ролик  $P_{раск}$  сводится к задаче по определению сил-реакций в опорах ролика раскатного.

На рисунке 41 представлена схема для расчета реакций в

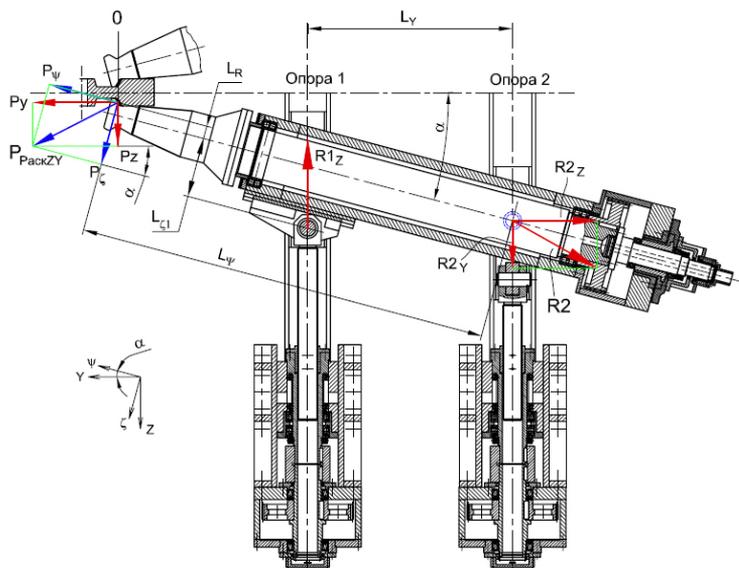


Рис. 41. Схема по определению реакций опор ролика раскатного

опорах 1 и 2 ролика раскатного. В опоре 1 имеет место только реакция  $R1_Z$ , направленная вдоль оси  $Z$ , поскольку корпус ролика раскатного устанавливается в составной опоре скольжения, где опора 1 свободно перемещается в направляющих по оси  $Z$ , в то же время корпус может перемещаться вдоль своей оси в опоре 1. В опоре 2 корпус ролика устанавливается на цапфах и может поворачиваться, меняя угол  $\alpha$ . При этом опоры 1 и 2 имеют винтовые приводы, обеспечивающие поступательное перемещение.

Система координат  $\psi, \zeta$  — повернута относительно  $Y, Z$  на угол  $\alpha$ .

$P_Y, P_Z, P_\psi, P_\zeta$  — проекции силы  $P_{\text{раск}}$  на соответствующие оси.

$R1_Z, R2_Y, R2_Z$  — проекции реакций в опорах 1 и 2.

Соотношение проекций сил раскатки в рассматриваемых системах координат:

$$P_Z = -P_\psi \cdot \sin(\alpha) + P_\zeta \cdot \cos(\alpha)$$

$$P_Y = P_\psi \cdot \cos(\alpha) + P_\zeta \cdot \sin(\alpha)$$

или:

$$P_\zeta = \frac{P_Y \cdot \sin \alpha + P_Z}{\sin^2 \alpha + \cos \alpha}$$

$$P_\psi = \frac{P_Z - P_Y \cdot \cos \alpha}{\cos^2 \alpha + \sin \alpha}$$

Система уравнений для определения реакций в опорах 1 и 2.

$$\begin{cases} R1_Z \cdot L_Y = P_\zeta \cdot L_\psi + P_\psi \cdot L_R \\ R2_Z = R1_Z - P_Z \\ P_Z = P_\zeta \cdot \sin(\alpha) - P_\psi \cdot \cos(\alpha) \end{cases}$$

При сопоставлении основных сил механизма, обеспечивающих раскатку и реакции в опорах 1 и 2 имеем следующие соотношения по определению основных усилий:

$$F_Y = R2_Y = 2 \cdot P_Y$$

$$F_Z = R1_Z \text{ или: } F_Z = \frac{P_\zeta \cdot L_\psi + P_\psi \cdot L_R}{L_Y}$$

При расчете сил  $F_Y$  и  $F_Z$ , обеспечивающих необходимое усилие раскатки рассмотренным выше методом, допускается, что механическая система ролика раскатного рассчитывается методами решения линейных задач статики, то есть, прогиб нагруженного силой раскатки конца ролика не учитывается.

### *Влияние упругих составляющих при расчете отклонения ролика-инструмента в процессе раскатки*

Под действием сил раскатки механическая система, обладающая упругими звеньями, приводит к смещению инструмента на расстояние  $\Delta_{\text{СМ}}$ . Схематично упругое отклонение ролика  $\Delta_{\text{СМ}}$  показано на рисунке.

Отклонение имеет две основных составляющих:

1. Отклонение  $\Delta_{\text{Опор}}$  — упругое смещение инструмента, вызванное податливостью винтовых тяг опор 1 и 2 ролика раскатного.

2. Отклонение  $\Delta_{\text{ШпР}}$  — упругое смещение инструмента, вызванное вследствие изгиба конца шпинделя ролика раскатного под действием силы раскатки  $P_{\text{раск}}$ .

$$\Delta_{\text{СМ}} = \Delta_{\text{Опор}} + \Delta_{\text{ШпР}}$$



где  $E = 2 \cdot 10^5$  – модуль продольной упругости,  
 $d_{2B}$  – диаметр по впадинам резьбы ходового винта,  
 $L_B$  – длина винта от соединения с соответствующей опорой до гайки.  
 Принимается:

$$Q_1 = R1_Z = F_Z, \quad Q_2 = R2_Z + \mu \cdot R2_Y,$$

где  $\mu$  – коэффициент трения скольжения в опоре 2 ( $\mu = 0,1$ ).

### Влияние нелинейности силового воздействия на ролик-инструмент

При разработке метода расчета по определению  $\Delta_{\text{ШпнР}}$  рассматривается справедливость допущения, что расчет может проводиться без учета влияния упругости шпинделя. То есть, определение отклонения инструмента возможно производить методами решения линейных задач статики. Кроме того, рассматривается влияние нагрева деталей раскатного ролика на величину отклонения инструмента.

В общем случае механическую систему ролика раскатного нагруженного силами раскатки можно представить в виде податливого стержня (рис.43). При решении подобных задач, рассматривается влияние изгиба стержня на угол  $\theta$  на вектор приложенной силы. С точки зрения упругой системы имеет место нелинейная задача статики, а сила  $P_{\text{Раск}}$  является *следящей* силой, поскольку ее вектор сохраняет положение относительно центральной оси податливого стержня в точке ее приложения и меняет свое положение относительно неподвижной системы координат. То есть вектор  $P_{\text{Раск}}$  при упругом прогибе стержня меняет положение относительно опоры стержня  $B$  на векторную величину  $\Delta P_{\text{Раск}}$  и плечо  $L_{PP}$ .

В общем виде при решении нелинейных задач статики рассматриваются векторные уравнения равновесия стержня, а при определении значений реакций в опорах и величины прогиба стержня используется метод последовательного приближения.

Проверка справедливости решения данной задачи линейным методом заключается в определении угла поворота сечения  $\theta$  конца стержня с учетом отклонения вектора  $P_{\text{Раск}}$ .

В первом приближении угол  $\theta^1$  с учетом увеличивающегося плеча  $L^1_{PP}$  определяется относительно этих значений в нулевом приближении ( $\theta^0$  и  $L^0_{PP}$ ). В нулевом приближении угол поворота сечения  $\theta^0$  составляет:

$$\theta^0 = \frac{1}{6} \cdot \frac{P_{\text{Раск}} \cdot L^0_{PP} \cdot L12}{E \cdot Jx}.$$

Плечо следящей силы в каждом приближении зависит от ее угла наклона  $\gamma$ .

$$L^0_{PP} = L_R \cdot \cos(\gamma) + L1 \cdot \sin(\gamma), \quad L^1_{PP} = L_R \cdot \cos(\gamma + \theta^0) + L1 \cdot \sin(\gamma + \theta^0).$$

В первом приближении угол поворота сечения  $\theta^1$  составляет:

$$\theta^1 = \frac{1}{6} \cdot \frac{P_{\text{Раск}} \cdot L^1_{PP} \cdot L12}{E \cdot Jx},$$

где осевой момент инерции сечения стержня  $Jx$  определяется в соответствии с сечением шпинделя ролика раскатного.

Соотношение отклонения конца стержня в нулевом и первом приближениях является показателем, определяющим необходимость решения нелинейной задачи при расчете системы нелинейным методом.

Расчет для ролика-инструмента показывает, что соотношение  $\theta^1/\theta^0 = 0,002$ . Таким образом, пренебрежение в расчете нелинейностью упругой системы приводит к ошибке в пределах

0,2%, что является допустимым. Проведение расчетов с учетом нелинейности статической системы значительно увеличивает трудоемкость расчетов.

Следовательно, допускаются расчеты методами решения линейных задач статики для нагруженных узлов стана раскатки дисков, таких как шпиндель раскатной головки, подвергающийся значительным усилиям и имеющий прогиб, приводящий к отклонению головки раскатной от первоначального положения.

#### Методика расчета силовых параметров раскатки цилиндрических участков полых валов

Для стана СРВ рассмотрены схемы взаимосвязи силы раскатки и реакции в опорах ролика-инструмента при формообразовании цилиндрических поверхностей заготовки, в аналитическом расчете не учитывалось влияние наплывов и протяженных внешних зон заготовки [25].

Схемы раскатки цилиндрического участка полого вала из листовой и штампованной заготовки показаны на рис. 44, 45.

Основные параметры расчета сил и момента, действующих при раскатке цилиндрической части:

- диаметр полый заготовки
- толщина стенки заготовки
- обжатие
- диаметр оправки
- диаметр цилиндрической части ролика
- величина осевой подачи за один оборот
- угол конуса ролика
- диаметр после раскатки наружный
- площадь контакта
- средняя ширина контакта
- площадь контакта
- давление металла на инструмент

$$\begin{aligned}
 & d_0 \\
 & t_0 \\
 & \Delta t \\
 & d_{\text{Опр}} \\
 & D_r \\
 & m_1 \\
 & \alpha \\
 & d_1 \\
 & A_k \\
 & b_c \\
 & A_k \\
 & P_{\text{ср}} = k \sigma_{\text{тп}} A_k
 \end{aligned}$$

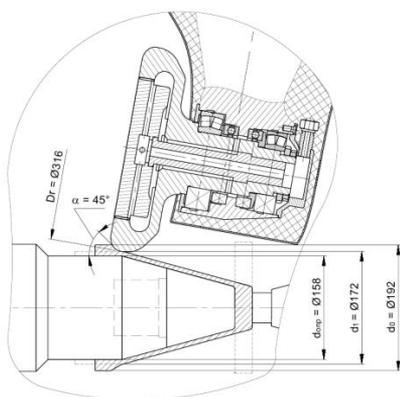


Рис. 44. Схема раскатки цилиндрической части полого вала из листовой заготовки

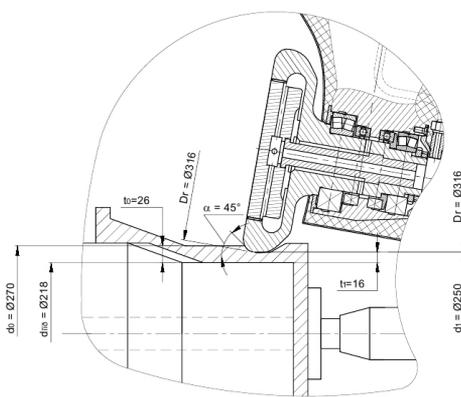


Рис. 45. Схема раскатки цилиндрической части полого вала из штампованной заготовки

В результате получены аналитические зависимости для расчета сил и момента раскатки для рассматриваемых схем.

Сила радиальная:

$$P_y = p_{cp} A_K$$

Сила окружная:

$$P_z = P_y \frac{0,5 b_c}{0,5 D_r - \Delta t}$$

Сила осевая:

$$P_x = \sqrt{P_y^2 + P_z^2} \operatorname{tg}(\alpha)$$

Общая сила раскатки:

$$P = \sqrt{P_y^2 + P_z^2 + P_x^2}$$

Плечо действия силы раскатки на шпиндель:

$$a_{\text{Шп}} = \frac{D_r + d_1}{2 D_r} b_c$$

Крутящий момент на шпинделе:

$$M_{\text{Шп}} = \frac{a_{\text{Шп}}}{1000} \sqrt{P_y^2 + P_z^2}$$

## 1.6. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА НА ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ СТАНА В ПРОЦЕССЕ РАСКАТКИ

Для изучения влияния распределения тепловых полей в рабочей камере нагрева и влияние температуры на функциональные характеристики основных узлов станков использован программный комплекс ANSYS.

### *Исследование влияния температуры нагрева на ролик раскатной для станков СРЖД-800, АЛРД-800*

Раскатка дисков производится преимущественно в горячем состоянии при температуре заготовки от 500 до 1050 °С, поэтому существенное влияние на величину отклонения инструмента  $\Delta_{\text{Шп}}^{\text{пр}}$  вследствие прогиба оказывает уменьшение жесткости деталей ролика, подвергаемых нагреву. Схема температурного воздействия на ролик раскатной представлена на рис. 46.

Количество теплоты, необходимое для поддержания заданной температуры заготовки отводится из замкнутого пространства печи через стенки самой печи и детали ролика раскатного.

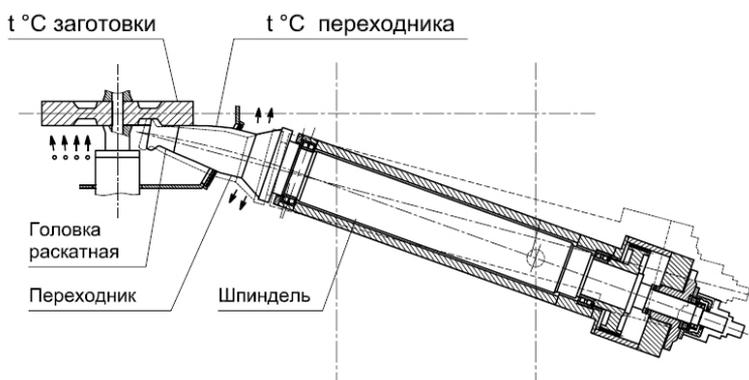


Рис. 46. Нагрев ролика-инструмента в процессе раскатки

Расчетные данные показывают, что температура переходника ролика-инструмента может достигать 700 °С внутри печи и до 400 °С снаружи, при раскатке диска при температуре 950 °С. На рис. 47 представлена схема распределения температурных полей.

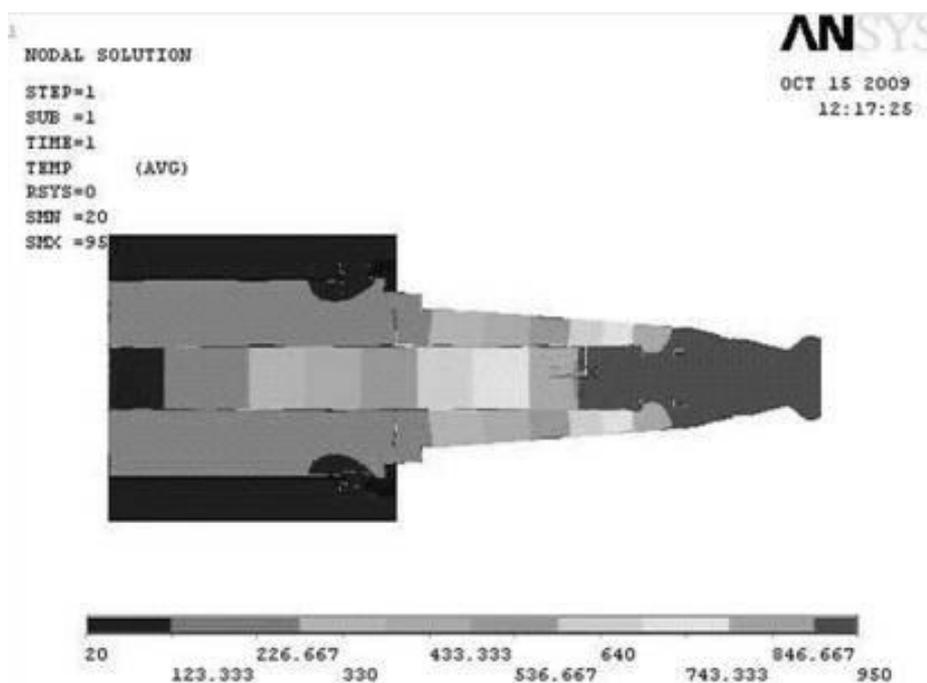


Рис. 47. Распределение температуры в конструкции раскатной головки

Принимается, что температура головки раскатной приблизительно равна температуре диска, температура шпинделя соответствует температуре окружающей среды внутри цеха, а температура переходника зависит от перепада температуры внутри печи и снаружи. Количество тепла, которое отдает переходник в цеховое пространство, зависит от его температуры, чем больше его температура, тем интенсивнее выделяется тепловая энергия.

Модуль упругости переходника при достижении температуры нагрева 600 °С уменьшается на 20%. При этом прогиб находится в обратно пропорциональной зависимости от величины модуля упругости, то есть при расчете  $\Delta_{\text{ШпП}}$  с учетом температуры нагрева величина прогиба может увеличиваться до 20%.

Таким образом, расчет деформаций и напряжений деталей ролика раскатного следует производить с учетом нагрева его деталей. Наиболее простой способ учета влияния температуры при расчете методом конечных элементов (МКЭ) — определение величины изменения модуля упругости материала переходника и раскатной головки в соответствии с температурой нагрева (рис. 47) [25].

*Исследования влияния температуры на основные узлы стана СРВ: раскатную головку, шпиндельный узел с оправкой, опорный вал задней бабки, а также распределение температурных полей в рабочей печи*

В качестве инструмента для определения распределения тепловых полей в камере нагрева и влияние температуры на основные узлы стана был выбран программный комплекс ANSYS, для определения распределения тепловых полей в рабочей камере нагрева и определения ее мощности был использован модуль Transient Thermal. Трехмерная модель построена в системе SolidWorks (рис. 48).

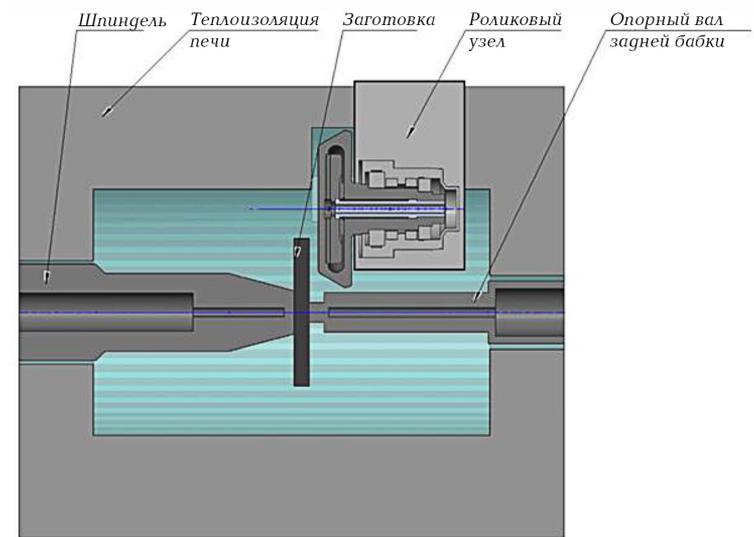


Рис. 48. Модель рабочей камеры нагрева

В результате получено поле распределения температуры в рабочей камере нагрева (рис. 49).

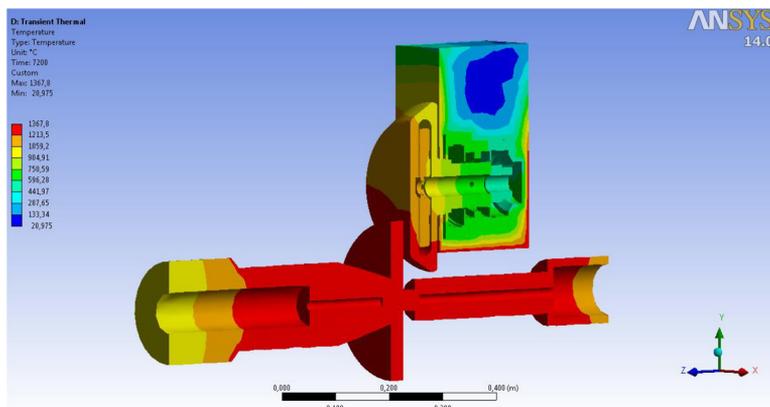


Рис. 49. Поле распределения температуры в рабочей камере нагрева непосредственно в процессе раскатки

Данный расчет позволил определить тепловые потоки на ролике, оправке и опорном вале задней бабки в процессе разогрева (рис. 50, 51, 52).

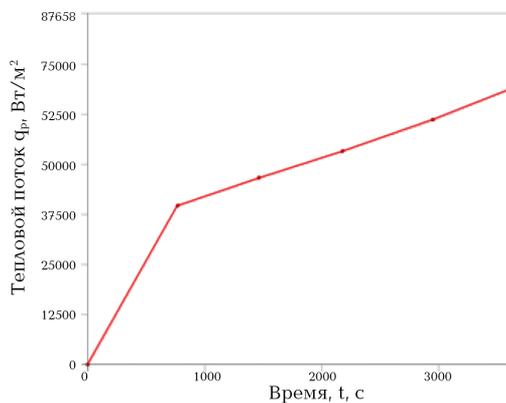


Рис. 50. Изменение теплового потока на ролике в процессе нагрева в печи

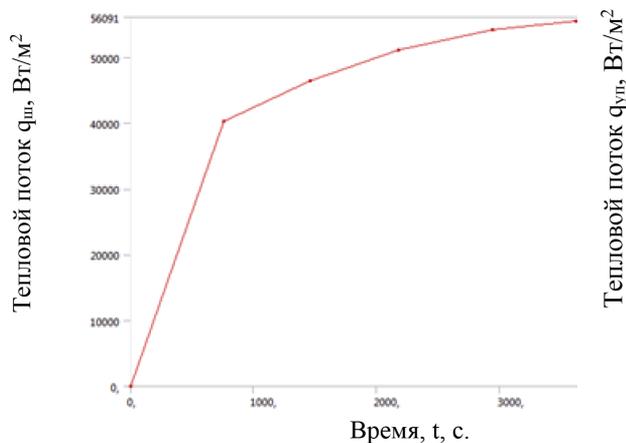


Рис. 51. Изменение теплового потока на оправке в процессе нагрева в печи

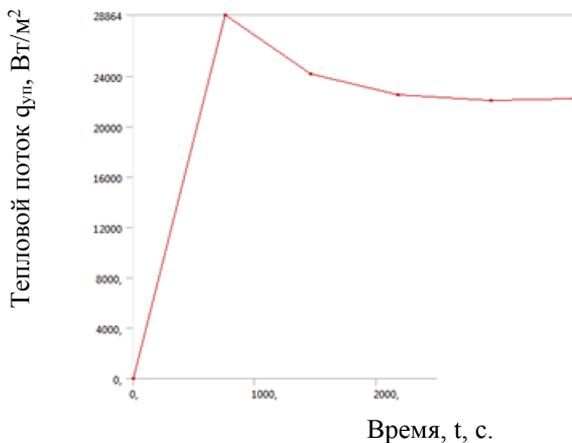


Рис. 52. Изменение теплового потока на опорном вале задней бабки в процессе нагрева в печи

Для определения распределения тепловых полей в роликовой головке был использован модуль CFX. Трехмерная модель построена в системе SolidWorks (рис. 53).

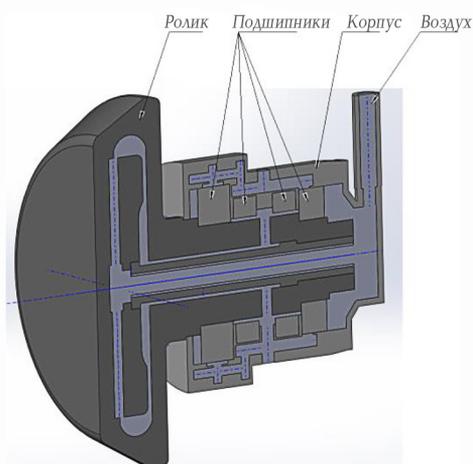


Рис. 53. Модель роликовой головки

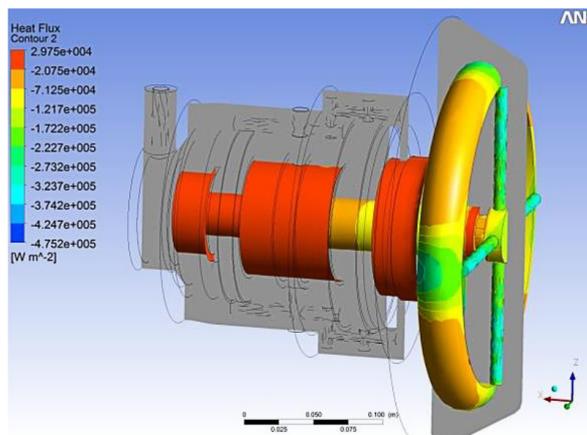


Рис. 54. Распределение теплового потока, уносимого охлаждающим воздухом

Проведенный расчет позволяет определить тепловой поток, уносимый охлаждающим воздухом из роликовой головки (рис. 54).

В результате моделирования можно определить, что если предварительно рассчитанной мощности рабочей камеры недостаточно для нагрева заготовки, то необходимо произвести дополнительные расчеты с увеличением мощности нагрева с шагом 1 кВт. Критерием прекращения итераций должно быть достижение температуры заготовки до температуры 1100 °С за 2 часа.

Моделирование позволяет также определить распределение температуры внутри рабочей камеры нагрева, что важно для реализации требуемых режимов процесса раскатки в условиях сверхпластичности [25].

Построенная модель распределения температур в камере нагрева позволяет оценить эффективность систем охлаждения роликовых головок, оправки и опорного вала задней бабки (рис. 55).

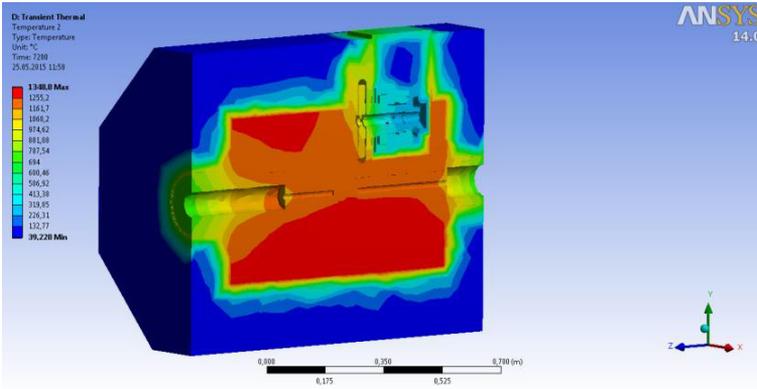


Рис. 55. Поле распределения температуры в камере нагрева

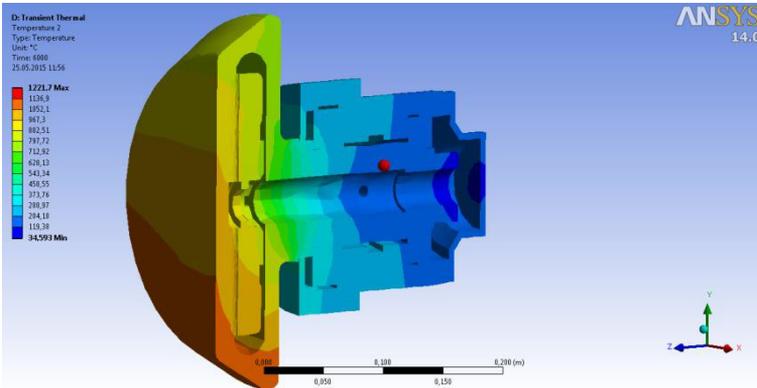


Рис. 56. Поле распределения температуры в роликовой головке

Результаты моделирования поля распределения температуры в роликовой головке (рис. 56) показывают, что наиболее опасным элементом, с точки зрения перегрева, является передняя опора роликовой головки.

Для стана СРВ расчеты показывают, что в процессе формообразования температура в передней опоре ролика не превышает  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течении 1,6 часа.

Результаты моделирования поля распределения температуры в оправке показывают, что на входе в подшипниковый узел температура снижается до  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , т.е. система охлаждения обеспечивает нормальную работу шпиндельного узла с оправкой (рис. 57).

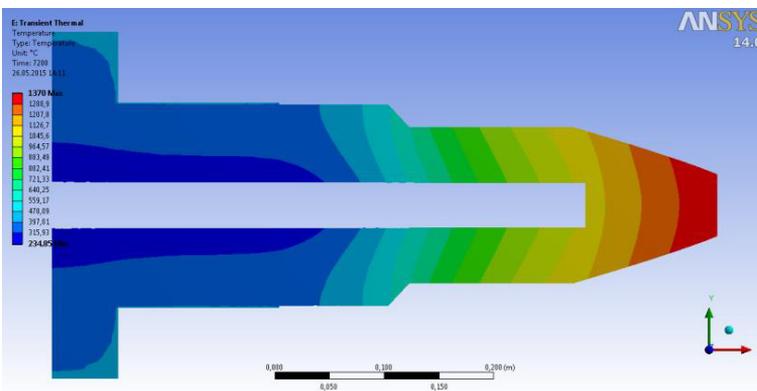


Рис. 57. Поле распределения температуры в оправке

Аналогичный вывод, подтверждающий эффективность системы охлаждения, можно сделать и по валу опорному (прижиму) задней бабки. Поле распределения температуры по опорному валу показано на рис. 58.

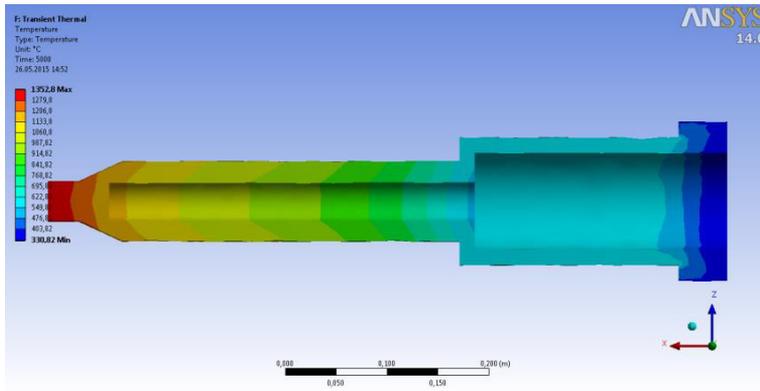


Рис. 58. Поле распределения температуры в вале опорном задней бабки

## Выводы

1. В стане СРВ система охлаждения инструментальной головки позволяет поддерживать температуру в подшипниковых узлах не выше  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течении 1,6 часа.
2. Температура наружной поверхности ролика достигает температуры заготовки за 1,6 часа, однако, с учетом вращения ролика и его охлаждения в верхней зоне, систему охлаждения можно считать работоспособной.
3. Система охлаждения подшипниковых узлов шпиндельного узла и вала опорного задней бабки обеспечивает температуру в подшипниках не выше  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Результаты моделирования позволяют определить оптимальную мощность рабочей печи нагрева, предельно допустимую температуру подшипниковых узлов раскатной головки, шпиндельного узла, опорного вала задней бабки, также оценить эффективность охлаждающей системы основных узлов стана и разработать рекомендации по совершенствованию конструкции стана в целом.

## **2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЗДАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ И СТАЛЕЙ В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ И СВЕРХПЛАСТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Характерной особенностью процесса изотермической раскатки является очаг деформации со сложным напряженно-деформированным состоянием. Компьютерное моделирование процесса связано с постановкой и решением задачи объемного напряженного деформированного состояния. Сложность решения задачи заключается в том, что в этом состоянии одновременно действуют смещающийся по спирали от центра заготовки к периферии локальный очаг деформации и ротационная составляющая деформации.

Для решения задачи изотермической раскатки выбраны программные комплексы DEFORM-3D<sup>5</sup> и ANSYS. Эти программные комплексы, основанные на методе конечных элементов (МКЭ), позволяют осуществить трехмерное моделирование процессов пластического деформирования заготовок из жаропрочных сплавов различной формы.

### **2.1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ [20]**

Наиболее эффективной технологией изготовления деталей из жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) является раскатка в условиях сверхпластичности. Под сверхпластичностью понимается способность материалов с микроструктурной структурой претерпевать пластические деформации при повышенных температурах и низких значениях напряжения и скорости деформации.

У жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) жаропрочность обеспечивается крупнозернистой структурой, а высокая механическая прочность при рабочих температурах для большинства деталей свойственна ультрамелкозернистой структуре. При этом, при относительно высоких температурах обеспечивается условие сверхпластичности, очень важное при изготовлении из таких сплавов деталей методом раскатки.

Раскатка дисков из жаропрочных сплавов в условиях сверхпластичности обуславливает существенное изменение структуры материала. Первоначально посредством деформационно-термической обработки в ЖНС изменяют состояние наноразмерных интерметаллидных частиц, укрупняя их до размеров 1000 нм и меняют их месторасположение от внутризеренного к межзеренному. При этом изменяют и тип межфазных границ, обеспечивая большие углы разориентировки между сходными кристаллографическими осями и плоскостями фаз. Одновременно до нескольких микрон измельчают зерна матрицы. ЖНС приобретает свойства, противоположные исходному состоянию — при температурах эксплуатации они становятся сверхпластичными и нежаропрочными. Сплавы приобретают низкое напряжение течения, что снижает требования по усилиям раскатки.

На следующем этапе производят формообразование дисков методом раскатки в условиях сверхпластичности, а в завершении процесса производят термообработку, в результате которой диски приобретают высокую прочность и жаропрочность. При этом укрупняются зерна матрицы, а частицы  $\gamma'$ - фазы уменьшаются до нанометров. Благодаря такой технологии в начале переходят от нетехнологичных жаропрочных свойств к технологичным,

5 Использование КПП «DEFORM-3D» разрешено в соответствии с «Сублицензионным договором NTES-107/20014-AS от 19 ноября 2014 г». Лицензия №8143.

сверхпластичным, а в конечном изделии восстанавливаются свойства жаропрочности.

Аналогичные преобразования осуществляют и для дисковых сплавов на основе титана.

Сплавы в мелкозернистом состоянии обладают широкими технологическими возможностями для обработки давлением, чем крупнозернистые. Для них можно выделить область низкотемпературной сверхпластической деформации (СПД), что позволяет снизить температурно-силовую нагрузку на инструмент и основные узлы оборудования. Расширенный температурно-скоростной интервал деформации мелкозернистых жаропрочных сплавов позволяет оптимизировать режимы обработки по производительности процесса обработки, энергопотреблению, стойкости инструмента, надежности оборудования.

Измельчение зерен в сплавах приводит к повышению однородности структуры. Однородность характеризуется неизменностью свойств материала в любом направлении и в пределах всего объема. Но для большинства процессов обработки давлением, включая и раскатку, характерно неравномерное распределение деформации, что связано с особенностями формообразования, исключающего возможности обеспечения одинаковых скоростей деформации, а также поддержания постоянной и одинаковой температуры в разных частях деформируемой заготовки. Все это может приводить к неоднородности материала детали и, как следствие, неоднородности свойств. Поэтому при раскатке необходимо обеспечивать однородность распределения деформации в различных участках заготовки.

Особенность СПД заключается в том, что она не приводит к изменению мелкозернистой структуры деформируемой матрицы, хотя при обработке возникает зернопроскальзывание. Структура деформированных в условиях СПД сплавов не зависит от степени деформации, а зависит лишь от скорости и температуры деформации. Следовательно, если температура и скорость деформации укладываются в режим СПД, структура сохраняется стабильно по размерам и формам зерен и с низкой плотностью дислокации [25, 26].

Необходимо отметить, что особенностью процесса раскатки является также неравномерное деформирование отдельных участков заготовки. В зоне ступицы материал диска не деформируется, в то же время в полотне диска деформация достигает  $200 \div 300\%$ , а в ободе —  $50 \div 100\%$ . При этом размеры зерен матрицы и интерметаллоидные фазы во всем объеме раскатного диска практически одинаковы. Кроме того, СПД обеспечивает выравнивание химического, фазового и зеренного строения материала даже при наличии таких неоднородностей в исходном материале.

Повышение однородности структуры при СПД обусловлено активизацией процесса дробления крупных зерен, фазовых превращений и диффузного перераспределения элементов материала.

При работе деталей в условиях меняющегося по величине и направлению нагружения, более целесообразно бестекстурное состояние материала, обеспечивающее изотропность механических свойств. Такое состояние материала формируется при использовании СПД, что связано с мелкозернистой структурой материала заготовок. Измельчение зерен в процессе подготовки микроструктурной структуры приводит к случайному распределению кристаллографических ориентировок в металле. А так как при СПД основным механизмом деформации является зернограничное проскальзывание, размывающее текстуры, то изделия, полученные с помощью СПД, отличаются высокой изотропностью механических свойств.

Наличие однородной микроструктурной структуры в деталях, изготовленных с помощью СПД и последующей термообработки, получение разнообразных механических свойств (включая и получение изделий с регламентированными свойствами) определяет изменение свойств ЖНС от жаропрочных к сверхпластичным и, наоборот, путем измельчения и укрупнения зерен матрицы. Измельчение зерен достигается деформацией,

а укрупнение термообработкой. В зависимости от условий эксплуатации деталей можно получать заданные механические свойства за счет формирования структуры с различным размером зерен.

При наличии в детали микроструктурной структуры и применения дифференцированной термообработки с помощью градиентного нагрева можно реализовать регламентированный рост зерен в различных частях детали. При этом формируется оптимальная для температурно-силовых условий эксплуатации структура в различных участках детали.

Исследования показали, что основным механизмом деформации, ответственным за СПД, является зернограничное проскальзывание. Для того, чтобы этот механизм стал доминирующим, необходимо создание вполне определенной структуры сплава — ультрамелкозернистой (размер зерна  $d < 10$  мкм) структуры с большеугловыми границами зерен или фаз общего типа.

Процесс раскатки дисков осуществляют в условиях сверхпластичности, что позволяет варьировать термомеханическими параметрами в локализованном очаге деформации и таким образом обеспечивать заданное структурообразование во всем объеме диска.

Существенной особенностью этого метода, отличающегося от других методов обработки металлов давлением, является то, что большая роль в структурообразовании в нем отводится ротационной (поворотной) моде деформации [20, 5].

Накопленная деформация вдоль траектории деформации будет равна:

$$e = \int_{d/2}^{D/2} \frac{dR}{R} + 2 \int_{2\pi}^{\varphi_i} \frac{d\varphi}{\varphi} = \ln \frac{D}{d} + 2 \ln n_k,$$

где  $\varphi_i$  — полный угол закрутки эвольвенты,  $\varphi_k = 2\pi n_k$ ,  $n_k$  — число оборотов заготовки при раскатке.

Первый интеграл в выражении учитывает вклад в степень деформации тензора деформации, а второй — вклад тензора поворота. Как уже отмечалось, при раскатке дисков диаметр заготовки увеличивается в  $1,5 \div 2$  раза, при этом заготовка совершает от 50 до 150 оборотов. Соответственно, степень формообразующей деформации, вычисленной по формуле, составит  $e \approx 0,4 \div 0,5$ , а по формуле, учитывающей поворотную компоненту (ротационную моду), на порядок больше —  $e \approx 4 \div 5$ .

Таким образом, формообразование методом раскатки в условиях сверхпластичности обеспечивает большую деформационную проработку материала заготовки в сравнении с прямым прессованием, применяемым на первом этапе «гэторайзинг» процесса. Благодаря большей деформации в диске при раскатке получается однородная по химическому, зеренному и фазовому строению УМЗ структура, что важно для получения при последующей термообработке высоких и изотропных механических свойств [4, 5].

Более прецизионный способ изготовления дисков заключается в формировании регламентировано изменяющейся по радиусу структуры, которая обеспечивает более высокий уровень свойств, чем однородная структура. Условия эксплуатации диска таковы, что его обод нагревается до температуры на  $250 \div 300^\circ\text{C}$  выше по сравнению со ступицей. В то же время в ступице создаются более высокие напряжения. Поэтому в ободе диска важна крупнозернистая структура, придающая материалу жаропрочность, а в ступице — мелкозернистая структура, обеспечивающая более высокую прочность. В средней части диска — в полоте — наиболее благоприятной является смешанная структура, известная как «ожерелье». Она отличается сочетанием вытянутых в радиальном направлении крупных зерен, разделенных между собой тонкими прослойками мелких зерен. Формирование по-

добной регламентировано изменяющейся структуры в диске - сложная задача, поскольку необходимо получить в диске не только разные типы структур, но и обеспечить монотонный переход между ними.

Поэтому, при формообразовании диска в его ступице следует поддерживать температуру, обеспечивающую стабильность исходной микродуплексной структуры, а в полотно и ободу — температуру, обеспечивающую заданную форму, текстуру и рост зерен.

Перспективной технологией изготовления осесимметричных деталей ГТД типа «диск» или полый вал является формообразование методом раскатки в изотермических (в т.ч. сверхпластических) условиях на специализированных раскатных станах, при проектировании которых необходимо обеспечить требуемые термомеханические и энергосиловые параметры. Для определения этих параметров эффективным методом является математическое моделирование.

## 2.2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДИСКОВ

В связи с тем, что изотермическая раскатка валов является медленно протекающим процессом, массовыми и инерционными силами, действующими на заготовку, можно пренебречь и для определения напряженно-деформированного состояния и характера течения металла в процессе раскатки целесообразно использовать математическое конечно-элементное моделирование на основе следующей системы уравнений, реализованной в программном комплексе для конечно-элементного анализа процессов пластического деформирования DEFORM-3D [13, 14, 15, 16]:

- дифференциальное уравнение равновесия, связывающее компоненты тензора напряжений, определяющего напряженное состояние тела:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = 0$$

где  $\sigma_{ij}$  — компоненты тензора напряжений,  $x_i$  — координата, в направлении которой переместилась площадка действия данной компоненты тензора напряжений.

- кинематическое уравнение, связывающее компоненты тензора скоростей деформаций и скоростей материальных точек тела:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$$

где  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  — компоненты тензора скоростей деформаций,  $v_i, v_j$  — проекция скорости движения материальной точки на соответствующую координатную ось.

- уравнение пластического течения Леви-Мизеса, связывающее напряженное и деформированное состояние тела:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\bar{\sigma}} \sigma'_{ij}$$

где  $\dot{\bar{\varepsilon}}$  — интенсивность скоростей деформации,  $\bar{\sigma}$  — интенсивность напряжений,  $\sigma'_{ij}$  — девиатор напряжений.

- выполнение условия несжимаемости ( $\dot{\varepsilon}_v = 0$ ) и пластичности Мизеса ( $\bar{\sigma} = \sigma_s$ ), где  $\dot{\varepsilon}_v$  — скорость объемной деформации,  $\sigma_s$  — напряжение течения, определяемое по реологической модели материала.

Решение системы уравнений при использовании метода конечных элементов осуществ-

вляется с помощью функционала Маркова, представляющего собой разность мощности пластической деформации и мощности внешних сил, приложенных к объекту, принимающего минимальное значение на истинном поле скоростей:

$$\Phi = \int_V \sigma \varepsilon dV - \int_F v_i p_i dF,$$

где  $V$  — объем материала,  $F$  — площадь поверхности объекта,  $p_i$  — проекция удельной внешней силы на соответствующую координатную ось,  $v_i$  — проекция вектора скорости движения материальной точки на соответствующую координатную ось.

Численное решение системы уравнений обеспечивает возможность расчета распределения напряжений при формообразовании, степени и скорости накопленной деформации, площади пятна контакта инструмента с заготовкой, формоизменения заготовки в течении процесса и окончательные размеры диска.

Построение трехмерной конечно-элементной модели процесса формообразования включает в себя следующие этапы [2]:

- *Построение геометрической модели процесса формообразования*

Геометрическая модель процесса раскатки представляет собой систему из четырех тел: формовочный ролик, выглаживающий ролик, пиноль и заготовка. Процесс рассматривается как симметричный относительно плоскости, проходящей через центр тяжести заготовки. Пиноль вращается вокруг собственной оси с постоянной угловой скоростью. Формовочный и выглаживающий ролики вращаются вокруг своей оси с переменной во времени угловой скоростью, а также движутся в радиальном направлении от центра заготовки по радиусу к периферии диска с постоянной линейной скоростью. Заготовка собственного закона движения не имеет и вращается от взаимодействия с другими объектами модели (рис. 59).

- *Построение конечно-элементной модели заготовки и ее взаимодействие с инструментом — роликом*

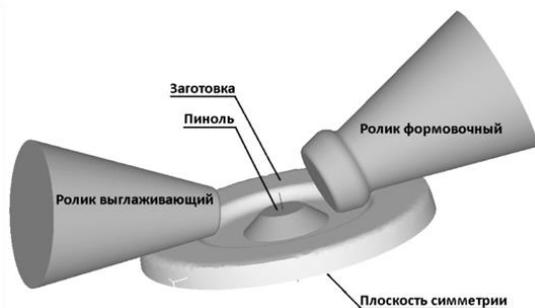


Рис. 59. Геометрическая модель процесса изотермического формообразования

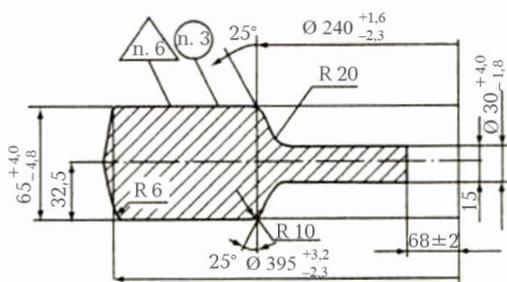


Рис. 60. Исходная заготовка из сплава ВТ9

Конечно-элементная модель заготовки представляет собой жестко-пластическое тело с нелинейным упрочнением, объем которого разбит приблизительно на 100000 тетраэдральных конечных элементов. Внешние узлы сетки конечных элементов, находящиеся на плоскости симметрии, зафиксированы в направлении нормали к этой плоскости. Инструмент — абсолютно твердое тело с постоянной температурой.

Определение граничных условий конечно-элементной модели заготовки, в частности, определение характера ее взаимодействия с инструментом с помощью гибридной модели трения, сочетающей в себе закон трения Амантона-Кулона и закон трения Зибеля:

$$\tau_K = \begin{cases} \mu p: \mu p < tk \\ tk: \mu p \geq tk \end{cases}$$

где  $\tau_K$  — внешние удельные касательные силы,  $\mu$  — коэффициент трения согласно закону трения Амантона-Кулона,  $t$  — фактор трения согласно закону трения Зибеля,  $k$  — максимальное касательное напряжение в материале,  $p$  — нормальное давление материала на стенку инструмента.

• *Построение реологической модели материала заготовки диска*

В силу того, что процесс протекает в изотермических условиях, реологическая модель жестко-пластичного материала с нелинейным упрочнением может быть определена следующим уравнением:

$$\sigma_s = A \cdot \varepsilon^u \cdot \dot{\varepsilon}^z + \sigma_0,$$

где  $\sigma_s$  — напряжение течения материала;  $A$ ,  $u$ ,  $z$  — поправочные коэффициенты уравнения;  $\varepsilon$  — накопленная деформация;  $\sigma_0$  — предел текучести материала;  $\dot{\varepsilon}$  — скорость деформации.

В таблице приведены исходные данные построенной реологической модели материала заготовки диска из сплава ВТ9.

Исходные данные		Значение
Коэффициенты реологической модели	$\sigma_0$ , МПа	23,8
	$A$	175
	$U$	0
	$Z$	0,32
Температура заготовки	$T_{\text{заг}}$ , °С	950
Температура инструмента	$T_{\text{инстр}}$ , °С	600
Скорость вращения пиноли	$\omega_{\text{п}}$ , рад/сек.	0,10472
Изменение скорости вращения формовочного ролика во времени $t$ , сек	$\omega_{\text{ф}}$ , рад/сек.	0,1972727 при $t=0$ 0,4323 при $t=2340$
Изменение скорости вращения выглаживающего ролика во времени $t$ , сек	$\omega_{\text{в}}$ , рад/сек.	0,2954545 при $t=0$ 0,649 при $t=2340$
Линейная скорость формовочного ролика	$V_{\text{ф}}$ , мм/сек.	0,04167
Линейная скорость выглаживающего ролика	$V_{\text{в}}$ , мм/сек.	0,04167
Фактор трения между заготовкой и инструментом	$t$	0,7
Коэффициент трения между заготовкой и инструментом	$\mu$	0,15
Размер шага по времени (процесс разбит на 11 756 шагов)	$t_{\text{шаг}}$ , сек./шаг	0,2

Результаты математического моделирования позволили определить термомеханические и энергосиловые параметры, необходимые для раскатки осесимметричных деталей при разработке технологии и оборудования [35, 13].

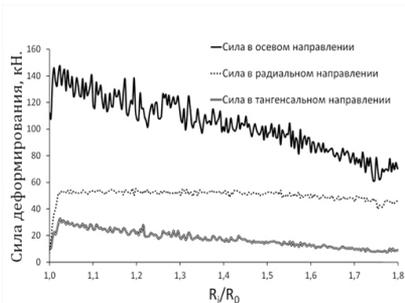


Рис. 61. Изменения силы деформирования на формовочном ролике в процессе раскатки (результаты математического моделирования)

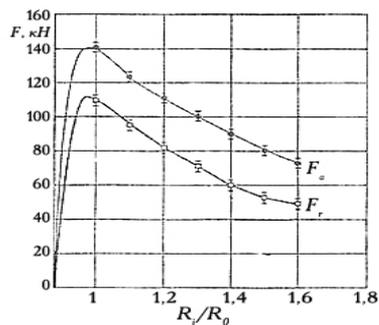


Рис. 62. Экспериментальные данные изменения силы деформирования  $F_a$  — осевая и  $F_r$  — радиальная при изотермической раскатке диска из сплава ВТ9

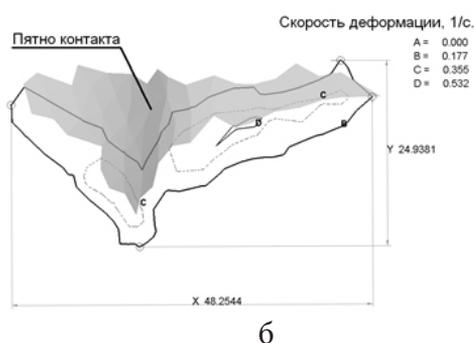
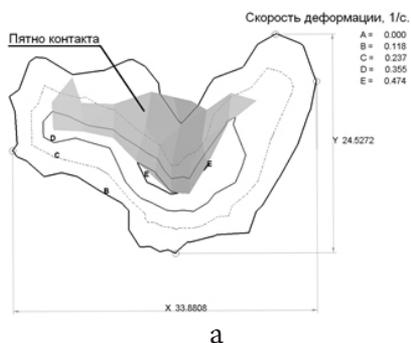


Рис. 63. Распределение скорости деформации в зоне контакта при перемещении ролика в радиальном направлении: а — на 10 мм, б — на 95 мм

В результате моделирования получены графики зависимости сил деформирования на ролике-инструменте в процессе изотермической раскатки по ходу его перемещения от ступицы до периферии диска (т.е. отношение  $R_i/R_0$ ) (рис. 61, 63).

Для оценки адекватности построенной математической модели, приведены результаты экспериментальных данных, полученные при раскатке диска из сплава ВТ9 ( $F_a$  — сила в осевом направлении,  $F_r$  — сила в радиальном направлении,  $R_i/R_0$  — отношение текущего и начального радиуса раскатки (рис. 62, 64).

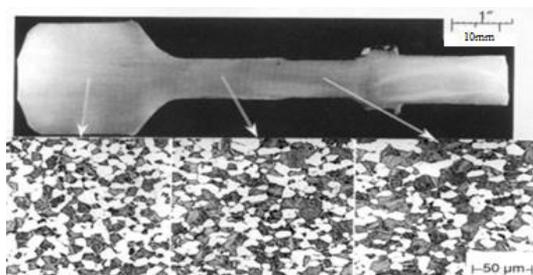


Рис. 64. Образцы дисков, раскатанных из титанового сплава ВТ9 и разрез диска с однородной макро- и микроструктурой

## 2.3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОЛЫХ ВАЛОВ [8, 9, 10]

Для полых валов разработана методика построения математических моделей с высокой степенью локализации пластической деформации на примере формообразования дисков. Математическая модель формообразования полых валов из жаропрочных сплавов в условиях изотермической, в том числе сверхпластической деформации также реализуется на основе метода конечных элементов в программной среде DEFORM и включает следующие этапы:

- построение геометрической модели процесса формообразования (исходная заготовка, шпиндельный узел и формообразующий инструмент) с помощью САД системы и конвертация ее в формат программного комплекса для конечно-элементного анализа процессов пластического деформирования — DEFORM.

Процесс рассматривается как симметричный относительно плоскости, проходящей через центр тяжести заготовки.

Заготовка закреплена на охлаждаемом шпинделе, на котором установлена оправка.

Шпиндель вращается с постоянной угловой скоростью. Формовочный ролик вращается вокруг своей оси с переменной во времени угловой скоростью и перемещается в осевом направлении вдоль оси заготовки с постоянной линейной скоростью. Заготовка собственного закона движения не имеет и вращается от взаимодействия с другими объектами модели (рис. 65).

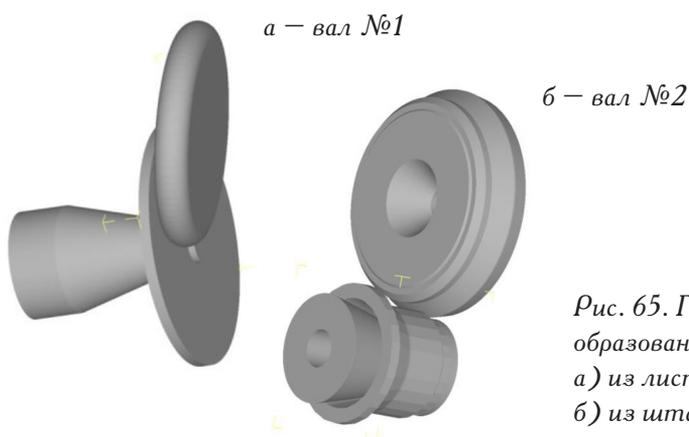


Рис. 65. Геометрическая модель формообразования полых валов  
а) из листовой заготовки,  
б) из штампованной заготовки

Исходная заготовка вала № 1 представляет собой плоскую шайбу диаметром  $D$  и высотой  $h$ ; вала № 2 — это цилиндр, переходящий в конус с фланцем (рис. 66).

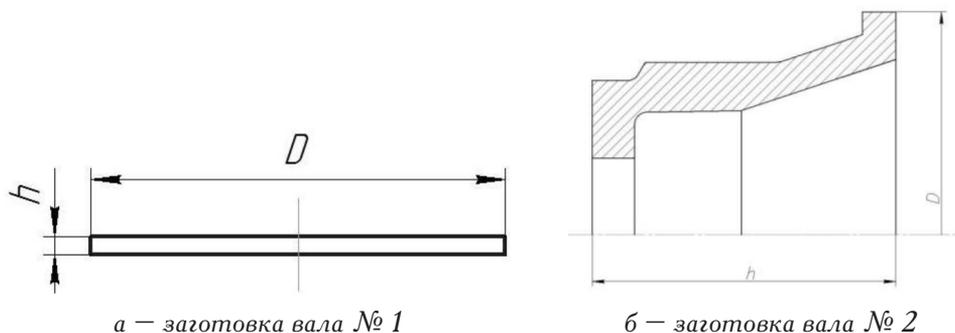


Рис. 66. Общий вид заготовок для формообразования полых валов

• построение конечно-элементной модели заготовки, которая представляет собой жестко-пластическое тело с нелинейным упрочнением, объем которого разбивается на гексаэдральные восьмиузловые конечные элементы, либо четырехузловые осесимметричные (в случае решения задачи прогнозирования течения металла в осевом направлении заготовки без определения энергосиловых параметров процесса) (рис. 67).

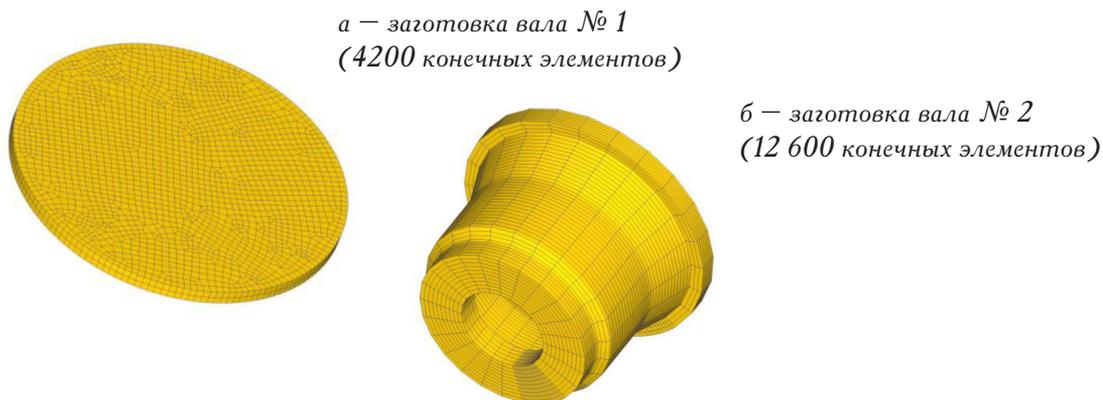


Рис. 67. Конечно-элементная модель заготовок для раскатки полых валов

• определение граничных условий конечно-элементной модели заготовки, в частности определение характера ее взаимодействия с инструментом с помощью гибридной модели трения, сочетающей в себе закон трения Амантона-Кулона и закон трения Зибеля.

• определение закона движения инструмента в модели: угловой скорости вращения заготовки вместе с оправкой и линейной скорости движения ролика-инструмента.

• построение реологической модели материала заготовки при температуре 1100 °С в виде:

$$\sigma_s = A \cdot \varepsilon^u \cdot \dot{\varepsilon}^z + \sigma_0$$

где  $\sigma_s$  — напряжение течения материала,  $A$ ,  $u$ ,  $z$  — поправочные коэффициенты уравнения,  $\varepsilon$  — накопленная деформация,  $\sigma_0$  — предел текучести материала,  $\dot{\varepsilon}$  — скорость деформации.

#### Реологическая модель материалов образцов

Реологическая модель материала		Значение для вала №1 (материал ЭИ962)	Значение для вала №2 (материал ЭК79)
Коэффициенты реологической модели	$\sigma_0$ , МПа	34	65
	$A$	76	180
	$u$	0	0
	$z$	0,16	0,15

Инструмент	Скорость	Вал №1	Вал №2
Оправка	угловая (об/мин)	60	10
Ролик	осевая линейная (мм/сек)	1,17	0,15
	радиальная линейная (мм/сек)	0,427	0

Результаты математического моделирования демонстрируют изменение величины силы деформации в осевом и радиальном направлении, изменение площади пятна контакта при формообразовании вала № 1 (рис. 68 - 70) и № 2 (рис. 71 - 73).

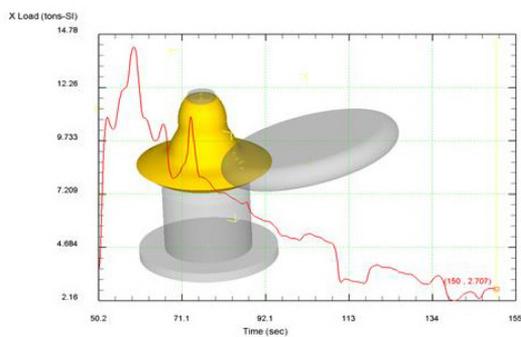


Рис. 68. График силы в осевом направлении при формообразовании вала № 1

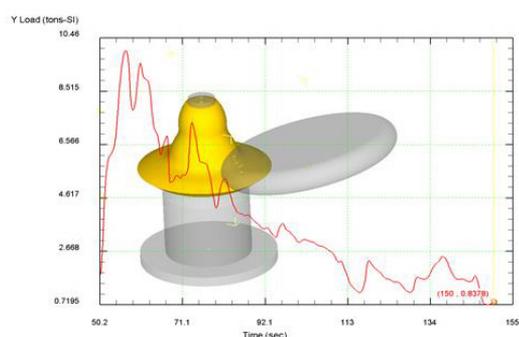


Рис. 69. График силы в радиальном направлении при формообразовании вала № 1

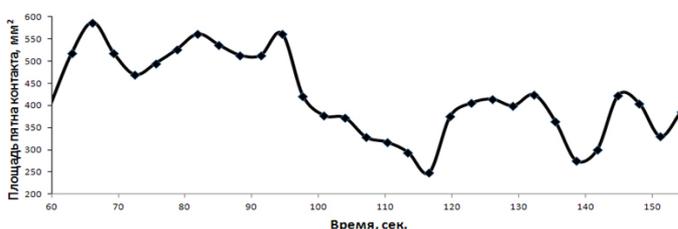
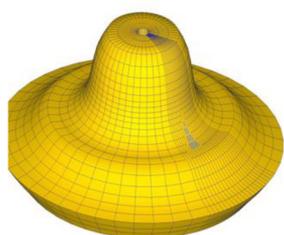


Рис. 70. График изменения площади пятна контакта при формообразовании вала № 1

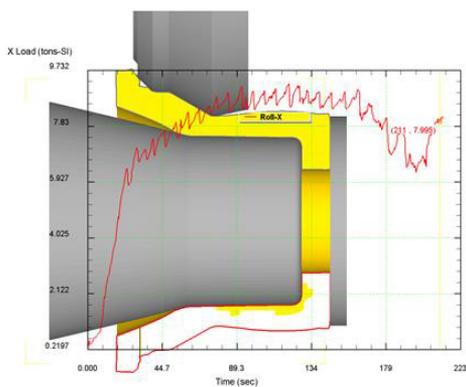


Рис. 71. График силы в осевом направлении при формообразовании вала № 2

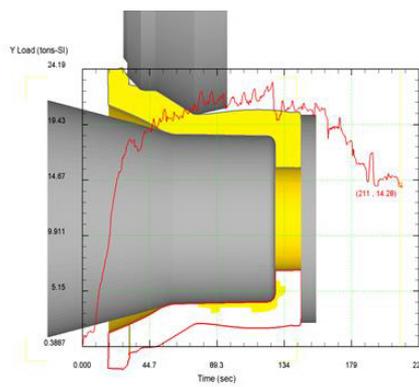


Рис. 72. График силы в радиальном направлении при формообразовании вала № 2

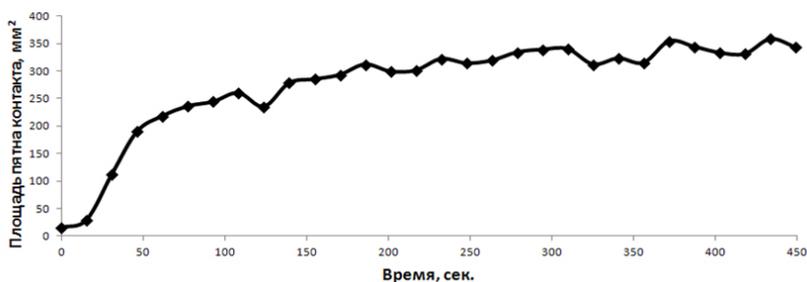


Рис. 73. График изменения площади пятна контакта при формообразовании вала № 2

На рис. 74 - 76 представлены полученные в результате математического моделирования графики изменения силы в радиальном и осевом направлениях в зависимости от величины подачи ролика-инструмента за один оборот при различных скоростях вращения заготовки. Из графиков видно, что при увеличении подачи сила заметно возрастает при всех скоростях вращения заготовки [30, 31, 32].

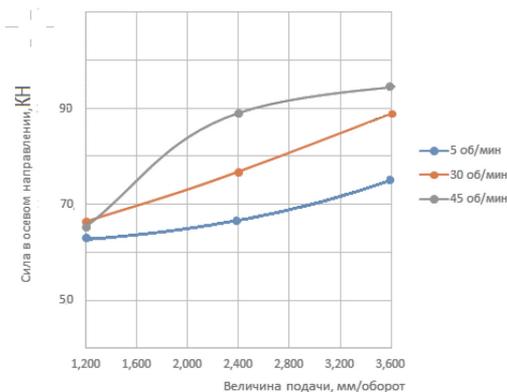


Рис. 74. График зависимости силы в осевом направлении от скорости подачи за один оборот при разных скоростях вращения заготовки (5 об/мин, 30 об/мин, 45 об/мин)

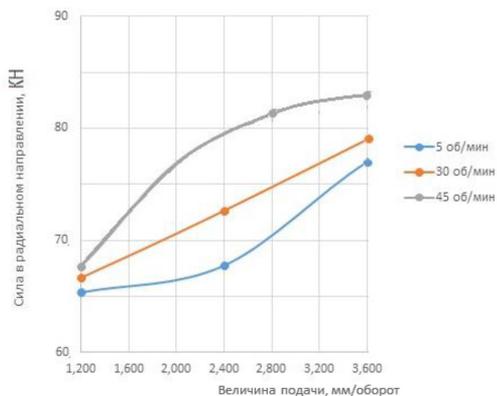


Рис. 75. График зависимости силы в радиальном направлении от скорости подачи за один оборот при разных скоростях вращения заготовки

Результаты экспериментальных исследований показали, что с увеличением подачи ролика, вследствие увеличения пятна контакта заготовки с роликом и повышения напряжения течения, увеличивается сила, которую необходимо приложить к ролику для формообразования вала.

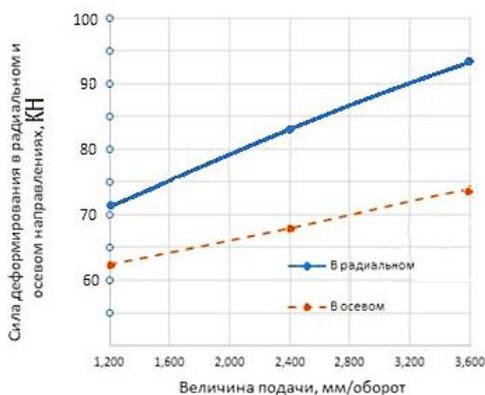


Рис. 76. График зависимости сил в осевом и радиальном направлениях от скорости подачи за один оборот при скорости вращения заготовки 5 об/мин

С использованием программного комплекса DEFORM-3D решена задача математического моделирования процесса формообразования вала в изотермических условиях. В результате многовариантного варьирования формой и размерами исходной заготовки, скоростью ее вращения, величиной подачи инструмента, температурой были получены технологические решения при реализации процесса формообразования в соответствии с заданными размерами полых валов из листа и штампованной заготовки (рис. 77 - 82) [10, 11].

## Моделирование процесса формообразования вала № 1 типа «Конус» из листа

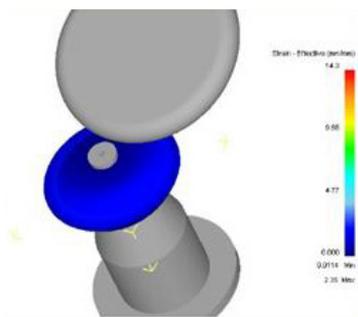


Рис. 77. Модель формообразования вала

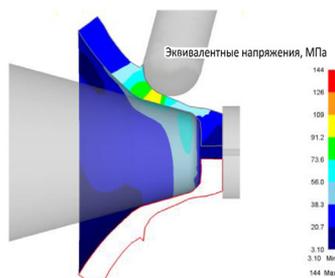


Рис. 78. Распределение напряжения

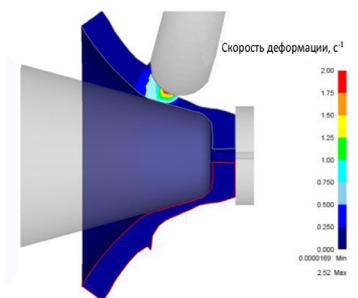


Рис. 79. Распределение скорости деформации

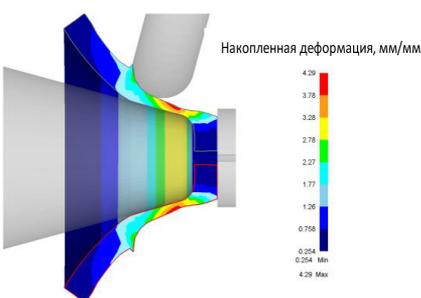


Рис. 80. Распределение накопленной деформации

## Моделирование процесса формообразования вала № 2 из штампованной заготовки

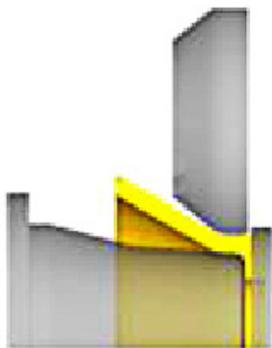


Рис. 81. Начало раскатки

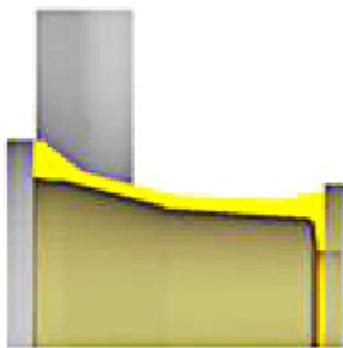


Рис. 82. Окончание раскатки

### 2.4. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОЛЫХ ВАЛОВ [25, 8, 15, 16]

Физическое моделирование процесса формообразования заключается в экспериментальной апробации или воспроизведении реального процесса на модельной оснастке в масштабе с применением модельного материала для заготовки, близкого по физико-механическим свойствам при комнатной температуре к свойствам сплава, используемого в реальных условиях. В качестве модельного сплава используется сплав Вуда (рис. 84, 85).

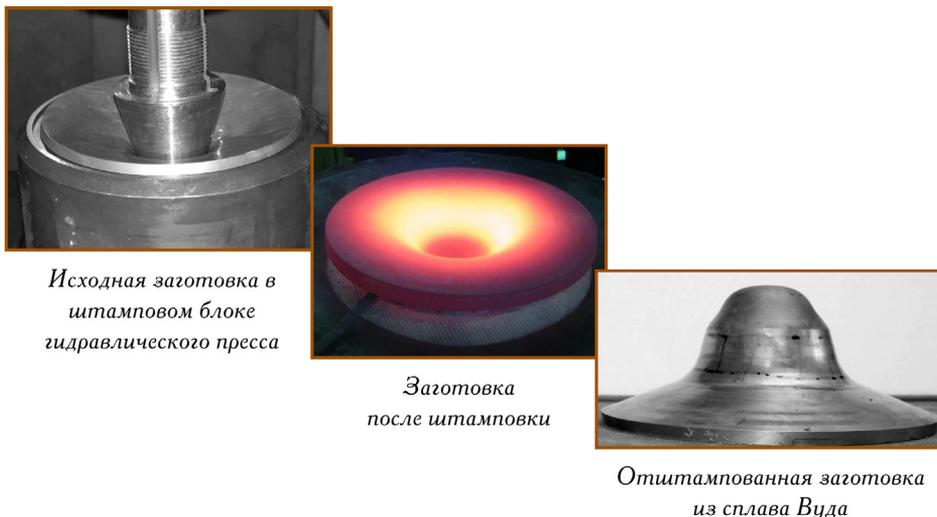


Рис. 83. Получение оштампованной заготовки для формообразования

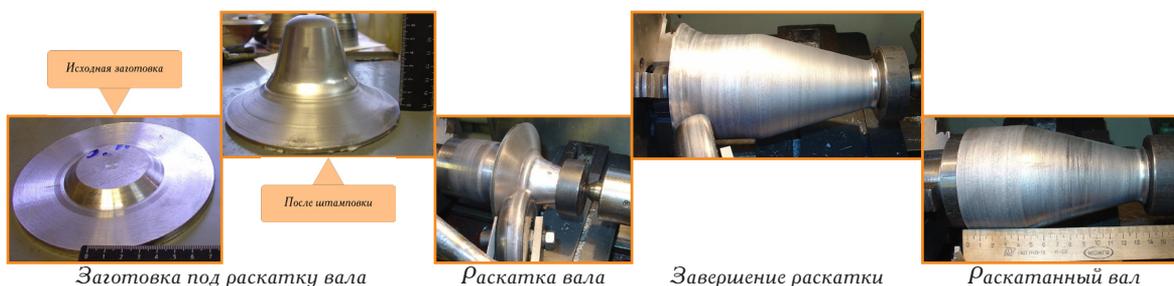


Рис. 84. Физическое моделирование процесса раскатки полого вала № 1 типа «Конус» из сплава Вуда

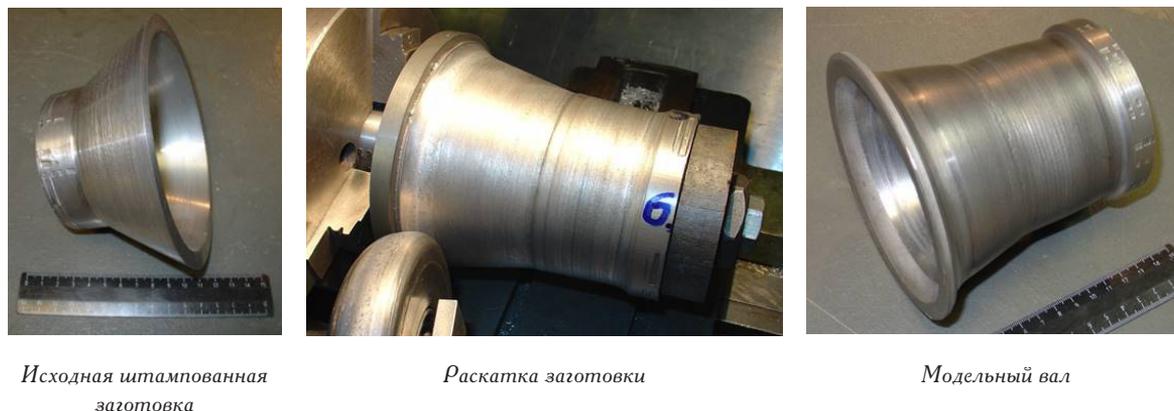


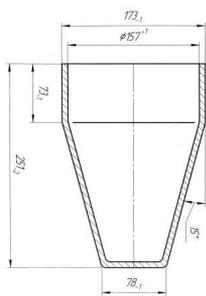
Рис. 85. Физическое моделирование процесса раскатки модельного вала № 2 из штампованной заготовки из сплава Вуда

## 2.5. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБРАЗЦЫ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ СПЛАВОВ РАСКАТКОЙ В СВЕРХПЛАСТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ НА СТАНЕ СРВ [25]

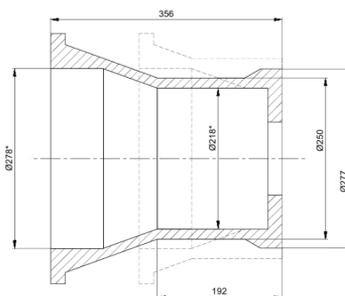
Лабораторный регламент разработан и апробирован при изготовлении образцов полых валов из сплава ЭИ962-Ш и ЭК79 в изотермических условиях на стане СРВ (рис. 86).

- 1 Проверка структуры (размер зерна) и механических характеристик исходного материала (ЭИ962-Ш, ТУ 14-123-181-2005)
- 2 Вырезка предзаготовки (гидроабразивная или газовая резка)  $\varnothing 275$  мм
- 3 Отжиг заготовки при  $T = 800^\circ \pm 10^\circ\text{C}$ , время 2 ч.
- 4 Получение окончательной заготовки (конус  $15^\circ$  и  $135^\circ$ ) штамповкой на гидравлическом прессе
- 5 Термическая обработка  $T \approx 800^\circ\text{C}$ , время выдержки 2 ч.
- 6 Контроль геометрических размеров, поверхности
- 7 Установка заготовки на оправке и зажим опорным валом в камере нагрева
- 8 Нагрев в камере до  $T = 900^\circ\text{C}$
- 9 Ввод в зону раскатки инструмента-ролика и нагрев до температуры раскатки
- 10 Установка заданных параметров раскатки: скорость вращения заготовки, усилия на инструменте, скорость внедрения ролика в тело заготовки, скорость перемещения инструмента вдоль оси заготовки
- 11 Раскатка заготовки. Контроль параметров раскатки системой контроля раскатки (СКР) Макета СРВ
- 12 Нормализация  $T = 1000^\circ\text{C}$ , время 15 мин.
- 13 Отпуск (нагрев до  $T = 565^\circ\text{C} \pm 10^\circ$ , время выдержки 2ч., остывание на воздухе)
- 14 Вырезка образцов по схеме, контроль механических свойств и структуры по ТУ и ГОСТ (выборочно из партии)

Рис. 86. Схема технологического процесса изготовления полого вала № 1 из листа сплава ЭИ962-Ш (лабораторный регламент)



а — образец вала, полученного из листа сплава ЭИ962-Ш



б — образец вала из штампованной заготовки из сплава ЭК79

Рис. 87. Образцы полых валов, изготовленных на стане СРВ

Механические свойства материала полого вала № 1 из сплава ЭИ962-Ш

Марка сплава	Предел прочности, $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ , МПа	Отн. удлинение, $\delta$ , %	Отн. сужение, $\psi$ , %	Ударная вязкость, КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	Твердость по Бринеллю (d отпечатка, мм)
ЭИ962-Ш	1162	1018	13	68	180	3,2
ЭИ962-Ш (ТУ 14-123-181-2005)	980	835	12	50	60	3,10-3,45

Проведенные испытания показали повышение механических свойств материала образцов из сплава ЭИ962-Ш (более чем на 10%) от значений, указанных в ТУ, а также получение однородных структур материала.

Механические свойства материала полого вала № 2 из сплава ЭК79

Марка сплава	Предел прочности, $\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Отн. удлинение, $\delta$ , %	Отн. сужение, $\psi$ , %	Ударная вязкость, кгм/см <sup>2</sup>	Твердость по Бринеллю (d отпечатка, мм)
ЭК79	146,2	111,7	20,1	20,7	7,0	3,2
ЭК79(ТУ 1-801-334-85)	$\geq 130$	$\geq 90$	$\geq 13$	$\geq 14$		

Экспериментально подтверждено также повышение механических свойств материала образцов из сплава ЭК79 по сравнению с ТУ при режимах формообразования: температура 1075÷1080 °С, скорость деформации —  $10^{-4} \div 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>, размер зерна  $\gamma$ -фазы в пределах 2÷10 мкм, и  $\gamma'$ -фазы 1,5÷5 мкм, структура однородная.

Проведенные исследования структуры и свойств материалов, а также испытания полученных образцов, подтвердили эффективность выбранной методологии математического и физического моделирования процесса изотермического формообразования деталей ГТД на созданных экспериментальных станах.

Выводы

1. При проведении НИОКР получены результаты исследований закономерностей влияния величины деформации, скорости деформации, температуры на структуру жаропрочных сплавов (обеспечение ультрамелкозернистой структуры), а также влияния окончательной термообработки на повышение прочности и жаропрочности заготовок и деталей.

2. На основании математического и физического моделирования процессов формирования ультрамелкозернистой структуры заготовок и их формообразования в изотермических условиях определены термомеханические и энергосиловые параметры технологического процесса изготовления деталей, траектории и скорости перемещения рабочих органов, предложена методика выбора оптимальной формы и размеров заготовки, получены результаты напряженно-деформированного состояния инструмента при изотермической раскатке деталей.

3. Методы расчета конструкции основных узлов раскатных станов подтверждены результатами испытаний разработанных СРЖД-800, СРВ и могут быть использованы при проектировании и создании новых конструкций автоматизированного оборудования для формообразования осесимметричных деталей ГТД в изотермических условиях.

4. Показана эффективность совместного использования математического и физического

моделирования процесса формообразования методом раскатки, дано обоснование режимов деформационно-термического процесса измельчения зерен в металлах и сплавах для формирования однородной ультрамелкозернистой структуры в заготовках для последующего формообразования из них деталей в части определения оптимальных термомеханических и энергосиловых параметров для «управления» структурой материала и повышения механических свойств.

5. В результате выполнения фундаментальных и прикладных исследований академическими институтами ИПСМ РАН, г. Уфа и ИМАШ РАН, г. Москва, предприятиями АО «ОДК» АО «НПЦ Газотурбостроения «Салют» и др. в области развития технологии изотермической раскатки деталей ГТД из жаропрочных сплавов разработана технологическая и конструкторская (рабочая и эскизная) документация на оборудование и технологию, изготовлены автоматизированные экспериментальные станы (СРЖД-800, СРВ), промышленный образец автоматизированной линии АЛРД-800, получены образцы деталей (дисков, полых валов) из промышленных жаропрочных сплавов, исследованы макро-микроструктура материалов образцов после изотермической раскатки, разработаны научные основы проектирования новых технологических процессов формообразования методом раскатки в изотермических (сверхпластических) условиях.

6. Разработанная технология формообразования деталей ГТД из жаропрочных сплавов методом раскатки в изотермических и сверхпластических условиях и созданные автоматизированные станы являются приоритетом России и защищены патентами, что подтверждает актуальность и новизну полученных результатов.

7. Научно-технические решения позволяют создать производственные интеллектуальные технологии формообразования ответственных деталей ГТД для самолетов 5-го поколения из новых жаропрочных сплавов методом раскатки в сверхпластических условиях с использованием гибких перенастраиваемых комплексов, а также обеспечить конкурентоспособность отечественной технологии и импортозамещение.

8. Созданный организациями ИПСМ РАН, АО «НПЦ Газотурбостроения «Салют» (филиал НИИД), ИМАШ РАН научно-технический задел в области разработки и внедрения новых технологий и оборудования для формообразования деталей ГТД в изотермических и сверхпластических условиях может получить дальнейшее развитие на базе организации совместного научно-исследовательского и экспериментального центра производственных интеллектуальных технологий изготовления деталей для газотурбинных двигателей из новых жаропрочных материалов, а также методов их финишной обработки. Необходимо разработать комплексную научно-техническую программу полного инновационного цикла по рассматриваемой проблеме в целях обеспечения реализации приоритета «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642, п.20а: «переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта» с участием Министерства науки и высшего образования и заинтересованными организациями.

Научно-исследовательский и экспериментальный центр создания интеллектуальных производственных технологий изготовления деталей ГТД из новых жаропрочных материалов. Организации-участники: ИМАШ РАН, ИПСМ РАН, МГТУ им. Баумана, МГТУ «Станкин», АО «ОДК» (АО «НПЦ Газотурбостроения «Салют»), АО «Ступинская металлургическая компания», АО «Ступинская металлургическая компания», ГНЦ РФ ФГУП «ВИАМ».



### 3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ГТД

В разделе рассмотрены:

- особенности технологического процесса обработки пера лопаток ГТД,
- интеллектуальная экспертная система, основанная на правилах для управления технологическими комплексами финишной обработки пера лопаток ГТД,
- вейвлет-преобразования в системах распознавания и управления финишной обработки лопаток (геометрия-качество поверхности),
- позиционно-силовое управление шести координатным промышленным роботом при обработке сложных поверхностей,
- анализ и синтез динамических характеристик станочного оборудования, построенного на основе вращательно-линейных модулей.

#### 3.1. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ПЕРА ЛОПАТОК ГТД

Лопатки (рис. 88) — самая массовая и ответственная деталь ГТД.



Рис. 88. Типовые конструкции лопаток авиационных двигателей

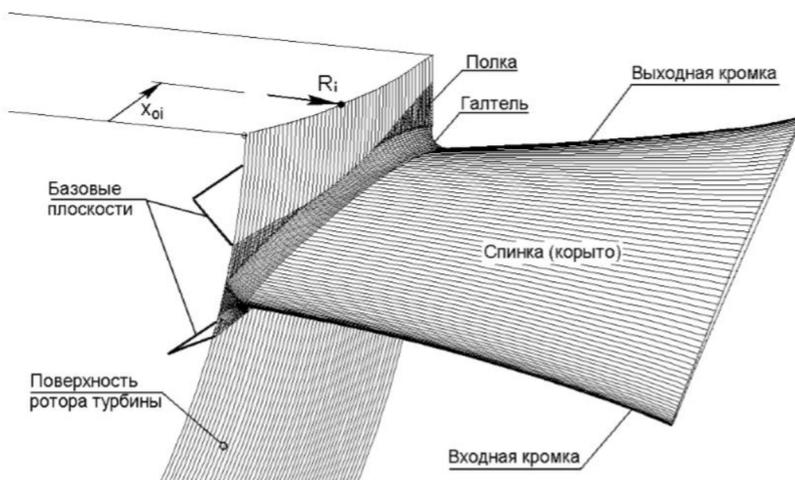


Рис. 89. Перо лопатки ГТД

От качества изготовления лопаток в решающей мере зависит эффективность работы ГТД, достижение стабильности эксплуатационных характеристик, долговечность и надежность. Так современный ГТД насчитывает до 3000 и более лопаток (20÷30) типоразмеров, длиной от 12 до 1000 мм. Материалами для лопаток компрессоров служат трудно обрабатываемые жаропрочные, жаростойкие высоколегированные сплавы.

Изготовление лопаток по трудоемкости составляет до 30% общей трудоемкости изготовления ГТД. В свою очередь, в общей трудоемкости изготовления лопаток большой объем (до 45%) занимают финишные ручные полировальные доводочные работы, которые требуют квалифицированных и высокооплачиваемых рабочих.

Следует отметить, что ручные полировальные доводочные операции - это вредные для здоровья работы, которые приводят к профессиональным заболеваниям рабочих силикозом и вибролезнью.

Существующие технологические процессы предполагают дифференцированные методы обработки элементов лопаток ГТД. Первоначально производится обработка поверхностей замка лопатки фрезерованием, протягиванием, электроэрозионным способом, точением или шлифованием, в том числе и глубинным.

Предварительная обработка проточных поверхностей лопаток осуществляется в зависимости от материалов лопаток и их габаритов:

- фрезерованием,
- литьем,
- штамповкой,
- вальцеванием,
- круговой электрохимической обработкой.

Время обработки проточных поверхностей достигает 30÷40 минут в зависимости от габаритов лопаток.

Для получения готовой детали требуется выполнить финишные операции: шлифование и полирование, которые включают либо полную обработку пера, либо обработки отдельных участков пера - полок, кромок, прикомлевого участка.

После предварительных операций нельзя получить все участки пера лопаток с одним минимально возможным допуском. Так на угол закрутки из-за ажурности пера (особенно это относится к авиационным двигателям 5-го поколения) и его деформации после предварительной обработки приходится назначать большой допуск. Одновременно входную и выходную кромки, усилительные полки требуется выполнять с высокой точностью (минимальный допуск) (рис. 89).

Для автоматизации данных операций требуется для каждой заготовки, поступающей на финишную операцию, измерять геометрические параметры сложной пространственной поверхности проточной части детали, определять качество поверхности. После определения параметров сложной поверхности пера лопатки необходимо в полученную заготовку, поступающую на финишную операцию, вписать готовую деталь и для этой детали назначить индивидуальную программу обработки и режимы обработки.

Подобную высокоинтеллектуальную операцию в настоящее время во всем мире способны выполнять только квалифицированные специалисты. Данные специалисты должны иметь природные данные (отсутствие повышенного тремора рук). Малейшие погрешности могут привести к браку на финише изготовления дорогой и ответственной детали.

С учетом вредности процесса финишной обработки и трудоемкости изготовления пера лопаток рабочие, выполняющие операции шлифования и полирования, во всем мире являются самыми высокооплачиваемыми.

С учетом изложенного выше, для автоматизации финишных операций обработки пера лопа-

ток ГТД должна быть разработана интеллектуальная технологическая система, способная распознавать геометрию и качество сложной пространственной поверхности с помощью встроенных высокоточных дистанционных систем контроля, контролировать технологический процесс, выбирать оптимальное управление и формировать программу обработки, выполняемую, как правило, роботом для каждой индивидуальной детали [21, 22, 23, 24].

### 3.2. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА, ОСНОВАННАЯ НА ПРАВИЛАХ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПЕРА ЛОПАТОК ГТД

Цель автоматизации операций финишной обработки пера лопаток ГТД состоит в создании интеллектуального робототехнического комплекса, включающего встроенный контроль технологических параметров, геометрических размеров и качества поверхности, способного выполнять финишные операции изготовления проточной части лопаток ГТД и получать готовые изделия с заданным качеством без участия человека.

Интеллектуальная технологическая система представляет собой в общем случае экспертную систему, содержащую переменную настраиваемую модель внешнего мира и реальную исполнительную систему с объектом управления (рис. 90). Цель и управляющие воздействия формируются в такой системе на основе знаний о внешней среде, объекте управления и на основе моделирования ситуаций в виртуальном мире, которые в дальнейшем реализуются реальной системой. Внешней средой для технологической системы является непосредственно технологический процесс, выполняемый системой управления.

Интеллектуальную технологическую систему можно представить состоящей из двух подсистем — *высшего и низшего уровней* (рис. 90) [22]. Подсистема управления высшего уровня выполняет функции хранения информации об обрабатываемом изделии, технологическом процессе, задачах, решаемых обрабатывающим оборудованием. Основная задача, стоящая перед данной подсистемой — это проверка на комплексной модели процесса обработки и выбор управляющей программы, которую должна выполнить реальная исполнительная система в реальном времени. Управление всем комплексом осуществляется от единой вычислительной системы, которая может быть включена в единую вычислительную сеть.

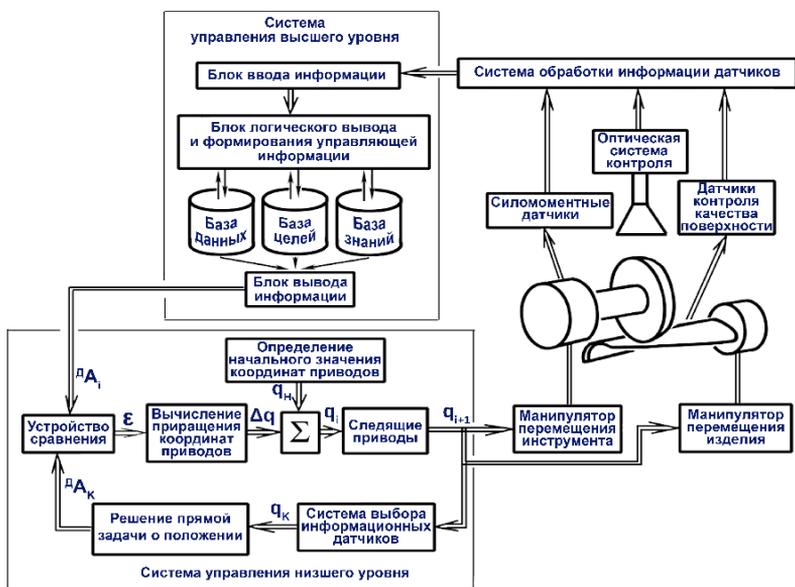


Рис. 90. Интеллектуальная технологическая система

Входом системы высшего уровня (рис. 90) является *Блок ввода информации*, куда поступают числовые данные с датчиков контроля. В качестве устройств контроля используются датчики, определяющие усилия резания, датчики, позволяющие контролировать качество поверхности, встраиваемая оптическая система, предназначенная для определения геометрических размеров поступающей на обработку заготовки, а также получаемой после обработки готовой детали.

Далее информация поступает в *Блок логического вывода*, либо сразу в базу данных. *База данных (БД)* — это совокупность таблиц, хранящих, как правило, символьную и числовую информацию о технологическом процессе, обрабатываемых изделиях, исполнительных механизмах робота-станка, инструменте и др.

*Блок логического вывода* и формирования управляющей информации обеспечивает нахождение решений для нечетко формализованных задач и выдачу информации для пользователя и для управления исполнительными механизмами станка. Данный блок на основе *Базы знаний (БЗ)*, *Базы данных (БД)*, *Базы целей (БЦ)* и *Блока алгоритмических методов решений* формирует программу управления станком для выполнения технологической операции.

При формировании программы обработки криволинейной поверхности пера лопатки требуется обеспечивать:

- компенсацию упругих деформаций детали и рабочих органов обрабатывающего оборудования;
- дополнительно определение геометрических размеров шлифовального круга после его правки;
- определение возможности появления автоколебаний технологической системы, их причин и поиск путей их устранения;
- вписывание геометрической модели конечного изделия в геометрическую модель заготовки с целью определения снимаемых припусков;
- определение траектории движения обрабатывающего инструмента для формирования сложной поверхности изделия.

Таким образом, для каждой лопатки, поступающей на финишную обработку, необходимо корректировать программу обработки пера. Поэтому система должна быть интеллектуальной, связанной, в частности, с возможностью принятия решений по необходимой корректировке программ обработки на основе информации, поступающей от системы контроля.

Экспертная система строится на основе правил. В качестве правил рассматривается набор обязательных действий, которые проверяются и корректируются на основе информации систем контроля о характеристиках обрабатываемой детали и исполнительной системы. На основании этого формируется программа обработки конкретной лопатки.

*Планирование движения.* Перед началом планирования программы обработки заготовка автоматически распознается измерительной подсистемой робота-станка. Структурная схема интеллектуальной технологической системы управления робототехническим комплексом приведена на рис. 91.

Работа системы планирования движений осуществляется в соответствии с алгоритмом (рис. 92). Первым этапом работы системы планирования движений (ПД) является геометрический анализ заготовки. Решается задача «вписания», т.е. проверяется возможность получения конечного изделия из имеющейся заготовки и достигается максимально возможная равномерность распределения припуска для текущей заготовки. Производится формирование карты распределения припуска по поверхности изделия и разбиение поверхности изделия на зоны в зависимости от количества проходов, требуемых для удаления (съема) припуска. Последовательная обработка зон позволяет минимизировать ошибку обработки, связанную со скачками сил резания из-за неравномерности припуска [28].

Рис. 91. Структурная схема интеллектуальной технологической системы управления робототехническим комплексом



Следующим этапом работы системы ПД является формирование траекторий движения инструмента поверхности изделия. На выходе подсистемы формирования траекторий получаем массивы траекторий для определенных зон (в слу-

чае черновых проходов) и массив траекторий для всей поверхности изделия.

После завершения этапа формирования траекторий система ПД решает задачу назначения режимов обработки. На этом этапе производится прогнозирование параметров резания на основе усеченной модели — учитываются лишь упругая модель изделия и модель технологического процесса. На выходе получаем функцию изменения подачи для каждой траектории движения.

Вся априорная информация, необходимая для работы интеллектуальной технологической системы, хранится в базе данных. В ней содержится, в частности, информация о кинематических и динамических характеристиках робота-станка, обрабатываемых лопатках, технологическом процессе, режущем инструменте и шпиндельном узле как основных элементах, определяющих

качество воспроизводимой поверхности и режимах обработки.

Финальным этапом работы системы ПД является проверка сформированных законов движения на комплексной модели процесса обработки. В результате моделирования получаем ошибку отработки формообразующих траекторий, далее, в случае если ошибка превышает допуск на обработку, формируются правила корректирования законов движения. В том случае, если ошибка не превышает допуск, сформированные системой ПД законы движения считаются подтвержденными и транслируются в систему ЧПУ робота-станка.

*Структура математической модели.* Математическая модель, входящая в состав интеллектуальной технологической системы, включает в себя (рис. 93):

- динамические модели робототехнических манипуляторов перемещения обрабатываемой детали и обрабатывающего инструмента;
- динамическую модель исполнительного органа обрабатывающего инструмента;
- геометрическую и упругую модели обрабатываемого изделия — пера лопатки ГТД;
- модель технологического процесса обработки;
- модели электрических приводов робота-станка.

Рис. 92. Алгоритм планирования формообразующих движений

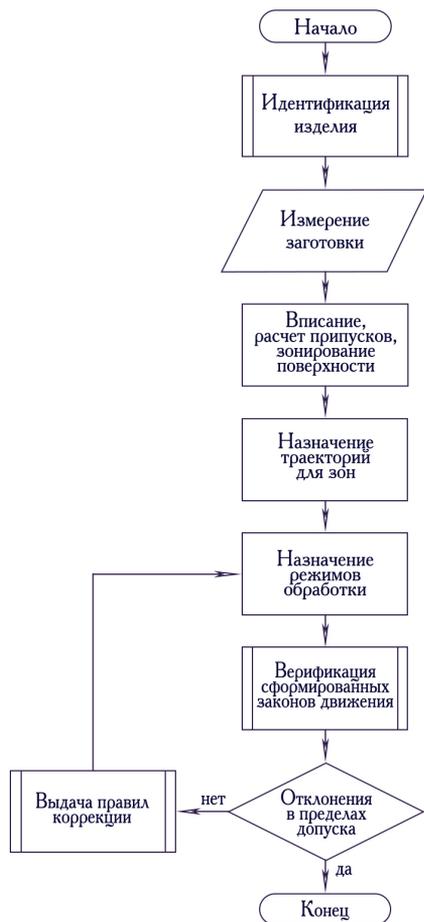
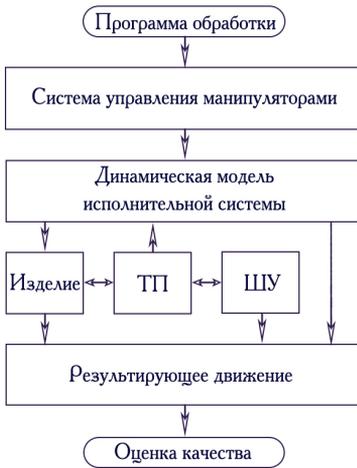


Рис. 93. Структурная схема математической модели процесса обработки



*Модель изделия.* Для различных процессов механической обработки и различного инструмента необходимо получать зависимости (в том числе экспериментальные) между характеристиками взаимного перемещения инструмента и детали (координатами траектории перемещения, скоростями, ускорениями и другими характеристиками) и усилиями взаимодействия, возникающими между деталью и инструментом.

Так при обработке лопаток ГТД определяющей упругой податливостью, в сравнении с механизмом станка, обладает непосредственно перо лопатки. Поэтому при обработке пера лопаток турбин для обеспечения требуемой точности получаемых размеров пера необходимо учитывать упругие свойства пера под действием сил резания.

На выходе системы высшего уровня *Блок вывода информации* выдает программу для системы управления роботом-станком в реальном времени. Контур обратной связи с системой низшего уровня позволяет реализовать адаптивное управление и обучение интеллектуальной системы.

На этапе проектирования интеллектуальной системы и наполнения ее знаниями о процессе и обрабатываемых деталях эксперты и инженеры наполняют базу знаний и базу целей, а программисты разрабатывают программы алгоритмических методов решений. База данных создается и пополняется, как правило, в процессе эксплуатации интеллектуальной системы.

Работа интеллектуальной системы осуществляется в следующей последовательности. При поступлении информации на вход *Блока ввода информации* на внешнем языке системы производится её интерпретация во внутреннее представление для работы с символьной моделью системы.

*Блок логического вывода* и формирования управляющей информации выбирает из *Базы знаний* множество правил, активизированных поступившей входной информацией, и помещает эти правила в *Базу целей*, как текущие цели системы.

Далее *Блок логического вывода* и формирования управляющей информации по заданной стратегии, например, стратегии максимальной достоверности, выбирает правило из *Базы целей* и пытается доопределить переменные модели внешнего мира и исполнительной системы и соотнести их с объектом управления. На основе этого активизируются новые правила в *Базе целей*, и начинается логический вывод в системе правил. Эта процедура заканчивается, как только решение будет найдено, либо когда будет исчерпана *База целей*. Найденное решение из внутреннего представления интерпретируется *Блоком вывода информации* во внешний язык подсистемы управления низшего уровня и объекта управления.

Система управления низшего уровня (см. рис. 90) включает в себя объект управления, которым являются исполнительные манипуляционные механизмы. В состав исполнительных механизмов входят исполнительные двигатели, которые осуществляют их перемещение  $R_d$  и  $R_{II}$  по заданным законам в реальном времени  $U_{II}(t)$  и  $U_d(t)$  с требуемыми точностью, скоростью и усилием. Информация о положении выходных звеньев, их скоростях, ускорениях и силах, действующих на них, определяется датчиками, расположенными в шарнирах звеньев.

Общим информационным управляющим каналом системы управления низшего уровня является канал передачи управляющих сигналов  $U(t)$  и сигналов обратной связи от системы низшего уровня  $R(t)$ . Управляющее воздействие  $U(t)$  представляет собой выбранную программу, обработанную и проверенную в системе высшего уровня.

Система низшего уровня осуществляет управление приводами и представляет следящую систему, основное требование к которой выполнить заданную программу.

Обратная связь  $R(t)$  несет полную информацию о работе системы управления низшего уровня в виде сигналов о ее состоянии, например, об усилиях в процессе обработки, износе инструмента и др. Данная информация используется для пополнения базы данных в системе высшего уровня.

Искусственный интеллект технологической системы [24], рассмотренной выше, заключается в возможности распознавать поверхности детали с точки зрения качества и соответствия заданным геометрическим размерам по чертежу, управлять технологическим процессом и принимать решения по его изменению. В свою очередь, принятое решение включает программу обработки поверхности, проверенную непосредственно для поступившей заготовки и скорректированную таким образом, чтобы из данной заготовки получить окончательно готовую деталь.

### 3.3. ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМАХ РАСПОЗНАВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

В результате теоретических исследований при определении математической модели для анализа изображений были использованы положения теории вейвлет-преобразования [21]. В качестве вейвлетов рассматриваются различные функции. Вид вейвлета целесообразно выбирать, основываясь на реальном виде сигнала, снимаемого с технического устройства. Поэтому при анализе изображений, снимаемых с ПЗС-матрицы телекамеры, предлагается потенциальная функция вида (рис.94)

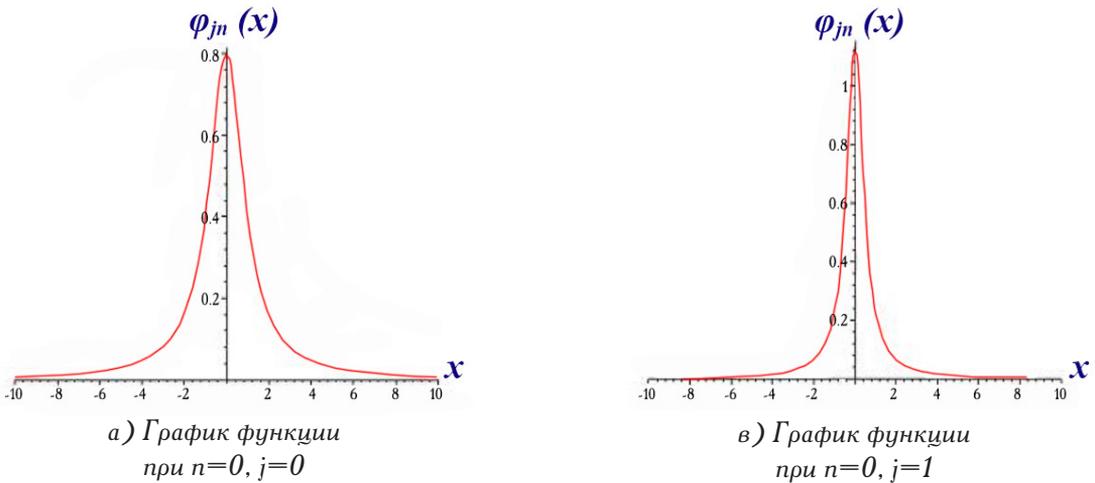


Рис. 94. Масштабирующая функция, представляющая сигнал, выдаваемый пикселем ПЗС-матрицы

$$\varphi_{jn}(x) = 2^{j/2} \varphi(2^j x - n) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \left( \frac{2^{j/2}}{1 + (2^j x - n)^2} \right), x \in R, \quad j \in Z, n \in Z,$$

где  $n=1,2,\dots, j$  – параметр, определяющий вид  $\varphi_{jn}(x)$

Распределение интенсивности фототока с пикселя ПЗС-матрицы при его последовательном освещении наиболее близко представляет потенциальную функцию (рис. 94).

Представление сложных функций в виде вейвлет-разложения позволяет отыскивать дефектные участки в осциллограммах в одномерном случае (рис. 95), а также отыскивать участки на сложной поверхности (рис. 96, 97), содержащие определенные особенности.

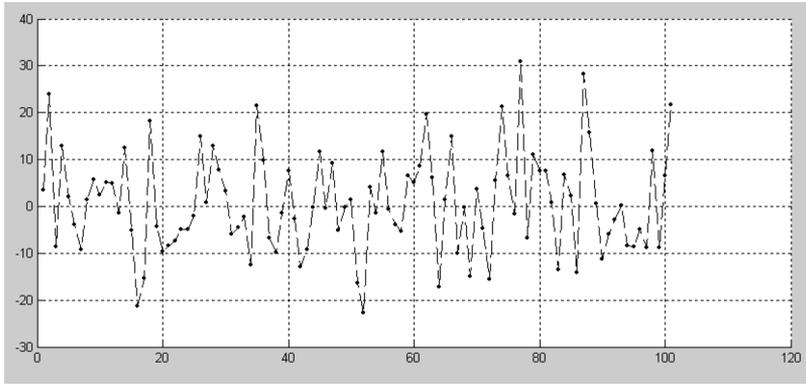


Рис. 95. Осциллограмма сигнала, представленная в виде вейвлет-ряда

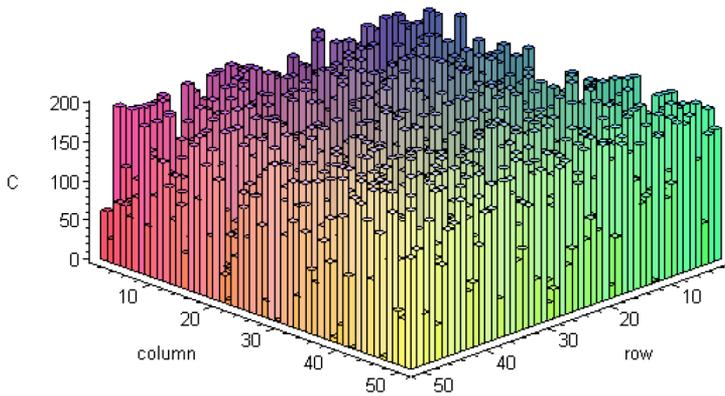


Рис. 96. Сигналы с пикселей ПЗС-матрицы при освещении сложной поверхности

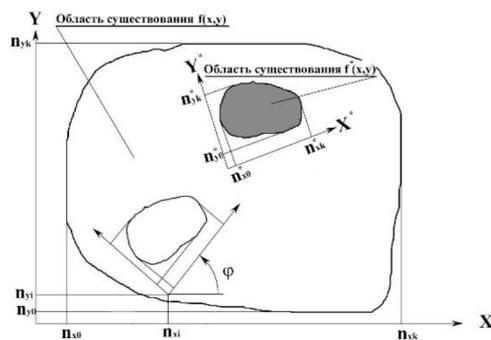


Рис. 97. Распознавание на сложной поверхности специальных объектов, характеризующих определенными особенностями

В качестве признаков, характеризующих анализируемые фрагменты трехмерного изображения предложено использовать сингулярное разложение матрицы коэффициентов вейвлет-разложения. Вейвлет-разложения в виде сети, построенной на основе потенциальной функции, позволяют распознавать границы изображений.

Применение вейвлет-преобразований для анализа нелинейных систем позволяет исследовать сложные системы, содержащие существенные нелинейности, аналогично линейным системам. Предложенная методика анализа нелинейных систем имеет преимущество в сравнении с частотными методами, т.к. рассматривает процессы во временной области и позволяет аналитически исследовать переходные процессы модулей.

### 3.4. ПОЗИЦИОННО - СИЛОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ШЕСТИКООРДИНАТНЫМ ПРОМЫШЛЕННЫМ РОБОТОМ ПРИ ОБРАБОТКЕ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Робототехнический комплекс включает: универсальный промышленный робот (робот-станок); транспортную систему (поворотный накопительный стол) для транспортировки заготовок и готовых деталей от системы контроля к позиции обработки изделия; оптическую систему контроля геометрических параметров и качества обработки сложной поверхности, разработанную ОИВТ РАН<sup>6</sup> (рис. 98-100)

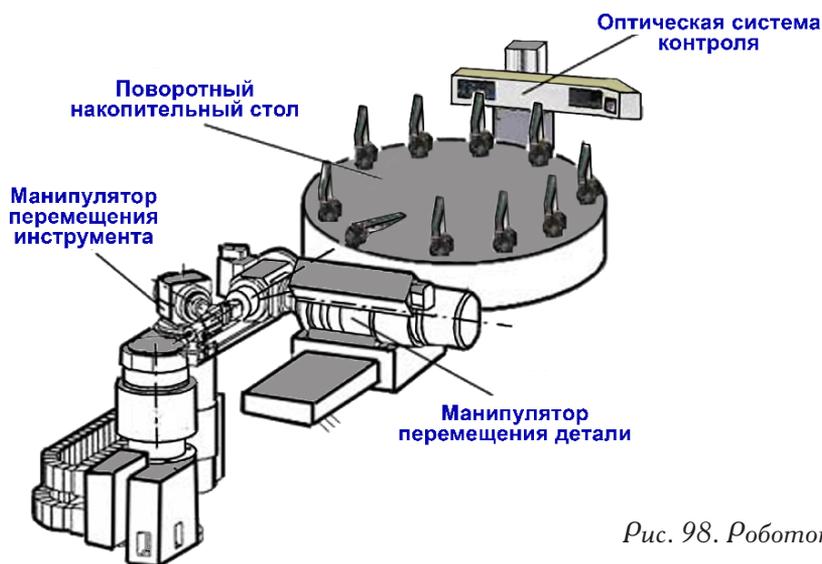


Рис. 98. Робототехнический комплекс

Интеллектуальный производственный комплекс, включающий робототехническую систему, предназначен для финишной обработки сложнопрофильных деталей авиационных двигателей, наземных газотурбинных установок и др. [44, 50].



Рис. 99. Робот KUKA, входящий в производственный комплекс



Рис. 100. Оптическая система контроля геометрических параметров пера лопаток

<sup>6</sup> Исследования проводились в рамках программы ФНИ государственных академий на 2013–2020 годы «Разработка методов анализа и синтеза новых классов механизмов и технологических процессов для машин новых поколений» (тема № 0049-2015-0034) и Федеральной целевой программы № 1, Государственный контракт от 15 мая 2015 года № 15411.169999.18.015 между АО «ОДК» и Министерством промышленности и торговли Российской Федерации и является составной частью НИР шифр «Фасон-Салют-НИИД».

Рассмотрим решение задачи управления шестикоординатным промышленным роботом, в котором осуществлено разделение степеней подвижности на управляемые по силе и управляющие перемещением по траектории. Для выполнения поставленной задачи вводятся дополнительные переменные параметры, определяющие положение режущей кромки на режущей поверхности. Данная задача рассматривается на примере шестикоординатного промышленного робота при выполнении операции обработки сложной поверхности. Во время обработки требуется осуществлять программное перемещение инструмента с заданной скоростью по траектории на поверхности и одновременно осуществлять управляемое давление инструмента на поверхность.

Выполнение сборочных операций промышленными роботами требует одновременного управления перемещением и заданным усилием. Многие другие технологические операции следует выполнять, регулируя также силовое воздействие. При обработке сложных поверхностей требуется выполнять перемещение по траектории с заданной скоростью по поверхности и одновременно создавать управляемую силу давления инструмента на поверхность. Сложность одновременного управления перемещением и усилием объясняется тем, что невозможно одновременно и независимо управлять перемещением и силой по одной координате. Данное утверждение объясняется из второго закона Ньютона

$$F(t) = m \cdot \ddot{q}(t) + F_n,$$

где  $F(t)$  — сила, развиваемая исполнительным приводом,  $\ddot{q}(t)$  — ускорение, развиваемое приводом,  $F_n$  — внешнее воздействие,  $m$  — масса перемещаемого объекта.

Из данного уравнения следует, что нельзя одновременно и независимо управлять силой  $F(t)$ , развиваемой приводом, и ускорением  $\ddot{q}(t)$ , соответственно скоростью  $\dot{q}(t)$  и положением  $q(t)$ . При  $q(t) = \text{const}$  можно управлять силой  $F(t)$ , создавая давление на упор, при этом будет выполняться условие  $F_n = F(t)$ . Для следящей системы, когда требуется обеспечивать программное движение  $q(t)$ , сила  $F(t)$  является переменной и формируется таким образом, чтобы обеспечивать программное движение для  $q(t)$  и противодействовать внешнему воздействию  $F_n$ .

Поэтому для роботов, имеющих взаимосвязанные степени подвижности, для выполнения силовых операций требуется распределять степени подвижности на управляемые по силе и управляемые по положению, когда одна группа степеней подвижности осуществляет позиционное управление, а другая — силовое.

#### *Управление перемещением и усилием при движении по сложной поверхности*

Автоматизация операции шлифования и полирования сложной поверхности, в частности обработка пера лопаток ГТД, возможна с использованием промышленных роботов, оснащенных силомоментными датчиками и встроенной в состав комплекса системой контроля геометрических параметров и качества обрабатываемой поверхности. В зависимости от соотношения веса обрабатываемой детали и инструмента совместно с его приводом выбирается один из способов обработки: 1. Перемещение детали, закрепляемой в захватном устройстве робота, относительно неподвижного инструмента. Выполняется, когда вес детали значительно меньше инструмента совместно с его приводом; 2. Перемещение инструмента совместно с его приводом относительно неподвижно закрепленной детали. Выполняется, когда вес инструмента совместно с его приводом значительно меньше веса детали.

Второй способ обработки применяется, как правило, при обработке гребных винтов, лопастей турбин, а также моноколес крупных ГТД. Обработка пера лопаток ГТД, как правило, выполняется новым способом, т.е. перемещением лопатки относительно неподвижного инструмента.

В качестве примера решение задачи позиционно-силового управления рассматривается для промышленного робота (рис. 101 (а)), оснащенного силомоментными датчиками, а инструмен-

том служит шлифовальный круг с торовой режущей поверхностью (рис. 101 (б)).

Использование режущего инструмента, в частности шлифовального круга, имеющего сложную режущую поверхность, позволяет выполнять операцию обработки в различных точках режущей поверхности. В данном случае одна либо несколько степеней подвижности используются для управления усилием, а для обеспечения перемещением и ориентацией исполнительного органа можно использовать дополнительные переменные параметры, определяющие положение режущей кромки на режущей поверхности инструмента, обеспечивая при этом ограниченным количеством управляемых степеней подвижности робота доступность режущей кромки инструмента ко всем точкам обрабатываемой поверхности (рис. 102).

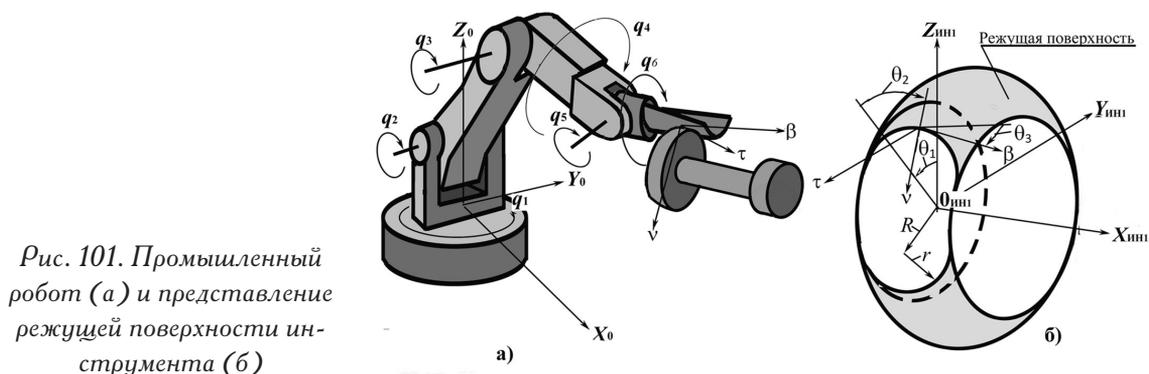


Рис. 101. Промышленный робот (а) и представление режущей поверхности инструмента (б)

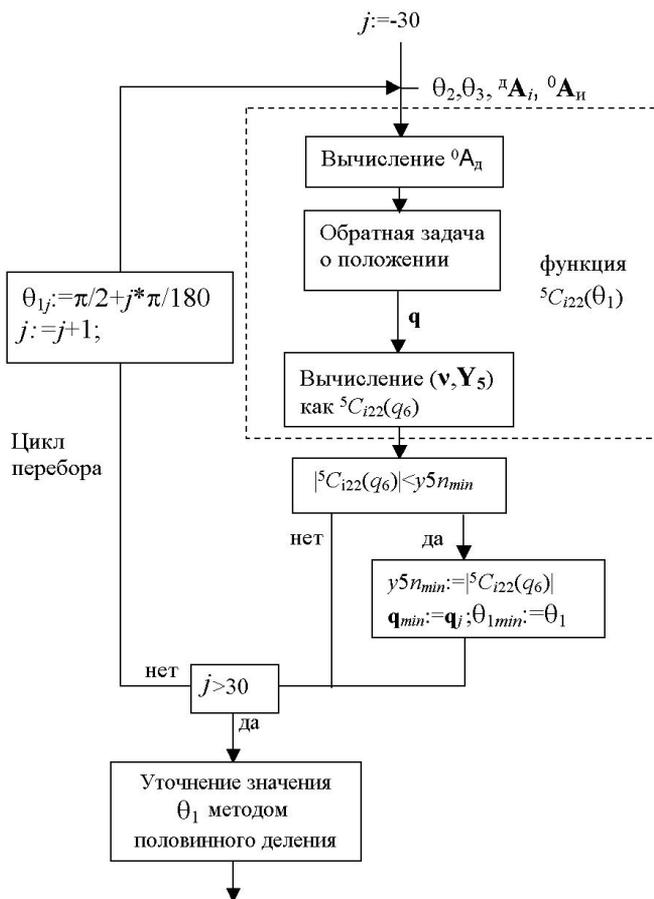


Рис. 102. Алгоритм определения управляемых координат робота

### 3.5. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТА-СТАНКА, ПОСТРОЕННОГО НА ОСНОВЕ ВРАЩАТЕЛЬНО-ЛИНЕЙНЫХ МОДУЛЕЙ

В качестве исполнительного устройства, выполняющего непосредственно обработку в составе технологического комплекса применяется либо универсальный промышленный робот, либо робот-станок. Исполнительный механизм робота-станка целесообразно строить на основе вращательно-линейных мехатронных модулей.

#### 3.5.1. ВРАЩАТЕЛЬНО - ЛИНЕЙНЫЙ МОДУЛЬ

Модуль содержит механизм винтового четырёхзвенника, представляющего собой простейший механизм параллельной структуры. Механизм (рис. 103) включает в себя основание 4, сопрягающееся вращательными кинематическими парами с ведущими звеньями: гайкой 2 и шлицевой втулкой 1, гайка сопрягается с выходным звеном 3 винтовой кинематической парой, а шлицевая втулка — поступательной кинематической парой. Итого:  $n=3$  подвижных звена и  $p_5=4$  кинематические пары.

Приводные координаты для данного модуля кинематически независимы. Если гайка неподвижна, то шлицевая втулка может вращаться на любой заданный угол, сообщая выходному звену винтовое движение с ходом резьбы гайки — угол поворота шлицевой втулки не зависит от угла поворота гайки. Если шлицевая втулка неподвижна, то гайка может вращаться на любой заданный угол, сообщая выходному звену прямолинейное поступательное движение, образуя передачу гайка-винт - угол поворота гайки не зависит от угла поворота шлицевой втулки. Таким образом, поворот гайки и поворот шлицевой втулки сообщают выходному звену разные движения, их суперпозиция может обеспечить любой заданный угол и заданное линейное перемещение выходного вала в рабочем диапазоне.

Применение таких модулей позволяет обеспечить требуемый диапазон углов, и в то же время малую инерционность подвижных звеньев. Малая инерционность достигается за счёт того, что привод линейных перемещений не должен перемещать расположенный на последующем звене вращательный привод. Эти приводы совместно перемещают выходное звено.

Мехатронный модуль (рис. 103) осуществляет управляемое перемещение выходного вала по двум независимым координатам: поступательное перемещение вдоль оси модуля осуществляется поворотом гайки при постоянном значении угла поворота шлицевой втулки, а вращательное — поворотом гайки и шлицевой втулки на одинаковый угол.

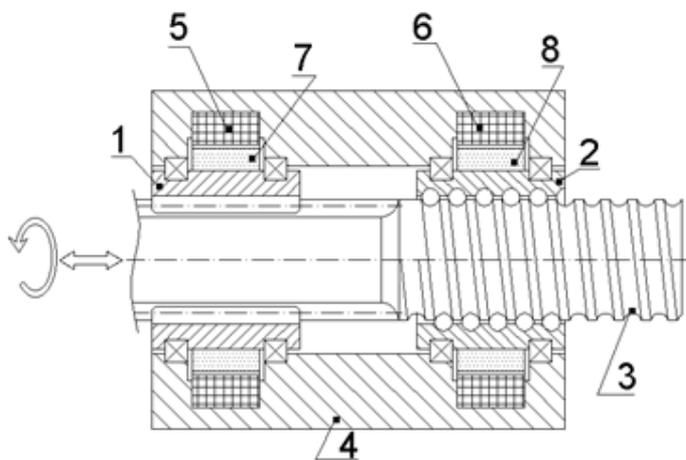


Рис. 103. Вращательно-линейный мехатронный модуль на основе прямого привода:  
1 — шлицевая втулка, 2 — гайка,  
3 — вал (выходное звено), 4 — корпус (основание модуля), 5 и 6 — обмотки, 7 и 8 — роторы на основе постоянных магнитов

### 3.5.2 РОБОТ-СТАНОК НА ОСНОВЕ ВРАЩАТЕЛЬНО-ЛИНЕЙНЫХ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

Робот-станок на основе вращательно-линейных модулей (рис.104) состоит из манипулятора перемещения детали и манипулятора перемещения инструмента. Координаты  $q_1$  и  $q_2$  относятся к вращательно-линейному модулю перемещения детали, угловая координата  $q_3$  — поворот этого модуля вокруг вертикальной оси  $Z$  вращательным приводом. Таким образом, манипулятор перемещения детали имеет три степени подвижности.

Недостатком применения таких мехатронных модулей является динамическое взаимовлияние приводов.

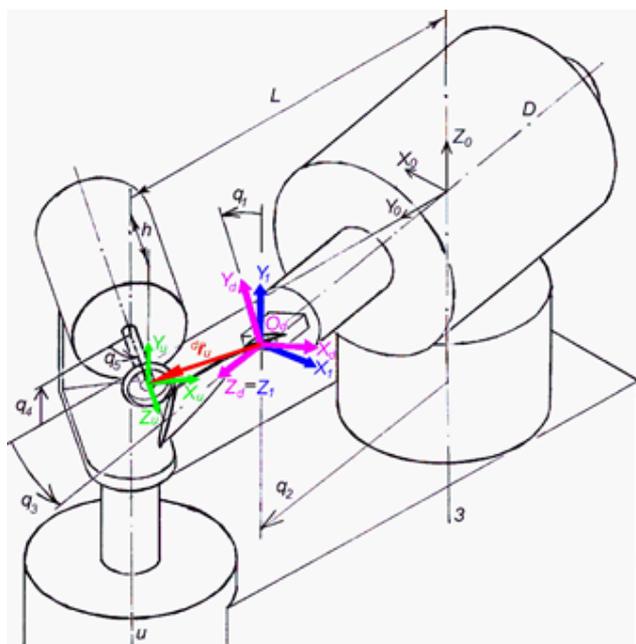


Рис. 104. Робот-станок на основе вращательно-линейных мехатронных модулей

Построение рабочей зоны для станка, обрабатывающего сложную поверхность, определяется не только положением одной точки режущей кромки в зоне достижимости, определяемой предельными перемещениями звеньев станка. Для обработки сложной поверхности необходимо обеспечивать нормаль режущей кромки к поверхности обработки, достижимость режущей поверхности инструмента ко всем точкам обрабатываемой поверхности, отсутствие касания частей инструмента непосредственно деталей станка и других выступающих частей. Поэтому построение зоны обработки следует проводить с учетом конкретной режущей поверхности инструмента и для конкретной обрабатываемой поверхности детали. Наиболее приемлемым способом в этом случае является компьютерное моделирование с проверкой всех возможных вариантов обработки для нескольких деталей, либо для детали — представителя.

#### Выводы

В результате проведенных работ были исследованы особенности технологического процесса обработки пера лопаток ГТД, сформированы требования к построению интеллектуальной экспертной системы, основанной на правилах управления технологическими комплексами финишной обработки пера лопаток.

Рассмотрены возможности использования вейвлет-преобразования в системах распознавания и управления процессом финишной обработки лопаток (геометрия-качество поверхности)

и методы позиционно-силового управления шестикоординатным промышленным роботом при обработке сложных поверхностей.

Проведен анализ и синтез динамических характеристик станочного оборудования, построенного на основе вращательно-линейных модулей.

Для осуществления перемещения инструмента во все проблемные участки пера лопаток, а также обеспечения управляемого давления на обрабатываемую поверхность, кинематическая схема промышленного робота (робота-станка) должна содержать не менее шести управляемых координат. Проведенные исследования показали, что при введении дополнительных неуправляемых параметров, определяющих переменное положение режущей кромки инструмента на обрабатываемой поверхности можно обеспечивать перемещение детали относительно инструмента, используя только пять управляемых координат шестикоординатного робота (робота-станка), а приводом одной из координат обеспечивать программное усилие давления на обрабатываемую поверхность.

Основное требование к системе контроля поверхности пера лопатки — это требование обеспечивать доступность контроля всех участков пера лопатки. Для выполнения данных операций целесообразно использовать дистанционные оптические системы, обладающие достаточным требованием по точности (суммарная погрешность не должна превышать 10 мкм). Обработка оптического сигнала с помощью вейвлет-преобразования позволяет получать изображения поверхностей и оценку их качества.

#### **4. ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ С ЧПУ**

Для решения задач нового вида, связанных с диагностикой автоматизированного оборудования, мониторингом и прогнозированием технического состояния механизмов, узлов и систем металлорежущих станков в ИМАШ РАН разработаны компьютеризированные приборные комплексы, оснащенные датчиками, специальным программным обеспечением, включающим алгоритмы искусственного интеллекта, средствами автоматического сбора и обработки информации.

Исследование и диагностирование оборудования проводились на всех этапах жизненного цикла: при проектировании, стендовых испытаниях, эксплуатации в производственных условиях, модернизации, до и после ремонта.

На основании проведенных исследований были разработаны методики диагностирования узлов металлорежущих станков. Каждая из методик представляет собой набор автоматизированных процедур, базирующихся на уникальных методах контроля, диагностики и расчета узлов станков.

Автоматизированные процедуры реализованы с использованием аппаратно-программных комплексов, позволяющих определить большое количество дефектов конкретных узлов станка и инструмента, представляющих опасность с точки зрения отказов оборудования [12].

Основной аппаратно-программного комплекса является система сбора данных с набором датчиков, измерительных приборов и вторичных блоков преобразования сигналов. Все датчики через блоки-преобразователи (АЦП) с USB-интерфейсом подключены к компьютеру, оснащенный комплект специализированных программных средств.

Комплект программ условно делится на две части: одна из них предназначена для предварительной обработки поступающих с датчиков сигналов, другая — обеспечивает диагностику узла станка на основе моделирования и необходимых расчетных процедур.

Отличительной особенностью методики ИМАШ РАН от зарубежных и отечественных методических разработок (компании «Брюль и Кьер», SKF, Дيامех-2000, ВИЭМ и другие)

является комплексный подход к диагностике, основанный на контроле и анализе всех основных параметров узла станка; использование эвристических интеллектуальных алгоритмов и программ на основе «деревьев отказов», раскрывающих причинно-следственные связи физических явлений и отказов; оценка качества изготовления, сборки и ремонта узла на основе обобщенного квалиметрического показателя.

Использование методов диагностирования и применения аппаратно-программных комплексов показано на примере методики для диагностирования шпиндельных узлов станков. В настоящее время этот инструментарий позволяет диагностировать шпиндельные узлы с опорами на подшипниках качения, которые широко применяются в конструкциях обрабатывающих центров, агрегатных, расточных, фрезерных и других станках среднего типоразмера [17].

Перечень контролируемых диагностических параметров, охватываемых методикой ИМАШ, приведен на рис. 105.

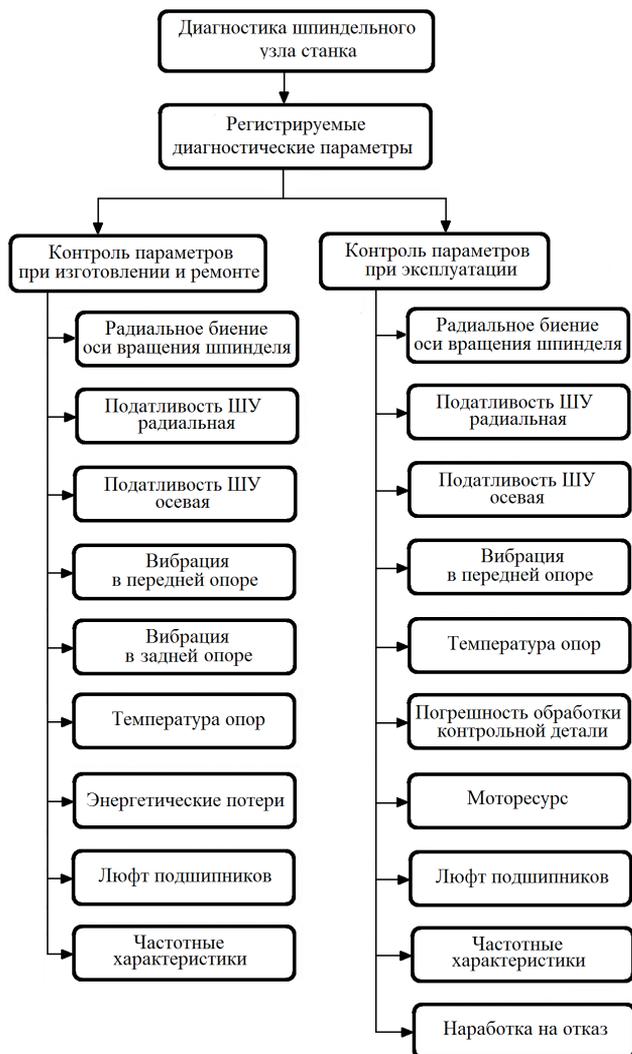


Рис. 105. Диагностические параметры шпиндельного узла (ШУ)

Для исследования и разработки процедур контроля диагностических параметров шпиндельного узла (ШУ) изготовлен испытательный стенд, состоящий из стендовой установки (в виде малогабаритного токарного станка) и аппаратно-программного комплекса.

### Система сбора данных ССД-01 ИМАШ

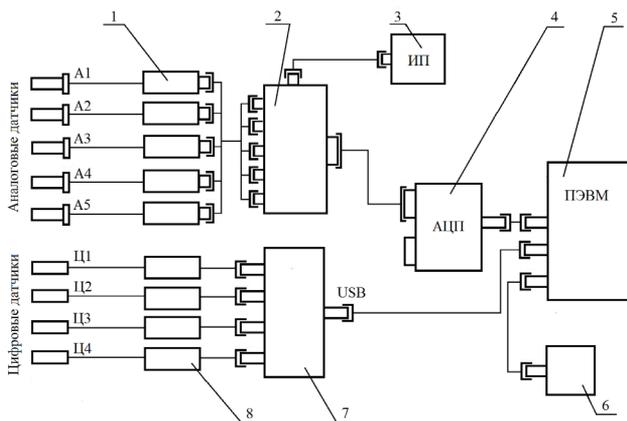


Рис. 106. Аппаратура системы ССД-01 ИМАШ

1 – плата элементов аналогового источника питания; 2 – блок питания аналоговых датчиков; 3 – источник питания; 4 – аналого-цифровой преобразователь; 5 – персональный компьютер; 6 – принтер; 7 – конвертор USB; 8 – электронные блоки цифровых датчиков

Система сбора данных ССД-01 ИМАШ представляет собой комплекс средств, состоящий из набора датчиков и измерительных приборов (рис. 106), вторичных блоков преобразования сигналов и портативного компьютера, оснащенного комплектом специализированных программных средств. Особенностью аппаратной части комплекса является возможность использования датчиков разного вида – аналоговых, цифровых и интеллектуальных с интерфейсом USB (рис. 107).

Комплект специализированных программных средств, обеспечивающих предварительную обработку поступающих с датчиков сигналов и диагностику узла на основе необходимых расчетных процедур, написан на языках C++ и VBA, а его программный интерфейс создавался исходя из удобства работы пользователя-инженера [36].



Прибор для измерения нагрузок (сил) ДСТ5.2 с цифровым табло RSF-2R2



Виброанализатор «Вибран-2.1» с датчиком ВД06А



Прибор для измерения температуры AR37



Датчик микроперемещений М-022-02



Датчик вибрации (акселерометр) ВД06А



Тахометр SM8238



Токовихревой бесконтактный датчик AE 051



Тепловизор FlirC2



Цифровой термометр MP512

Рис. 107. Измерительные приборы и датчики

Далее представлены методы измерения и контроля различных параметров ШУ.

#### 4.1. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ

##### *Измерение радиального биения шпинделя*

В шпиндель (трехлапчатый патрон) устанавливается деталь-заготовка с небольшим вылетом на длину  $50 \div 60$  мм и обтачивается для подготовки базовой поверхности контроля радиального биения, т.е. получается «очищенная» от погрешности установки базовая поверхность (рис. 108, 109).

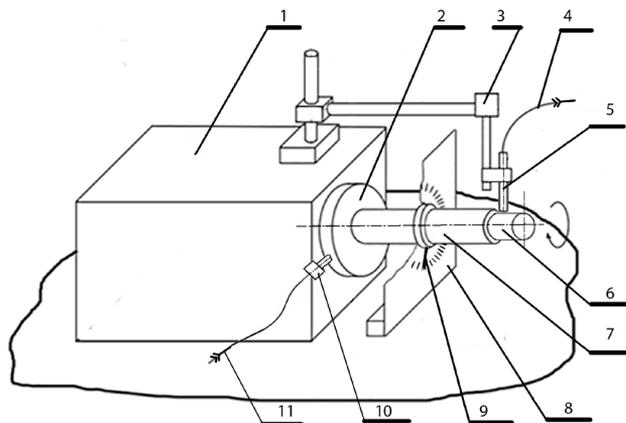


Рис. 108. Схема измерения биения шпинделя

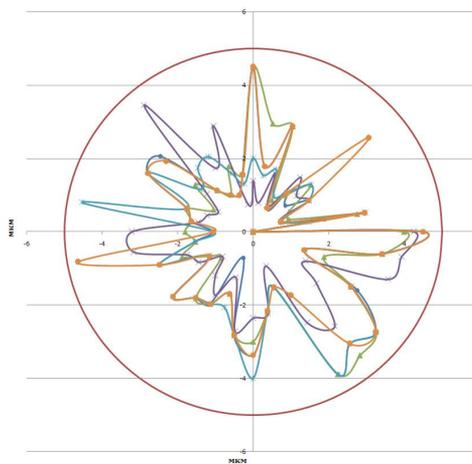
- 1 – корпус ШУ; 2 – шпиндель; 3 – инструментальная стойка;
- 4 – линия связи 1; 5 – датчик микроперемещений; 6 – базовая поверхность; 7 – деталь-заготовка;
- 8 – экран с угловой шкалой;
- 9 – указатель; 10 – датчик угла поворота; 11 – линия связи 2



*Рис. 109. Стендовая установка и приборы*

Шпиндель (вручную) поворачивается вокруг своей оси, при этом проводится измерение микроперемещений и угла поворота. На основе полученных результатов строится "График биения шпинделя" за один оборот.

Можно провести несколько аналогичных экспериментов и получить обобщённую картину биения шпиндельного узла. На графике показаны значения биения шпинделя при пяти оборотах (рис. 110).



*Рис. 110. График биения шпинделя при пяти оборотах*

### *Измерение температуры шпиндельного узла*

Температура измеряется с помощью ручного прибора AR37 в той области, которую подсвечивает встроенная в данном приборе лазерная указка. Измерения проводятся при холостом вращении и при осевой нагрузке в зоне передней опоры шпинделя (рис. 111).



*Рис. 111. Измерение температуры передней опоры шпиндельного узла*

По полученным с помощью периодически выполненных измерений данным строится график температурной характеристики шпиндельного узла (рис. 112).

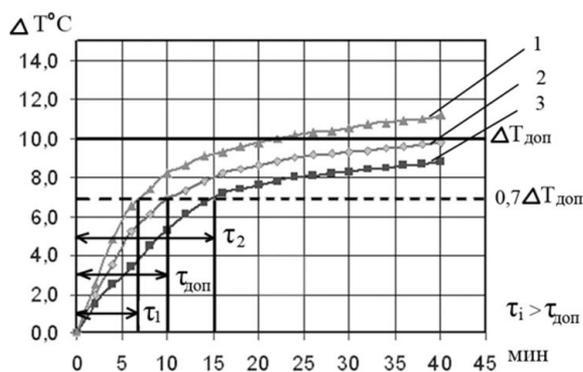
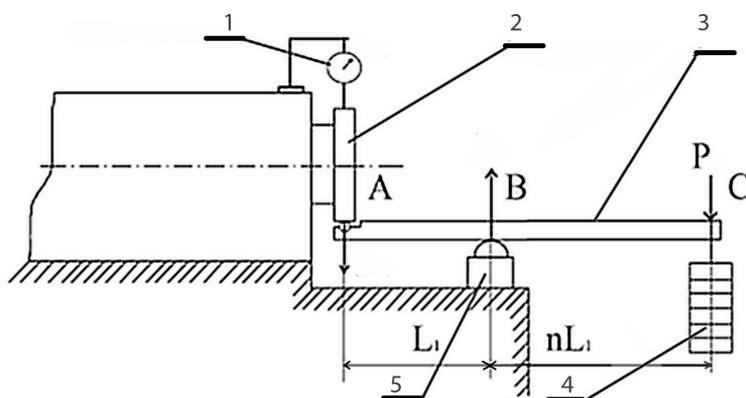


Рис. 112. Температурная характеристика ШУ  
1 – перегрев; 2, 3 – допустимый нагрев

### Измерение жесткостных параметров шпинделя

Рис. 113. Схема измерения жесткостных параметров шпинделя

1 – датчик микроперемещения; 2 – шпиндель; 3 – рычаг; 4 – грузы; 5 – датчик силы



В тех случаях, когда установить приборы и непосредственно нагрузить шпиндель не представляется возможным, сила нагружения ШУ создаётся с помощью рычага и набора тарированных грузов. При этом контролируется сила, возникающая на опоре рычага помощью датчика силы ДСТ5.2. Сила нагружения шпинделя рассчитывается на основе уравнения моментов схемы нагружения. Смещение фланца шпинделя измеряется датчиком микроперемещений М-022-02 (рис. 113, 114).



Рис. 114. Измерение жесткостных параметров шпинделя

По полученным данным строится график смещения шпинделя в зависимости от приложенной силы и рассчитываются жёсткость  $J_{ш}$  и податливость  $W_{ш}$  ШУ (рис. 115).

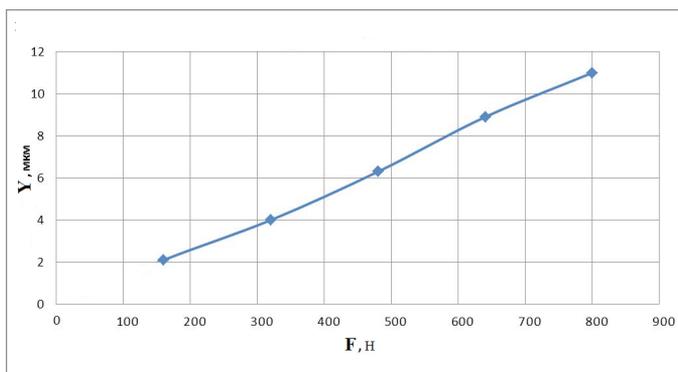


Рис. 115. График смещения шпинделя при нагружении радиальной силой  
 $F$  – усилие нагружения (Н),  $Y$  – смещение шпинделя (мкм)

Полученные данные сравниваются со значениями смещений, рассчитанными с помощью программы «Шпиндель», которая позволяет оценивать состояние шпиндельного узла по параметрам податливость/жёсткость.

*Методика проверки зависимости жёсткости (податливости) ШУ от угла поворота шпинделя и от направления действия нагружающей силы*

Радиальная жёсткость (податливость) разных шпиндельных узлов одной и той же модели не однородна и может изменяться до 200%, кроме того зависит от углового положения шпинделя (угла поворота), а также от направления (угла) действия нагружающей силы.

У серийных узлов изменения этого показателя могут превышать 30%. Показатели  $J_{ш}$  и  $W_{ш}$  определяются по нагрузочной ветви характеристики силовых смещений шпинделя при максимальном значении нагружающей силы как среднее арифметическое значение серии результатов измерения.

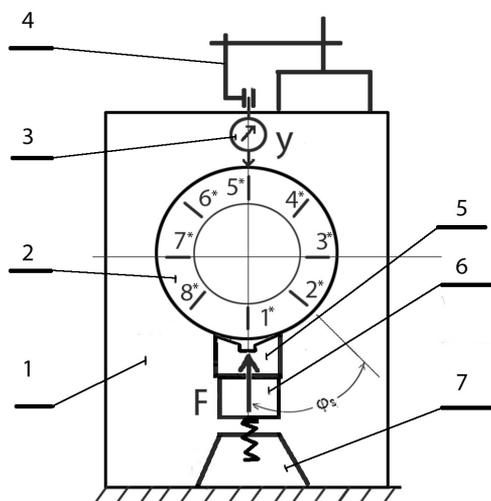


Рис. 116. Схема проверки зависимости  $J_{ш}(\varphi_s)$  от углового положения шпинделя  
 1 – корпус ШУ; 2 – шпиндель; 3 – датчик перемещения; 4 – инструментальная стойка; 5 – центрирующая призма; 6 – датчик силы; 7 – нагружающее устройство;  
 1°, 2° ...8° – метки углового деления.

При стендовых испытаниях проверяется зависимость  $J_{ш}(\varphi_s)$  и  $W_{ш}(\varphi_s)$  от угла поворота шпинделя (рис. 116) и от направления (угла) действия нагружающей силы  $F$  (рис. 117). Поскольку жёсткость (податливость)  $J_{ш}$  является векторной величиной, измерение смещений шпинделя  $Y$  всегда проводится в направлении действия нагружающей силы.

При проверке зависимости жесткостных показателей шпиндель поворачивается вокруг своей оси на один оборот и последовательно через каждые  $45^\circ$  проводится нагружение силой  $F$  и измерение смещения  $Y$  шпинделя. Значительный разброс результатов измерения податливости по углу поворота (более 20%) указывает на погрешности монтажа внутреннего кольца подшипника и погрешности изготовления посадочной поверхности шпинделя.

При проверке зависимости жесткостных показателей от направления действия нагружающей силы изменяется направление действия нагружающей силы относительно положения наружного кольца подшипника передней опоры (корпусной детали ШУ). При этом измеряются смещение шпинделя и рассчитываются зависимости  $J_{ш}(\varphi_n)$  и  $W_{ш}(\varphi_n)$ . Результаты проверки представляются в виде круговой диаграммы (рис. 118). Максимальное предельно допустимое значение радиальной податливости  $\max W_{ш}(\varphi_n)$  в серии измерений рассчитывается по формуле:

$$\max W_{ш}(\varphi_n) = \bar{W}_{ш}(\varphi_n) + 2\sigma,$$

где  $\bar{W}_{ш}(\varphi_n)$  – среднее арифметическое значение результатов серии измерений;  $\sigma$  – средняя квадратическая погрешность результата (допустимое значение радиальной податливости на диаграмме показано в виде окружности).

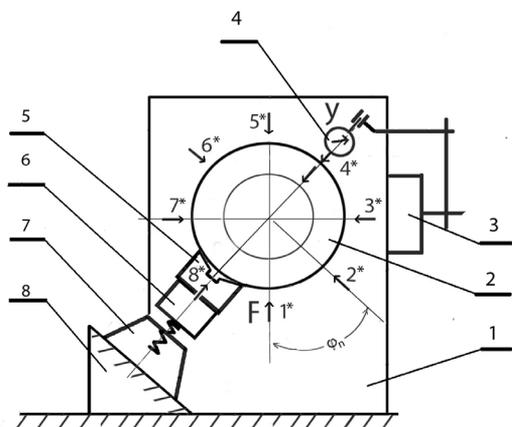


Рис. 117. Схема проверки зависимости жёсткости шпинделя  $J_{ш}(\varphi_n)$  от направления действия нагружающей силы

1 – корпус ШУ; 2 – шпиндель; 3 – инструментальная стойка; 4 – датчик перемещения; 5 – центрирующая призма; 6 – датчик силы; 7 – нагрузочное устройство; 8 – угловое приспособление; 1\*, 2\* ... 8\* – метки углового деления

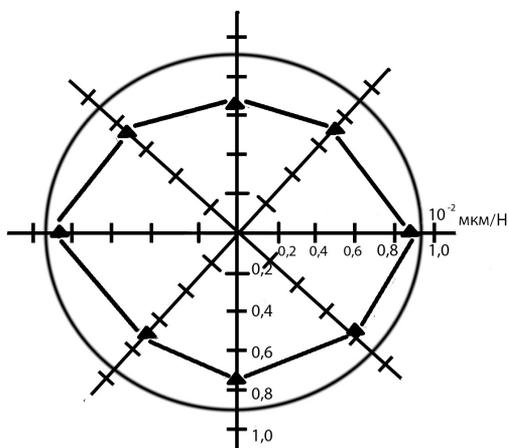


Рис. 118. Круговая диаграмма радиальной податливости шпиндельного узла  $W_{ш}(\varphi_n)$

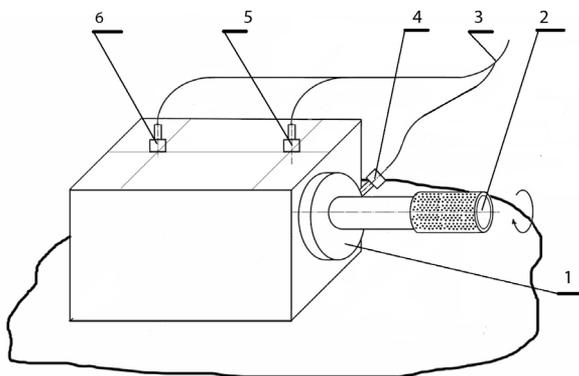
Превышение допустимых значений и значительный разброс результатов указывает на погрешность изготовления посадочной поверхности корпуса ШУ и погрешности монтажа наруж-

ного кольца подшипников передней опоры шпинделя.

Указанные две операции контроля зависимостей  $W_{ш}(\varphi_s)$  и  $W_{ш}(\varphi_n)$  позволяют получить информацию не только о состоянии конкретного узла, но и характеризуют также весь технологический процесс изготовления и сборки ШУ на предприятии.

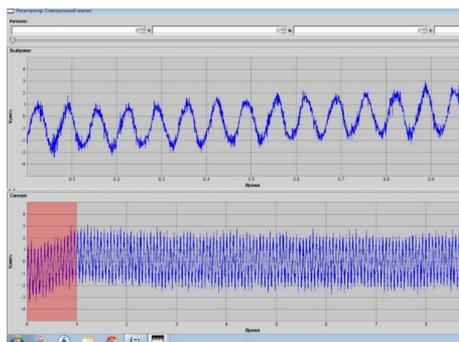
### *Измерение вибрации шпиндельного узла на холостом ходу*

Схема размещения датчиков при измерении параметров вибрации показана на рис. 119. Датчики — акселерометры ВД06А устанавливаются на верхнюю часть корпуса шпиндельного узла в контрольных точках у передней опоры и у задней опоры шпинделя. Датчики подключаются к анализатору вибрации ВИБРАН-2.1, который подсоединяется к компьютеру через USB-интерфейс.

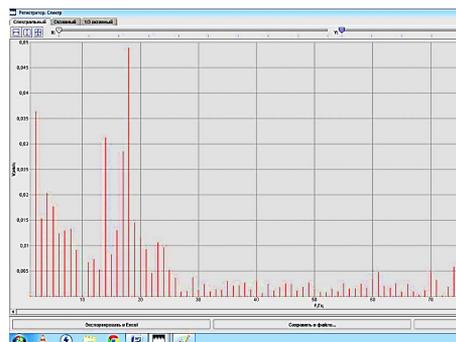


*Рис. 119. Схема измерения вибрации  
1 — шпиндель; 2 — инструмент; 3 — линии связи; 4 — датчик угловой скорости; 5 — датчик-акселерометр передней опоры; 6 — датчик-акселерометр задней опоры.*

Обработанные программой данные представляются в виде графиков временного сигнала и частотного спектра (рис. 120, 121).



*Рис. 120. График временного сигнала вибрации*



*Рис. 121. График частотного спектра*

### *Измерение вибрации шпиндельного узла под нагрузкой*

При измерениях в шпиндель устанавливается вращающийся центр. Датчик акселерометр ВД06А устанавливается на верхнюю часть корпуса у передней опоры шпиндельного узла и подключается к анализатору вибрации ВИБРАН-2.1, который подключается к компьютеру с интерфейсом USB.

При нагружении радиальная сила (на примере токарного станка) создается с помощью механизма поперечной подачи каретки станка. Датчик силы устанавливается с помощью специальной оснастки в резцедержку каретки (рис. 122).

При нагружении шпинделя осевой силой датчик силы устанавливается между зажимным приспособлением (задней бабкой) станда и вращающимся центром, зажимается, передавая заданную осевую силу на вращающийся шпиндель (рис. 123, 124).

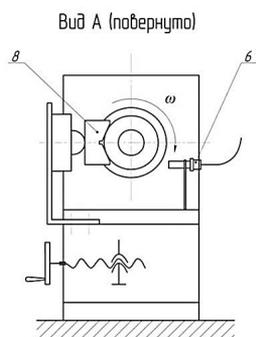
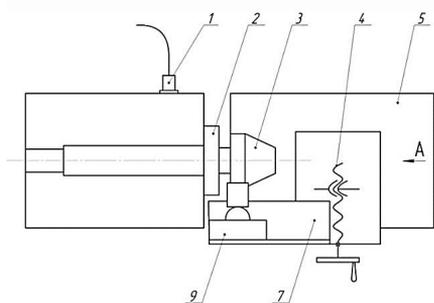


Рис. 122. Схема измерения вибрации при нагружении шпинделя радиальной силой

1 – датчик вибрации; 2 – шпиндель; 3 – вращающийся центр; 4 – механизм поперечной подачи каретки; 5 – суппорт станка; 6 – датчик угловой скорости; 7 – кронштейн; 8 – призма; 9 – датчик силы

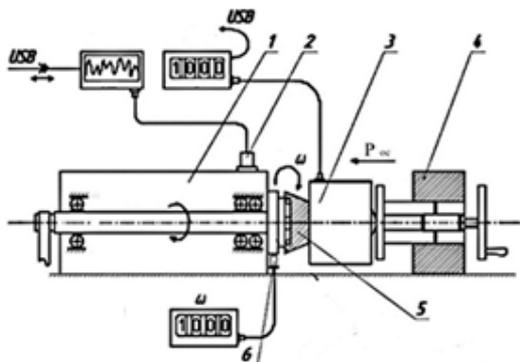


Рис. 123. Схема измерения уровня вибрации ШУ при нагружении осевой силой

1 – шпиндельный узел; 2 – датчик вибрации; 3 – датчик силы; 4 – нагрузочное устройство; 5 – вращающийся упор; 6 – датчик угловой скорости

Предлагаемые методика и процедуры диагностики разработаны с учетом их применения как для производственных условий (цеховых проверок) и мониторинга в условиях действующего производства, так и для испытаний ШУ на специальном стенде, на котором проводится обкатка и контроль качества ШУ после ремонта.

#### 4.2. УСТРОЙСТВО ОПЕРАТИВНОЙ ВИБРОДИАГНОСТИКИ СТАНКОВ ВК-1И

Разработано устройство ВК-1И для оперативной диагностики шпиндельных узлов с подшипниками качения и оценки виброустойчивости станков при резании (рис. 125). Разработка базируется на результатах натурных исследований станков с ЧПУ разного вида, в том числе токарных, профилешлифовальных и обрабатывающих центров.

В составе устройства используются микропроцессорный модуль, датчики вибраций и угловой скорости. Система отслеживает вибрацию шпиндельного узла и системы «инструмент - деталь» при резании, развитие дефектов подшипников и обеспечивает защиту станка от аварийного разрушения. Разработаны оригинальные методы диагностики подшипников качения, которые используются в программном обеспечении системы.

Устройство ВК-1И может функционировать в двух режимах: «диалог» – по запросу оператора, и «автомат» – при непрерывном наблюдении за объектом диагностики (станком, агрегатом, механизмом и т. д.), а также может использоваться автономно или быть частью системы электроавтоматики станка. Оно позволяет управлять станком при возникновении аварийной ситуации. Для этого в модуле предусмотрено силовое реле для передачи сигналов в систему управления диагностируемого объекта.



Рис. 124. Измерение вибрации шпиндельного узла при нагружении осевой силой



Рис. 125. Комплекс приборов для оперативной диагностики шпиндельных узлов

Устройство содержит шину USB для обмена информацией с компьютером высшего ранга.

Система осуществляет постоянное наблюдение за состоянием объекта, а для более глубокого диагностирования производится периодическое считывание данных из ОЗУ модуля на компьютер (ноутбук), подключенный к компьютерной

сети, для прогнозирования состояния ШУ, принятия командных решений и управления состоянием диагностируемого оборудования.

Макетный образец системы, в котором реализованы методика диагностики и программы обработки вибрационных сигналов ШУ отлажен и проходит стадии лабораторных и цеховых испытаний с целью наполнения базы данных для оперативной диагностики ШУ и прогнозирования их ресурса.

### Программа «Шпindelь»

Компьютерная программа «Шпindelь» является основной частью документооборота, сопровождающего контроль состояния и качества ремонта шпиндельных узлов станков. Программа предназначена для использования сотрудниками службы Главного механика завода, выполняющих контроль качества шпиндельных узлов станков при ремонте и эксплуатации.

Программа позволяет проводить расчёт податливости шпиндельных узлов, сравнивать расчетные и экспериментальные данные и диагностировать узлы по результатам контрольных проверок (рис. 126).

Применение этой программы позволяет создать базу данных, содержащую информацию о качестве принятых конструктивных решений, качестве выполнения ремонтных работ и даёт возможность обоснованно проводить модернизацию, в том числе импортозамещением — замену импортных деталей и комплектующих изделий отечественными.

База данных о состоянии проверяемых шпиндельных узлов может также использоваться сотрудниками отдела Главного механика завода для сравнительной оценки надёжности узлов различных фирм, выяснения причин отказов и для подготовки предложений по повышению эксплуатационной надёжности этих узлов.

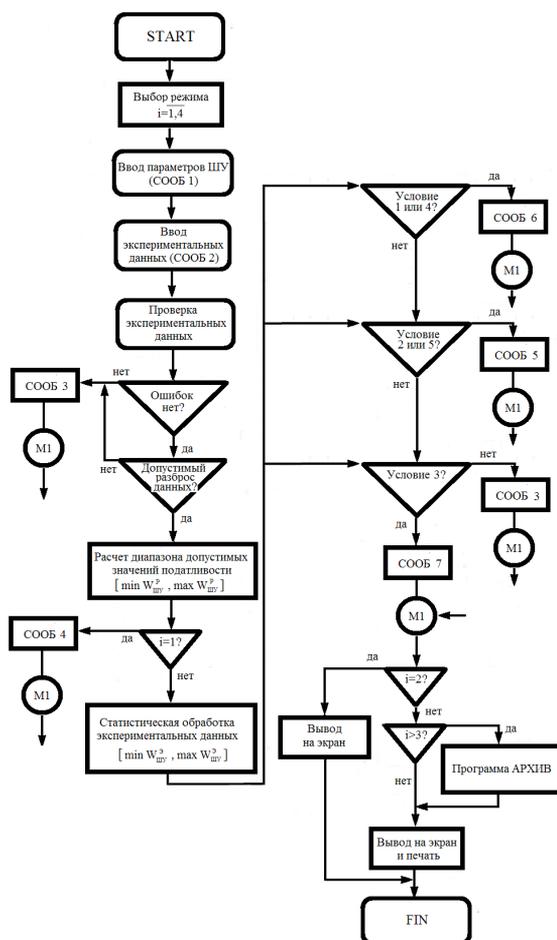


Рис.126. Блок-схема алгоритма программы «Шпindelь»

## 5. ПРИМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ДЛЯ ВЫБОРА И ОБОСНОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Особенностью применения структурного анализа и синтеза является кластеризация вариантов технических решений, сгенерированных с помощью морфологического подхода, и последующий анализ сформированных кластеров с учетом многокритериальности задачи поиска технических решений. Для отбора критериев оценки вариантов технических решений и степени их влияния на функционал конкретного решения использован аппарат экспертных оценок. Применение предложенного подхода позволяет упорядочить структуру решаемой задачи, облегчить поиск и оценку инновационных решений, а также обеспечить обоснованный выбор наиболее рациональных вариантов решения. Морфологические методы используют комбинаторное генерирование по возможности более широкого спектра потенциально допустимых альтернатив — так называемого морфологического множества решений [40, 37].

Так, например, разработанный подход использовался для выбора и обоснования технологий изготовления полых валов из жаропрочных сплавов в изотермических условиях, а также выборе технических решений финишной обработки лопаток в авиадвигателестроении.

Для оценки вариантов при помощи экспертных оценок была составлена морфологическая матрица. Любой набор элементов всех признаков технологий изготовления заготовок для полых валов (по одному из каждой строки морфологической матрицы) представляет собой возможный вариант технологии изготовления заготовок полых валов ГТД. Мощность морфологического множества равна 1728 вариантов.

Были сгенерированы 480 вариантов и отобрано 120 для дальнейшей кластеризации. Все варианты были рассчитаны на меру сходства. Из 120 сгенерированных и отобранных вариантов были сформированы 18 кластеров, содержащие похожие технические решения и рассмотрены кластеры с опорными решениями.

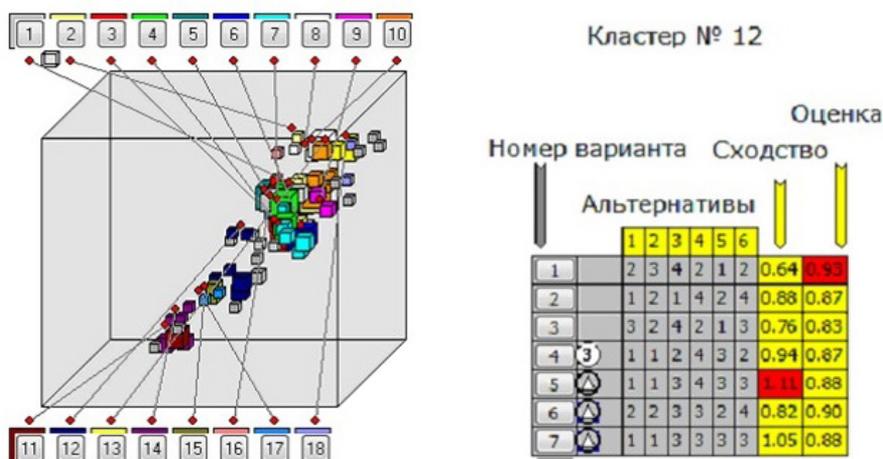


Рис.127. Расположение кластеров в морфологическом поле решений

Рассматриваемые технологии являются современной альтернативой применяемых в настоящее время процессов при изготовлении валов в России и в зарубежных компаниях. Основные качественные показатели технических решений — это существенное увеличение коэффициента использования металла в 2÷3 раза, повышение механических свойств на 10÷15%, снижение энергоемкости за счет использования для формообразования деталей оборудования меньшей мощности.

Также подход использовался для синтеза и оценки технологии для выполнения высокопроизводительной финишной операции обработки поверхностей лопатки ГТД с учетом особенностей геометрии детали.

Для поиска перспективных вариантов технических решений для финишной обработки лопаток ГТД была разработана морфологическая таблица ММ. Любой набор альтернатив всех признаков (по одному из каждой строки морфологической таблицы) представляет собой возможный вариант исполнения технологии (таблица); при этом мощность морфологического множества составляет 559872 (варианта).

На рис. 128 представлены некоторые возможные технические решения, синтезированные на основе морфологического анализа задачи поиска перспективных вариантов технических решений для финишной обработки лопаток ГТД и других деталей, имеющих сложнопрофильные поверхности.

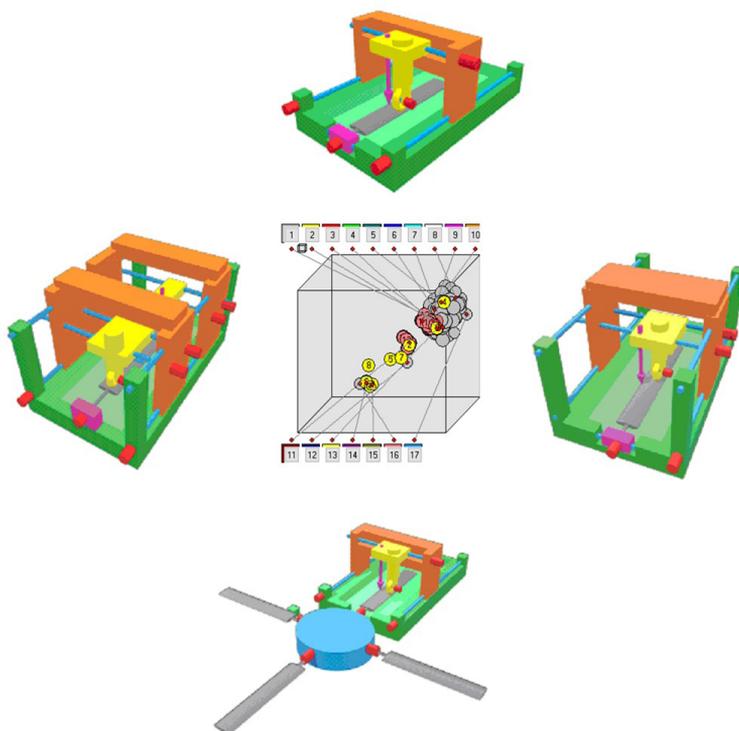


Рис. 128. Технические решения при проектировании оборудования финишной обработки деталей ГТД

### *Морфологическая матрица для выбора технических решений высокопроизводительной финишной операции обработки поверхностей лопатки ГТД*

Исследованные варианты обладают высокими оценками выбранной целевой функции, что позволяет сделать заключение о высоких технико-экономических показателях соответствующих технических решений.

Предложенный подход позволил формализовать решение задачи структурного синтеза технической системы, отвечающей требованиям ТЗ, расширить множество анализируемых технических решений и упорядочить поиск наиболее рациональных.

Разработанный подход позволяет проводить поиск инновационных технических решений [52], формировать кластеры вариантов, генерировать множество рациональных вариантов и осуществлять выбор и оценку решений для последующего моделирования.

Признаки	Альтернатива 1	Альтернатива 2	Альтернатива 3	Альтернатива 4
Осуществление движения для финишной обработки	Обрабатывающий инструмент	Стол	Обрабатывающий инструмент и стол	
Измерительный модуль	Оптический	Механический	Комбинированный	
Обрабатывающий инструмент	Лента	Круг	Тор	Конусная фреза типа "морковка"
Степень свободы обрабатывающего инструмента	1	2	3	Больше трех (повороты)
Расположение основания портала	Горизонтальное	Вертикальное		
Вращение детали относительно продольной оси	Нет	Есть		
Вращение детали относительно поперечной оси	Нет	Есть		
Схема	Куб	Портальная	Консоль с инструментальной головкой	
Поддержка концевой части лопатки	Есть	Нет	Вариант может выбираться	
Контроль поверхности	Полный	Выборочный (только по зонам)	Интерактивный (по ходу обработки)	
Относительное расположение измерительного модуля и каретки	На одной платформе	На двух платформах		
Количество обрабатываемых деталей	1	2	3 и больше (лепестковое устройство)	
Измерения	Шероховатость	Макрогеометрия	Комбинированный	

## Заключение

Результаты выполненных НИОКР и дальнейшее развитие фундаментальных и прикладных исследований в области создания высокоэффективных производственных технологий изготовления из новых жаропрочных сплавов ответственных деталей ГТД методом раскатки в сверхпластических условиях, финишной обработки сложнопрофильных поверхностей лопаток и др. соответствуют приоритетам «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642, п. 20а:

«... переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта».

Коллективом научных сотрудников лаборатории управления технологическими процессами и системами для реализации этих целей создан научно-технический задел, включающий: 14 отчетов, 5 монографий, более 60 научных статей, в т.ч. 22 опубликованы в журналах Scopus и Web of Science, получено 11 патентов, защищены 2 диссертационные работы, сделано 15 докладов на международных научно-технических конференциях, получено 12 дипломов на международных выставках («Импортозамещение», «Технофорум», «Металлообработка» в 2015-2018 гг.).

## Литература

### Журналы

1. Afonin V.L., Kondrat'ev I.M., Nazarov R.A. Automatic tool to part motion path generation for turbine-blade machining // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2015. – Т. 44, №7. – С. 593-602.

DOI: 10.3103/2FS105261881507002X

2. Sukhorukov R.Y., Sidorov A.A., Utyashev F.Z., Ibragimov A.R. The determination of power characteristics of isothermal roll formation of critical parts of gas-turbine engines // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2015. – 44(8). – С. 737-743.

DOI: 10.3103/S1052618815080075

3. Afonin V.L., Baryshnikov N.V., Zhivotovsky I.V., Sukhorukov R.Y., Utyashev F.Z. Optical system for controlling the profile of a roll-formed gas turbine engine disk // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2015. – 44 (8). – С. 710-719.

DOI: 10.3103/S1052618815080099

4. Mukhtarov S.K., Utyashev F.Z., Sukhorukov R.Y. Influence of the deformational heat treatment on the structure and mechanical properties of nickel-iron alloy // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2015. – 44 (1). – С. 33-39.

DOI: 10.3103/S1052618815010070

5. Utyashev F.Z., Sukhorukov R.U., Nazarov A.A., Potekaev A.I. The Values of Strain Components and Their Role in Formation of Ultrafine-Grained and Nanosized Structure in Materials by Means of Severe Plastic Deformation // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Fizika*. – January, 2015. – No. 1. – С. 64–71.

DOI: 10.1007/s11182-015-0464-2

6. Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю., Гаврилина Л.В. Анализ и оценка технологий и оборудования для изготовления заготовок длинномерных полых валов газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых и титановых сплавов на базе морфологического подхода // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. – 2015. – № 4.

– С. 136-143.

7. Сухоруков Р.Ю., Сидоров А.А., Утяшев Ф.З., Ибрагимов А.Р. Определение силовых параметров процесса изотермической раскатки ответственных деталей газотурбинных двигателей // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2015. – № 1. – С. 116-122.

8. Sukhorukov R.Y., Sidorov A.A., Alimov A.I., Mukhtarov S.K., Utyashev F.Z. Physical and numerical modeling of the process of rolling off of a tapered shaft of aviation purpose // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2016. – 45 (6). – С. 538-545.

DOI: 10.3103/S1052618816060121

9. Burlakov I.A., Valitov V.A., Ganeev A.A., Sukhorukov R.Y., Utyashev F.Z. Modeling the structure formation during hot deforming the billets of the parts of gas-turbine engines made of heat-resistant nickel alloy // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2016. – 45 (5). – С. 469-475

DOI: 10.3103/S105261881605006X

10. Utyashev F.Z., Sukhorukov R.Y., Samarukov G.V., Nagimov M.I. Specific features of rolling of shaft of gas turbine engine under conditions of superplasticity // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2016. – 45 (1) – С. 65-71.

DOI: 10.3103/S105261881601012X

11. Utyashev F., Mulyukov R., Sukhorukov R., Valitov V. New technologies development and equipment for local shape-forming of the complicated parts made of heat-resistant alloys under superplastic deformation conditions // *Materials Science Forum "12<sup>th</sup> International Conference on Superplasticity in Advanced Materials, ICSAM 2015; Tokyo; Japan"*. – 2016. – 838-839. – С. 615-620.

DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.838-839.615

12. Шитов А.М. Диагностические методы и модели шпиндельных узлов станков // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2016. – № 1. – С. 43-50.

13. Бурлаков И.А., Валитов В.А., Ганеев А.А., Забельян Д.М., Морозов С.В., Сухоруков Р.Ю., Утяшев Ф.З. Моделирование структурообразования в процессе горячей деформации заготовок деталей ГТД из жаропрочного никелевого сплава // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2016. – № 5. – С. 94-101.

14. Асфандияров Р.Н., Рааб Г.И., Семенов В.И. Моделирование процесса ротационного обжатия в условиях больших деформаций // В сборнике: Нефтегазовые технологии и новые материалы. Проблемы и решения. Сборник научных трудов. – Уфа, 2016. – С. 398-404.

15. R.V. Shakhov, M.I. Nagimov, Sh.Kh. Mukhtarov, F.Z. Utyashev, R.U. Sukhorukov, A.A. Sidorov. Numerical simulation of superplastic roll-forming of a hollow shaft out of nickel-based superalloy // *Materials physics and mechanics*, №33. – 2017. – С. 171-177.

16. M. I. Nagimov, Sh. Kh. Mukhtarov, G. I. Raab, R. Yu. Sukhorukov, F. Z. Utyashev. Constructive-Technological Features of a Rotary Drawing of Geometrically Complex Hollow Shafts for Gas Turbine Engines // *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*. – 2017. – No. 6. – С. 84-91.

DOI: 10.3103/S1052618817060103

17. Шитов А.М., Кондратьев И.М. Разработка и применение комплексных методов диагностики технологического оборудования // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2017. – № 1. – С. 128-132.

18. Rakov D., Thorbeck J., Pecheykina M. Design and Modeling of Adaptive Noise Suppression Systems with Morphological Approach // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2018. – Т. 658. – С. 266-273.

DOI: 10.1007/978-3-319-67349-3\_25

19. Klimenko B., Rakov D. *Analysis and Synthesis of Innovative Engineering Solutions and Technologies Based on Advanced Morphological Approach* // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2018. – Т. 658. – С. 274-283.

DOI: 10.1007/978-3-319-67349-3\_26

### **Монографии**

20. Утяшев Ф.З., Рааб И.Г. *Деформационные методы получения обработки ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов*. – Уфа: Гилем, НИК Башк.энцикл., 2013. – 376 с. ISBN: 978-5-88185-115-6

21. Афонин В.Л. *Вейвлет-преобразования в системах управления* // Издательство LAP LAMBERT Academic Publisheng. – 2015. – 90 с. ISBN: 978-3-659-75274-2

22. Афонин В.Л. *Интеллектуальные технологические системы* // Издательство LAP LAMBERT Academic Publisheng. – 2015. – 195 с. ISBN: 978-3-659-79311-0

23. Афонин В.Л., Макушкин В.А. *Интеллектуальные робототехнические системы. Учебное пособие* // Издательство: Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ). – Москва, 2016. ISBN: 5-9556-00024-8.

24. В. Л. Афонин, Ю. В. Илюхин. *Интеллектуальное управление в робототехнике и мехатронике : учебное пособие*. – Москва: МГТУ "Станкин", 2018. – 217 с. : ISBN 978-5-6041283-0-5

### **Отчеты**

25. Утяшев Ф.З., Сухоруков Р.Ю., Сахвадзе Р.Ю., Гаврилина Л.В. и др. *Разработка научных основ высокоэффективной технологии и оборудования для изготовления в условиях сверхпластичности широкой номенклатуры полых валов газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов и сталей (Отчет о ПНИ, заключительный Этап № 5. Соглашение с Минобрнауки РФ № 14.604.21.0091 от 08 июля 2014 г. о предоставлении субсидии в рамках ФЦП Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы). Номер государственной регистрации 114092270017 от 22.09.2014. Инв. АААА-Б17-217041770123-9 от 17.04.2017, 255 с.*

26. Сухоруков Р.Ю., Утяшев Ф.З. *Разработка оборудования для формообразования деталей из жаропрочных сплавов на основе титана и никеля методами пластической деформации. Отчёт (заключительный) о научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе по государственному контракту с Минпромторгом РФ от 07 октября 2011 г. № 11411.1003704.05.028 Шифр «Пластика». В рамках ФЦП «Развитие отечественного станкостроения и инструментальной промышленности на 2011-2016 гг», подпрограммы «Национальная технологическая база». Номер государственной регистрации 02201360619 от 29.07.2013 г. 176 с.*

27. Сухоруков Р.Ю., Кощавцев Н.Ф., Ибрагимов А.Р., Гаврилина Л.В., Сидоров А.А., Алимов А.И., Колесник А.В., Григорьев Е.Н. *Программа фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы. Государственное задание № 0049-2014-0034, «Разработка методов анализа и синтеза новых классов механизмов и технологических процессов для машин новых поколений» (промежуточный) Отчет «Разработка методов и средств контроля параметров инновационных технологических процессов и оборудования для формообразования ответственных*

деталей из жаропрочных сплавов для газотурбинных двигателей» Номер государственной регистрации 01201355405. 2017г. 102с.

28. Афонин В.Л., Смоленцев А.Н., Гаврилина Л.В. Разработка технологии автоматизированного выполнения финишных операций обработки сложнопрофильных поверхностей деталей ГТД с использованием промышленных роботов (Интеллектуальные технологические комплексы для финишной обработки пера лопаток ГТД). Отчет о НИР. Актуальные проблемы робототехники. Программа фундаментальных исследований Президиума (отделения) РАН. Номер государственной регистрации АААА-А18-118011890132-7, инв. № АААА-А18-218022190112-1 от 21.02.2018. 91 с.

### **Доклады на международных конференциях в 2015-2018 гг.**

29. Utyashev, F., Mulyukov, R., Sukhorukov, R., Valitov, V. *New technologies development and equipment for local shape-forming of the complicated parts made of heat-resistant alloys under superplastic deformation conditions*». 12th International Conference on Superplasticity in Advanced Materials, ICSAM 2015; Tokyo; Japan.

30. Алимов А.И., Сидоров А.А., Сухоруков Р.Ю. Математическое моделирование деформационно-термической обработки, обеспечивающей формирование УМЗ-структуры в заготовках под сверхпластическую раскатку вала из сплава ЭК79. IV Международная научная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (Организатор: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, дата и место проведения: 24 - 26 ноября 2015 г. в ФГБУН ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, г.Москва). С. 36-38.

31. Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю., Козляков В.В. Морфологический подход сравнения технологических процессов изготовления ГТД с учетом ресурсосбережения. I Международная научно-техническая конференция «Автоматизация, энерго- и ресурсосбережение в промышленном производстве». (Организаторы: Кумертауский филиал Оренбургского государственного университета; Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал в г. Стерлитамаке, дата и место проведения: 21 апреля 2016 г., г. Кумертау). С. 156-158.

32. Алимов А.И., Сидоров А.А., Сухоруков Р.Ю., Коцавцев Н.Ф., Утяшев Ф.З. Математическое моделирование деформационно-термической обработки, обеспечивающей формирование УМЗ структуры в заготовках для сверхпластической раскатки полых валов из сплава ЭК79. Открытая школа-конференция стран СНГ «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы». (Организаторы: ФАНО, Минобрнауки РФ, РАН, Научный совет РАН по физике конденсированных сред, Межгосударственный координационный совет по физике прочности и пластичности материалов, АН Республики Башкортостан, ИПСМ РАН, БашГУ, дата и место проведения: 03 - 07 октября 2016 г. ИПСМ РАН, г. Уфа). С. 24.

33. Ибрагимов А.Р. Методы и средства контроля, обеспечивающие структуру и прочностные свойства сплавов, при раскатке деталей ГТД в условиях сверхпластичности Международная научная конференция «Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ - 2016)». (Организаторы: РАН; ФАНО; ФФИ, ОЭММПУ, ФГБУН ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, дата и место проведения: 26 - 28 октября 2016 г., ФГБУН ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, г. Москва). С.244-246.

34. Сухоруков Р.Ю., Коцавцев Н.Ф. Модульный принцип создания технологического оборудования для раскатки ответственных деталей ГТД из жаропрочных сплавов в изотермических условиях. V-я Международная научная конференция «Фундамен-

тальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». (Организатор: ФГБУН ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, дата и место проведения: 8-10 ноября 2017 г., ФГБУН ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, г. Москва). С. 280-281.

35. Сухоруков Р.Ю., Сидоров А.А. Определение кинематических и температурных параметров технологического процесса раскатки деталей из жаропрочных сплавов в условиях режима сверхпластичности. V-я Международная научная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». (Организатор: ФГБУН ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, дата и место проведения: 8-10 ноября 2017 г., ФГБУН ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, г. Москва). С. 282-284.

36. Шитов А.М., Кондратьев И.М. Модельное представление информации для диагностического мониторинга узлов металлорежущих станков. V-я Международная научная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». (Организатор: ФГБУН ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, дата и место проведения: 8-10 ноября 2017 г., ФГБУН ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, г. Москва). С. 316-318.

37. Bardenhagen A., Rakov D. USE OF COMPOSITE MATERIALS BY CAI (COMPUTER-AIDED INNOVATION) FOR AEROSPACE SYSTEMS SYNTHESIS. Третья международная конференция «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций» (Организатор: ФГБУН ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, дата и место проведения: 23-25 октября 2018 г., ФГБУН ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, г. Москва). С. 103-105.

38. Сухоруков Р.Ю., Гаврилина Л.В., Ибрагимов А.Р., Коцавцев Н.Ф., Раков Д.Л., Морозов С.В. Перспективы развития раскатных станков для создания производственных интеллектуальных систем при изготовлении деталей ГТД. Международная конференция «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», посвященная 80-летию ИМАШ РАН. 2018. С. 187

39. Алимов А.И., Евсюков С.А., Сухоруков Р.Ю. Повышение стабильности механических свойств колец ракетных и газотурбинных двигателей из титанового сплава втб путем формирования глобулярной микроструктуры. Международная конференция «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», посвященная 80-летию ИМАШ РАН. 2018. С. 20-21.

40. Кондратьев И.М., Печейкина М.А., Раков Д.Л. Анализ и синтез технологических решений для финишной обработки лопаток газотурбинных двигателей. Международная конференция «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», посвященная 80-летию ИМАШ РАН. 2018. С. 91.

41. Глазунов В.А., Азиков Н.С., Алешин А.К., Рашоян Г.В., Гаврилина Л.В., Шалюхин К.А., Скворцов С.А., Юдкин В.Ф. Роботы и манипуляционные системы на основе механизмов параллельной структуры для выполнения групповых технологических операций. Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы информатики, механики и робототехники.цифровые технологии в машиностроении» (Организаторы: Национальная инженерная академия республики Казахстан; Институт механики и машиноведения имени академика У.А.Джолдасбекова; Институт информационных и вычислительных технологий, дата и место проведения: 04-05 октября 2018 г., г. Алматы). С. 46-47.

## *Диссертационные работы*

42. Сидоров А.А. Разработка технологического процесса высадки поковок типа стержня с полусферическим фланцем с направленным волокнистым строением. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Место защиты: МГТУ им. Н.Э.Баумана. Дата защиты: 11-10-2016.

43. Алимов А.И. Совершенствование технологии изготовления колец из титанового сплава ВТ6 путем определения рациональных режимов деформирования. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Место защиты: МГТУ им. Н.Э.Баумана. Дата защиты: 11-04-2017.

## *Патенты*

44. Смоленцев А.Н., Афонин В.Л. Патент № 2475347, опубликовано 20.02.2013 Бюл. № 5 «Устройство для механической обработки изделий сложной пространственной формы».

45. Ганиев Р.Ф., Сухоруков, Р.Ю., Коцавцев Н.Ф., Колесник А.В., Мухтаров Ш.Х., Утяшев Ф.З. Патент № 146549, опубликовано 10.10.2014 Бюл. № 28 «Стан для раскатки осесимметричных деталей».

46. Ганиев Р.Ф., Мулюков Р.Р., Сухоруков Р.Ю., Утяшев Ф.З., Коцавцев Н.Ф., Колесник А.В., Назаров А.А., Ганеев А.А. Патент № 2567084, опубликовано 27.10.2015 Бюл. № 30 «Способ изготовления детали типа диска».

47. Сухоруков Р.Ю., Коцавцев Н.Ф., Утяшев Ф.З., Колесник А.В. Патент № 159169, опубликовано 10.02.2016 Бюл. № 4 «Стан для раскатки деталей типа тел вращения» / (по лицензионному соглашению права переданы индустриальному партнеру ООО «СМЗ»).

48. Сухоруков Р.Ю., Коцавцев Н.Ф., Утяшев Ф.З., Колесник А.В., Гаврилина Л.В. Патент № 169622, опубликовано 24.03.2017 Бюл. № 9 «Стан для раскатки деталей».

49. Сухоруков Р.Ю., Коцавцев Н.Ф., Утяшев Ф.З., Колесник А.В., Коцавцев А.Н. Гаврилина Л.В. Патент № 172751, опубликовано 21.07.2017 Бюл. № 21 «Стан для изготовления полых валов из жаропрочных сплавов».

50. Афонин В.Л., Раков Д.Л., Смоленцев А. Н., Яковлев М. Г. Патент № 2629419 опубликовано 29.08.2017 Бюл. № 25 «Способ финишной обработки лопатки газотурбинного двигателя и устройство для его осуществления».

51. Сухоруков Р.Ю., Коцавцев Н.Ф., Утяшев Ф.З., Колесник А.В., Коцавцев А.Н. Гаврилина Л.В. Патент № 2657679 опубликовано 14.06.2018 Бюл. № 17 «Стан для раскатки колец из жаропрочных сплавов».

52. Раков Д.Л., Кондратьев И.М., Печейкина М.А. Патент № 2674358, опубликовано 07.12.2018 Бюл. № 34 «Способ финишной обработки заготовки лопатки газотурбинного двигателя и устройство для его осуществления».

## Список основных сокращений и обозначений

ИПД - интенсивная пластическая деформация

ЗГП - зернограничное проскальзывание

МК - микрокристаллическая структура

НК - нанокристаллическая структура

НС - наноструктура

РКУ - равноканальное угловое

РКУП - равноканальное угловое прессование

СМК - субмикрокристаллическая структура

СПД - сверхпластическая деформация

СП - сверхпластичность

УМЗ- ультрамелкозернистая структура

$\varepsilon$  ( $\epsilon$ ) - истинная степень деформации

$\dot{\xi}$  ( $\xi$ ) - скорость деформации

$T_{пл.}$  ( $T_m$ )- температура плавления

$p$  - давление

$\sigma$  - напряжение

$\sigma_T$  - напряжение течения

$A$  - площадь поверхности

$\tilde{\omega}$  - тензор поворота

$\omega$ - угол поворота

$\dot{\omega}$  - угловая скорость

$V, v$  - вектор (в данном случае вектор скорости)

$d$  - средний размер зерен

$t$  - время

$R_B$  - радиус-вектор

$\Theta$  - угол разориентировки границ

$b$  - вектор Бюргерса

**Научное издание**

Афонин В.Л., Гаврилина Л.В., Ибрагимов А.Р., Кондратьев И.М.,  
Морозов С.В., Раков Д.Л., Смоленцев А.Н., Сухоруков Р.Ю.,  
Шитов А.М.

**Исследования и разработка инновационных технологических процессов  
и интеллектуальных систем управления для изготовления  
деталей газотурбинных двигателей (ГТД)**

Технические редакторы:  
Гаврилина Л.В., Ибрагимова Н.А.

Компьютерная верстка:  
Ляхов О.Б.

Подписано в печать 00.00.2019 г.  
Формат 70х100/16. Бумага офсетная.  
Печать электрографическая. Гарнитура "Academy".  
Усл.-печ. л. – 7,15. Тираж – 000 экз. Заказ № 00.  
Отпечатано в ИМАШ РАН.  
119334 г. Москва, ул. Бардина, 4