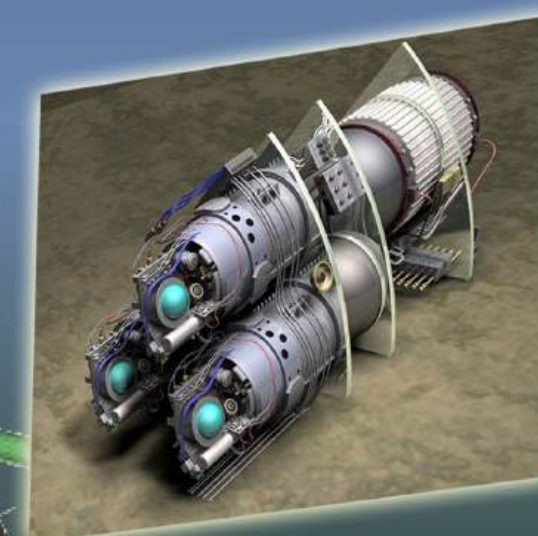
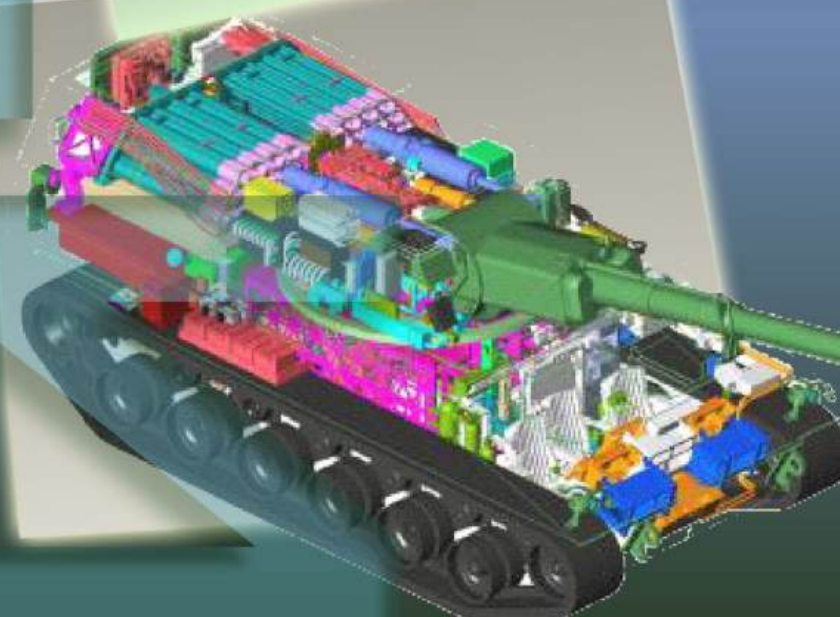
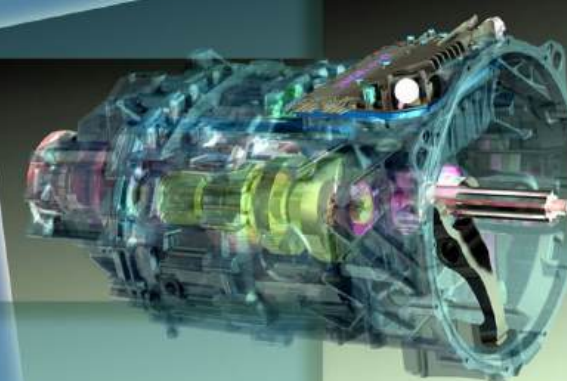
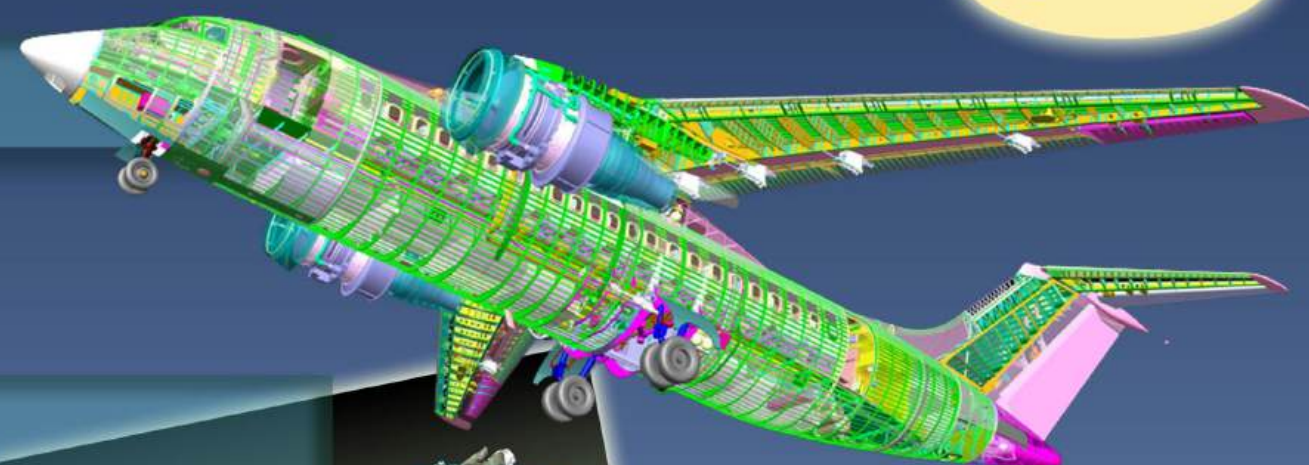


Индекс 79378

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

в проектировании и производстве

№ 1' 2022





## Все новейшие достижения и современные разработки предприятий оборонного комплекса — в научно-технических журналах ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» является издателем следующих научных журналов:



Межотраслевой научно-технический журнал  
**Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **79379**  
Издается с 1984 года



Межотраслевой научно-технический журнал  
**Конструкции из композиционных материалов**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **80089**  
Издается с 1981 года



Научно-технический журнал  
**Информационные технологии в проектировании и производстве**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **79378**  
Издается с 1976 года



Межотраслевой научно-практический журнал  
**Экология промышленного производства**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **80090**  
Издается с 1993 года



Научно-практический журнал  
**Вопросы защиты информации**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **79187**  
Издается с 1974 года

Все издания ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»:

✓ включены решением ВАК Министерства науки и высшего образования России в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук;

✓ метаданные выпусков включены в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Более подробную информацию об изданиях, подписке, дополнительных услугах можно получить по тел.: 8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-67, 8 (495) 491-77-20 (подписка);  
факс: 8 (495) 491-44-80.  
E-mail: [izdanie@ntckompas.ru](mailto:izdanie@ntckompas.ru)



# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР  
ОБОРОННОГО КОМПЛЕКСА  
«КОМПАС»

## № 1 (185) 2022

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1976 г.

### Главный редактор

И. А. Шеремет, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., заместитель директора Российского фонда фундаментальных исследований по научной работе

### Заместитель главного редактора

В. Н. Гридин, д-р техн. наук, проф., научный руководитель ЦИТИ РАН

### Ответственный секретарь

Г. П. Глотова, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

### Редакционная коллегия:

В. В. Бордюже, д-р техн. наук, проф., Координационный совет по информационным технологиям предприятий ОПК РФ; А. И. Громов, канд. хим. наук, НИУ «Высшая школа экономики»; В. В. Кондратьев, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., Нижегородский государственный технический университет им. Р. А. Алексеева; Ю. Н. Кофанов, д-р техн. наук, проф., МИЭМ НИУ ВШЭ; С. А. Матвеев, канд. техн. наук, ФГУП «ЦНИИмаш»; Е. И. Митрушкин, д-р техн. наук, проф., АО «НИИИА»; С. В. Назаров, д-р техн. наук, проф., ЗАО «Московский научно-исследовательский телевизионный институт»; М. А. Пирогова, канд. техн. наук, НИУ МЭИ; С. В. Попов, д-р техн. наук, Холдинг «Швабе»; А. Ф. Ронжин, д-р физ.-мат. наук, проф., Вычислительный центр им. А. А. Дородницына; П. О. Скобелев, д-р техн. наук, НАО «Группа компаний «Генезис знаний», СамГТУ; В. В. Соколин, канд. воен. наук, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»; А. П. Солнцев, д-р воен. наук, проф., ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»; Е. В. Судов, д-р техн. наук, проф., НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика»; А. В. Цырклов, д-р техн. наук, проф., ГКНПЦ им. М. В. Хруничева; В. А. Шахнов, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н. Э. Баумана; Е. И. Шульгин, д-р техн. наук, НИЦ при президиуме АИИ им. А. М. Прохорова

☎ редакции (495) 491-43-17  
E-mail: izdanie@ntckompas.ru  
http://ntckompas.ru

### Информационные технологии

в проектировании и производстве:

Науч.-техн. журн./ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2022.  
№ 1 (185). С. 1—60.

Редактор О. А. Константинова

Компьютерная верстка: Н. В. Ильина,  
К. В. Трыкина

Подписано в печать 10.02.2022.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 7,0. Уч.-изд. л. 7,2.

Заказ 1987. Тираж 250 экз.

Адрес редакции: 125424, Москва,  
Волоколамское ш., 77, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».

Отпечатано: 101000, Москва,  
Лубянский проезд, д. 15, стр. 4, офис 105.

ИП Кириченко Алексей Викторович.

Индекс 79378. 8 статей.

Статьи рецензируются.

© Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас», 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

### Инновационные технологии решения задач проектирования, моделирования и производства

- Бутко А. О. Комплексная автоматизация контроля технологических процессов гальванического цеха..... 3
- Федоров С. В. Исследование частотных свойств мультидифференциального операционного усилителя датчиковых систем..... 10
- Иванов М. Б., Сурин В. И., Щербаков А. А. Применение метода сканирующей контактной потенциометрии при изучении механического разрушения изделий..... 14
- Батришина Г. С. Автоматизированное проектирование керамических изделий..... 21
- Колесников Д. А. Особенности реализации автоматизированной системы регистрации параметров процессов нанесения покрытий..... 28
- Сурин В. И., Бокучава Г. Д., Папушкин И. В. Исследование очагов деформационного упрочнения в сплаве Д16Т на дефектах механической обработки поверхности..... 34

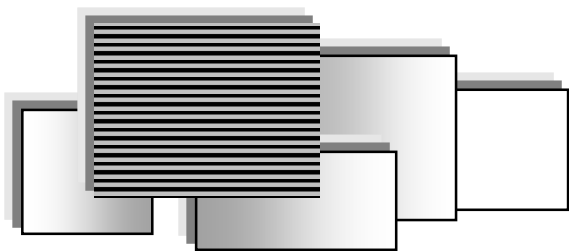
### Прикладные задачи применения информационных технологий

- Шубин Р. В. Проектирование системы технологий научно-производственной организации..... 45
- Васильева М. А., Старостин Н. П. Анализ температурных полей сварки полиэтиленовых распределительных трубопроводов с помощью седлового отвода при температурах воздуха ниже нормативных..... 54

# **INFORMATION TECHNOLOGY OF CAD/CAM/CAE**

## **THE SCIENTIFIC JOURNAL**

Information on recent advances in CAD/CAM/CAE, industry & business & complex information technology, including methods and tools of computer graphing, geometrical and mathematical modeling, database control methods on estimation and provision of control and reliability.



## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

УДК 681.518.2

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_1\_3

### КОМПЛЕКСНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЦЕХА

А. О. Бутко, канд. техн. наук

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, Россия

*Рассмотрены особенности автоматизации процессов контроля гальванических операций при изготовлении деталей двигателей летательных аппаратов с использованием современных информационных технологий. Представлена технология в которой реализован расширенный функционал видеонаблюдения с распознаванием посредством нейросетей и иных алгоритмов. В основу решения положена автоматизированная система WinCC OA, работающая в комплексе с дополнительным программным обеспечением. Комплекс представленных программ может быть использован в любой производственной сфере, которая требует повышенного контроля качества в целях минимизации брака и потерь ресурсов.*

**Ключевые слова:** автоматизация, программирование, интеграция, инженерные расчеты, контроль, видеонаблюдение, технологическое моделирование, технологический процесс, базы данных.

Цель проводимой работы — повышение качества производственных процессов путем дополнительного контроля гальванических и других технологических операций посредством имплементации комплексной системы контроля параметров (СКП) технологических процессов (ТП), построенной на базе автоматизированной системы WinCC OA, интегрированной в стационарные и мобильные АРМ в комплексе с дополнительным аппаратным и программным обеспечением, в том числе обеспечение:

- соответствия ТП цифровому двойнику изделия;
- автоматизации регистрации параметров ТП (формирования цифрового паспорта изделия) и контроля исполнения ТП (сравнения параметров в цифровом паспорте изделия с цифровым двойником);
- системы управления качеством данных для оперативного и стратегического принятия решений по выявленным несоответствиям ТП.

Источником данных для решения является набор датчиков, устанавливаемых в гальваническом цеху, а также системы видеонаблюдения и видеофиксации, использующие стандартные камеры высокого разрешения [1—4]. Для идентификации и авторизации сотрудников и операторов в приложениях используют NFC RFID

метки и соответствующие сканеры/устройства считывания. Для упрощения ввода данных (в основном это касается идентификаторов деталей, чертежей и маршрутных карт) в части функций применяют штрих-код и QR-код. Ожидаемый эффект от внедрения СКП заключается в снижении количества бракованных деталей (получаемых благодаря некорректно выполненным операциям с нарушением рабочих параметров) и повышении качества нанесения покрытий. Разрабатываемое решение в итоге позволит проверять и контролировать параметры любых операций посредством визуализации их значений на АРМ. Планируется использовать как стационарные рабочие места с ПК на базе ОС Windows, так и мобильные планшеты на базе ОС Android с клиентскими приложениями. Для хранения параметров используется СУБД MS SQL. В состав продукта СКП будут входить:

- **Программная часть:**
  - система SCADA WinCC OA 3.18;
  - СУБД MS SQL;
  - приложение чтения NFC меток для стационарного АРМ;
  - приложение чтения NFC меток для мобильного АРМ;

- приложение чтения штрих-кода для стационарного АРМ;
- приложение чтения штрих-кода для мобильного АРМ;
- приложение видеофиксации происшествий для мобильного АРМ;
- система распознавания расположения ДСЕ в ваннах;
- приложение передачи данных из Teamcenter в SQL;
- БД технологических процессов;
- приложение видеофиксации текущих процессов и операций;
- АРМ химика;
- АРМ технолога;
- АРМ мастера участка;
- АРМ контроля;
- АРМ инженера;
- АРМ гальваника.
- *Аппаратная часть:*
  - стационарные АРМ на базе ПК с MS Windows;
  - мобильные АРМ на базе планшетов Samsung с Android;
  - видеокамеры для видеофиксации;
  - видеокамеры для распознавания расположений;
  - сканер штрих-кода;
  - сканер NFC-меток;
  - сетевое оборудование.
- *Датчики:*
  - датчики контроля влажности и температуры;
  - комплект датчиков линии подачи сжатого воздуха;
  - комплект датчиков линии подачи воды 3-й категории;
  - комплект датчиков и средств сигнализации электропечей;
  - датчик закрытого состояния крышки;
  - комплект датчиков, средств сигнализации и исполнительных механизмов каскадных (3 ступени) ванн улавливания;
  - датчик электропроводности;
  - сигнализатор уровня;
  - сигнализатор потока;
  - комплект датчиков и средств сигнализации ванны горячей промывки;
  - датчик уровня с кронштейном;
  - датчики температуры с кронштейном (2 канала; измерение в 2 точках);
  - комплект датчиков, средств сигнализации и исполнительных механизмов химических ванн;
  - установка датчиков тока и напряжения;
  - датчики давления на фильтровальных установках (ФУ);
  - комплект датчиков, средств сигнализации и исполнительных механизмов электрохимических ванн без нагрева;

– комплект датчиков, средств сигнализации и исполнительных механизмов электрохимических ванн с нагревом.

Основное производственное оборудование участка разделено на основные группы по типу рабочего места (РМ):

- гальванические (процессные) ванны;
- печи;
- контрольные столы и отдельные зоны для проведения контрольных операций;
- монтажные столы и отдельные зоны для слесарных операций;
- прочие рабочие места (для расширения функционала системы в будущем).

Каждое РМ оборудовано одним или несколькими информационными знаками (таблички с QR или штрих-кодом). При осуществлении переходов по одной технологической операции или переходе к следующей технологической операции можно, просканировав идентификационный знак, зафиксировать в СКП отметку времени и факт перехода. Проведение технологических операций и переходов вне РМ, закрепленного для данной операции, в рамках системы не допускается.

Для каждого РМ в рамках СКП проводятся мониторинг состояния и контроль наличия необходимых ресурсов для выполнения технологических операций и переходов. Одновременное использование единичного РМ для различных технологических операций и ДСЕ, если они не одного типа и не проходят техпроцесс по одному маршруту, в рамках системы не допускается. Для перехода РМ в состояние готовности к выполнению следующей технологической операции необходимо закрыть предыдущую. Текущее состояние каждого РМ отображается на общем плане участка.

Общее количество данных рабочих мест на пилотном участке 30. Из них:

- семь электрохимических процессных ванн;
- одиннадцать химических процессных ванн;
- одна ванна горячей промывки;
- три ванны холодной промывки;
- семь каскадов (две ступени) ванн холодной промывки;
- один каскад (три ступени) ванн улавливания.

АРМ "Гальваник" выполнено на планшетном компьютере с возможностью считывания штрих- и QR-кодов, а также фотофиксации расположения ДСЕ при монтаже. АРМ "Гальваник" реализует автоматизированный функционал для обеспечения прохождения ДСЕ по техпроцессу:

- получение задания на покрытие для ДСЕ;
- получение КТИ пооперационное;
- идентификация ДСЕ;
- идентификация РМ и оборудования;
- идентификация оснастки;

- обеспечение переходов по единичным технологическим операциям и их закрытие в соответствии с ролью;

- фотофиксация при необходимости;
- обеспечение "Гальваника" необходимой информацией о техпроцессе и другой НСИ.

Автоматизированные функции планшета:

- приемка детали на цеховом складе в работу (сканирование штрих-кодов и QR-кодов на упаковке);
- отображение КТИ, инструкций и другой необходимой НСИ;
- фото/видеофиксация расположения анодов и деталей в ванне после установки;
- закрытие переходов и единичных технологических операций.

Сотрудник БТК подтверждает выполнение технологических операций и переходов на планшете "Гальваника" с обеспечением своей идентификации.

АРМ "Контроль" имеет в своем составе ПК, укомплектованный сканером штрих-кодов и QR-кодов и средствами фотофиксации. АРМ "Контроль" для специалистов БТК может быть выполнен также в виде защищенного планшета с характеристиками, как у планшета АРМ "Гальваник". АРМ "Контроль" реализует следующие автоматизированные функции для обеспечения прохождения контрольных операций:

- получение задания на покрытие;
- получение КТИ пооперационное;
- идентификация сопроводительной документации;
- идентификация ДСЕ;
- идентификация РМ, оборудования и КИО;
- контроль химического состава электролита по цифровому журналу "Журнал состава ванн", генерируемому химической лабораторией цеха;
- контроль качества воды в промывных ваннах по цифровому журналу "Журнал качества воды", генерируемому химической лабораторией цеха;
- обеспечение контрольных операций, заполнение карты замеров;
- обеспечение работы с отклонениями, генерация цифровой формы;
- фотофиксация при необходимости;
- обеспечение контролера БТК необходимой информацией о техпроцессе и другой НСИ.

АРМ "Мастер участка" имеет в своем составе стационарный ПК, укомплектованный сканером штрих-кодов и QR-кодов, принтером штрих-кодов и QR-кодов, и реализует следующие автоматизированные функции:

- получение задания на покрытие для участка (ССЗ);
- обработка ССЗ и распределение по исполнителям;
- идентификация сопроводительной документации;

- обеспечение нанесения маркировки (бирки) СКП на ДСЕ;

- обеспечение нанесения маркировки СКП на РМ и оборудование;

- обеспечение нанесения маркировки СКП на оснастку;

- обеспечение создания цифрового паспорта покрытия на ДСЕ;

- получение группового технологического процесса нанесения покрытия;

- получение КТИ нанесения покрытия для конкретной ДСЕ;

- отслеживание прохождения ДСЕ по участку;

- обеспечение контрольных операций, создание и заполнение карты замеров;

- обеспечение работы с отклонениями, формирование техпроцесса устранения несоответствий в рамках закрытия цифрового паспорта покрытия.

АРМ "Технолог" имеет в своем составе стационарный ПК, укомплектованный сканером штрих-кодов и QR-кодов, и реализует следующие автоматизированные функции для обеспечения работы участка в целом:

- идентификация сопроводительной документации;

- получение группового технологического процесса нанесения покрытия;

- получение КТИ технологического процесса нанесения покрытия для конкретной ДСЕ;

- создание и редактирование единичного технологического процесса нанесения покрытия для конкретной ДСЕ на основании группового технологического процесса нанесения покрытия;

- отслеживание прохождения ДСЕ по участку;

- обеспечение работы с отклонениями, формирование единичного техпроцесса устранения несоответствий в рамках участка.

АРМ "Химическая лаборатория цеха" имеет в своем составе стационарный ПК и реализует следующие автоматизированные функции:

- контроль концентрации компонентов электролита, генерация цифрового "Журнала состава ванн";

- наполнение системы информацией о допуске гальванических (процессных) ванн к работе (контроль концентрации);

- наполнение системы информацией о качестве воды в ваннах и системе водоподготовки;

- наполнение системы информацией о проведении вспомогательных технологических операций (долив воды, корректировка состава электролита и т. д.);

- ведение соответствующих журналов и графиков в цифровом виде.

Цифровая платформа СКП в рамках предлагаемой архитектуры осуществляет:

- проведение мониторинга производственно-технологического оборудования;

- обеспечение дистанционного автоматизированного управления производственно-технологическим оборудованием (включая предотвращение аварийных ситуаций и нарушений технологической дисциплины, связанных с использованием не предусмотренного технологической документацией оборудования и инструмента, программного обеспечения, средств измерений, проведением работ неаттестованными исполнителями);

- проведение автоматического оповещения при нарушении требований нормативной, конструкторской и технологической документации по реализуемым параметрам технологических процессов;

- работа с клиентскими приложениями для визуализации и анализа данных СКП, выполненные на базе WinCC OA в виде стационарных или мобильных АРМов.

Для получения информации о ходе технологического процесса в состав СКП входят устройства ввода/вывода информации, мобильные и стационарные АРМ.

Архитектура СКП предусматривает внедрение и/или использование:

- автоматизированных систем (как в контуре СКП, так и вне его) регистрации, сбора, документирования, хранения, анализа и управления параметрами ТП применительно к требуемым технологическим переделам заказчика и соответствующему технологическому оборудованию (включая планы развития производства);

- систем хранения данных и информации, получаемой при работе СКП, базы данных и системы резервного копирования информации. Система хранения СКП размещается на сервере, предоставляемом заказчиком;

- систем передачи данных с использованием проводного Ethernet для стационарных АРМ и беспроводной сети WiFi для мобильных АРМ;

- систем контроля качества деталей, узлов, агрегатов и изделия в целом на всех стадиях жизненного цикла изделия (ЖЦИ);

- систем управления несоответствующей продукцией в соответствии с бизнес-процессами заказчика;

- решений, обеспечивающих интеграцию СКП с другими информационными системами (ERP, PLM, MES) заказчика, в том числе для создания условий по использованию цифрового двойника изделия и формирования цифрового паспорта изделий;

- средств визуализации выполнения ТП в интересах ЛПР, включая мобильные средства связи;

- средств блокировок и защит от несанкционированных действий.

Архитектура СКП позволяет масштабировать решения на другие технологические переделы, а именно:

- структура СКП, состоящая из сервера предприятия с базой данных цифрового паспорта

ДСЕ, журналы использования основного оборудования, оснастки, контрольно-измерительного инструмента;

- сеть передачи данных, основанная на существующей сети предприятия, с расширением на уровне автоматизируемого участка с использованием сети проводной и беспроводной передачи данных;

- наличие стационарных и мобильных АРМ ЛПР;

- наличие мобильных АРМ исполнителей и контролеров БТК;

- наличие АРМ и ролей в структуре СКП (начальника цеха, ведущих специалистов по направлениям, технологов, специалистов по СМК);

- решения по применяемому программному обеспечению (SCADA, СУБД);

- решения по интеграции со смежными системами ("Галактика", "Teamcenter");

- решения в области СМК;

- модульная структура устройств сбора данных, выполненных на современных ПЛК, решения по регистрации медленноменяющихся, быстропеременных и статических параметров;

- расширяемая ролевая модель.

Основу хранения данных в СКП составляет электронная БД в SQL.

Логически БД СКП можно разделить на следующие взаимосвязанные части (БД):

- хранения цифрового паспорта;
- шаблона технологического паспорта;
- описания аппаратной конфигурации СКП;
- справочников СКП.

БД СКП является полностью самостоятельной базой данных и может выдавать выходные данные по запросам без участия смежных систем.

Исходные данные берутся из внешних систем ERP, PLM, MES, а результаты замеров и все исходные атрибуты хранятся в базе "Цифровой паспорт ДСЕ".

В БД СКП хранятся шаблоны технологического паспорта (штПс) СКП, созданные для деталей, для которых нет документации в PLM.

В БД СКП хранится описание аппаратной конфигурации СКП для связи сигналов с датчиков с необходимыми параметрами технологических процессов.

В БД СКП хранится справочная информация, необходимая для работы СКП, отсутствующая в смежных информационных системах (например, справочник оснастки и справочник контрольно-измерительных приборов).

Функционал АРМ СКП создан коллективом разработчиков в основном средствами среды WinCC OA. В рамках проекта были созданы экранные формы и алгоритмы для АРМ, которые в дальнейшем были реализованы в WinCC OA. Эта часть СКП позволяет отображать данные с датчиков системы в стандартных полях форм на АРМ.



Дополнительные приложения СКП создавались средствами современных языков программирования с использованием продуктов Microsoft Visual Studio. Наибольшее внимание было уделено модулю распознавания схем подвеса ДСЕ: для реализации видеоконтроля процессов и схем расположения ДСЕ создано приложение "Ванна", которое осуществляет следующие функции:

- получение данных с камеры над ванной;
- обработка изображения;
- распознавание базовых элементов — границы ванны и ДСЕ;
- формирование итоговой схемы;
- определение расстояний;
- выдача результатов в форму АРМ в WinCC.

Схема подвесов ДСЕ в ванной показана на рис. 1.



Рис. 1. Расположение ДСЕ в ванне

При открытой крышке ванны ведется непрерывная видеофиксация для фиксации факта перемены места контакта, правильности расположения (по алгоритмам компьютерного зрения [1]) в течение всего цикла обработки (при необходимости).

Для контроля расположения ДСЕ в ваннах нормируются расстояния:

- от правой стенки ванны до штанг с анодами по оси  $X$ ;
- от передней стенки ванны до штанги с анодами по оси  $Y$ ;
- от передней стенки ванны до мест крепления анодов на штанге по оси  $Y$ ;
- от передней стенки ванны до мест крепления анодов по оси  $X$ ;
- от правой стенки ванны до штанги с ДСЕ (катод) по оси  $X$ ;
- между ДСЕ;
- от передней стенки ванны до мест крепления подвесов ДСЕ на штанге катода по оси  $Y$ .

В качестве базы выбран ближний к оператору край ванны (ось  $X$ ). Левый край ванны при этом считаем осью  $Y$ . Соответствующий пример приведен на рис. 2.

Работа приложения проиллюстрирована на рис. 3 и 4. Показан захват с камеры изображения макета ванны с подвесами. Для распознавания границ ванны и подвесов на них нанесены специальные специальные маркеры [2, 3]. Перед распознаванием изображение корректируется для устранения бочкообразной формы получаемой через объектив FishEye [4].

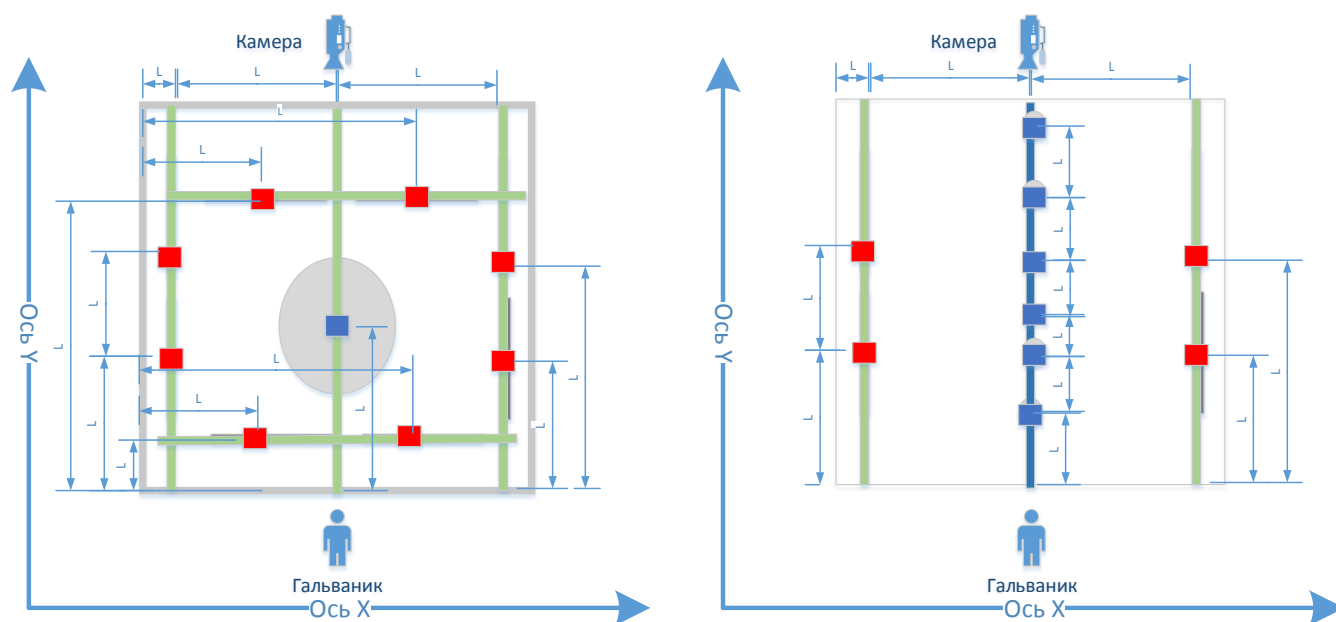


Рис. 2. Контроль расположения ДСЕ

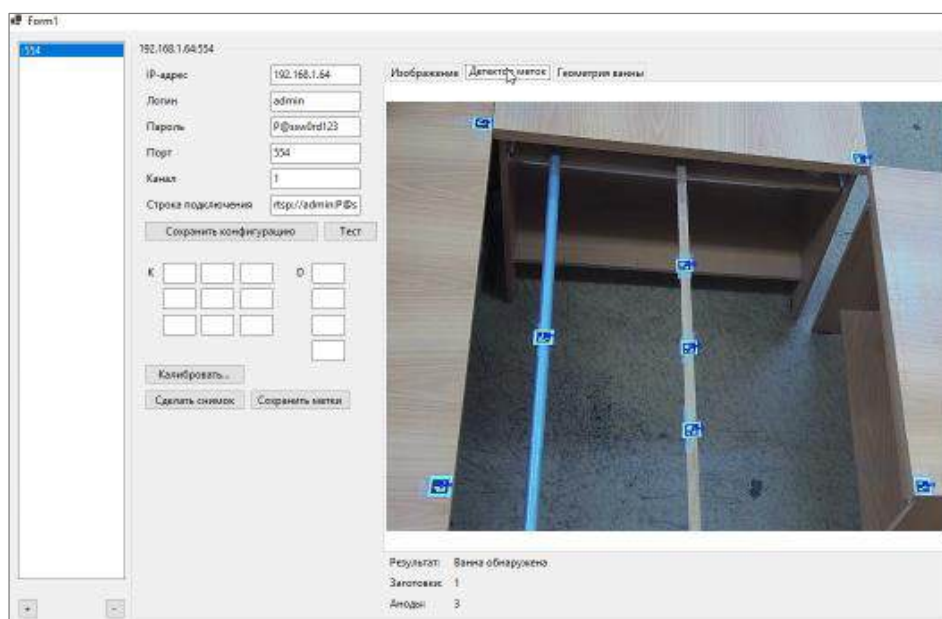


Рис. 3. Обработка на макете ванны

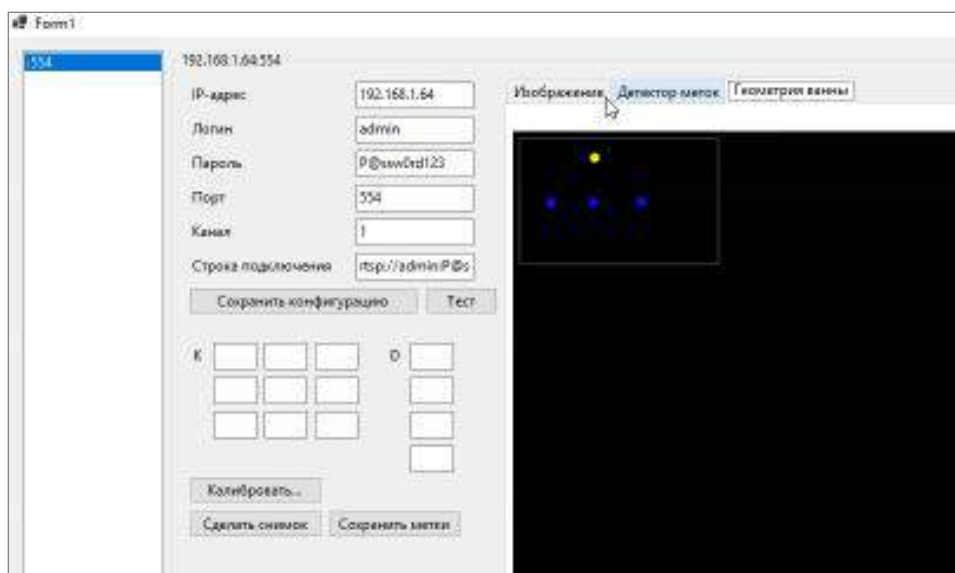


Рис. 4. Формирование схемы ванной с подвесами

После распознавания формируется схема расположения, на которой видны границы ванны и подвесы. Программа рассчитывает расстояния и передает их в СКП.

Эта компонента позволяет контролировать расположения ДСЕ в целях обеспечения оптимального качества процесса нанесения покрытия на деталь.

### Заключение

Большую часть параметров ТП можно контролировать путем установки датчиков и связи их с единой системой контроля (СКП). Это стандартное решение, обеспечиваемое функционалом WinCC OA. Сложность контроля остальных

параметров, таких, как правильное расположение ДСЕ в ванне, связана с необходимостью обработки изображения и сопоставления результатов с типовыми схемами завеса. На данном этапе реализовано приложение распознавания на основе меток. В дальнейшем планируется внедрение алгоритмов на основе нейросетей в целях расширения диапазона возможных схем и ухода от применения маркировочных меток.

По результатам проведенной работы можно заключить, что значительное повышение качества процессов может быть достигнуто при использовании нескольких систем, которые способны дополнить друг друга и осуществить обмен данными на разных уровнях. Таким образом, реализуется функционал комплексного

решения, позволяющего консолидировать максимальный уровень контроля и регистрации параметров ТП.

#### Литература

1. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение = Computer Vision. — М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. — 752 с.

2. Фомин Я. А. Распознавание образов: теория и применения. Изд. 2. — М.: ФАЗИС, 2012. — 429 с.

3. Горелик А. Л., Скрипкин В. А. Методы распознавания. Изд. 4. — М.: Высшая школа, 1984, 2004. — 262 с.

4. Форсайт Д. А., Понс Д. Компьютерное зрение. Современный подход = Computer Vision: A Modern Approach. — М.: Вильямс, 2004. — 928 с.

## COMPLEX AUTOMATION OF CONTROL FOR TECHNOLOGICAL PROCESSES OF THE ELECTROPLATING WORKSHOP

A. O. Butko

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*The article considers the features for automation of control processes of electroplating operations in the manufacture of aircraft engine parts using modern information technologies, one of which implements advanced video surveillance functionality with recognition through neural networks and other algorithms. The solution is based on the automated WinCC OA system, which works in combination with additional software. The complex of the presented programs can be used in any production area that requires increased quality control in order to minimize defects and resource losses.*

**Keywords:** automation, programming, integration, engineering calculations, control, CCTV, technological modeling, technological process, database.

---

Бутко Антон Олегович, доцент.  
E-mail: mati-tias@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 27 сентября 2021 г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ МУЛЬТИДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ ДАТЧИКОВЫХ СИСТЕМ

С. В. Федоров, канд. техн. наук

Кумертауский филиал ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»,  
Республика Башкортостан, г. Кумертау, Россия

*Описан новый класс мультимодифференциальных операционных усилителей, используемых в инструментальных усилителях. Данные усилители находят широкое применение в информационно-измерительной технике, приборостроении, датчиковых системах, различных аналого-цифровых интерфейсах. Разработана схема мультимодифференциального операционного усилителя на основе КР140УД1А с добавлением дополнительного дифференциального каскада. Проведены сравнительные исследования частотных свойств операционного усилителя КР140УД1А и мультимодифференциального операционного усилителя. Сделаны выводы о влиянии дополнительных дифференциальных каскадов на частотные характеристики усилителя.*

**Ключевые слова:** инструментальный усилитель, мультимодифференциальный операционный усилитель, датчиковые системы, частотные свойства операционного усилителя.

Инструментальные (измерительные) усилители (ИУ), обеспечивающие прецизионное усиление дифференциального сигнала и повышенное ослабление синфазной составляющей входных напряжений, находят широкое применение в информационно-измерительной технике, приборостроении, датчиковых системах, различных аналого-цифровых интерфейсах [1].

Одним из наиболее перспективных методов построения ИУ является применение в их структуре так называемых мультимодифференциальных операционных усилителей (МОУ), которые выполняются на основе классических дифференциальных каскадов (ДК) на полевых или биполярных транзисторах с резистором местной отрицательной обратной связи [1].

МОУ относится к числу сравнительно новых и перспективных аналоговых микросхем. Их

применение позволяет реализовать функции различных аналоговых преобразователей сигналов, которые невозможны на основе классических операционных усилителей [2–6]. Вследствие этого возникает вопрос исследования свойств МОУ.

Цель данной работы — исследование частотных свойств схемы мультимодифференциального операционного усилителя, спроектированного на базе ОУ КР140УД1А.

### Исследования частотных свойств операционного усилителя КР140УД1А

Для исследования частотных свойств МОУ смоделирована схема исходного операционного усилителя (ОУ) КР140УД1А в среде Multisim (рис. 1) [7, 8].

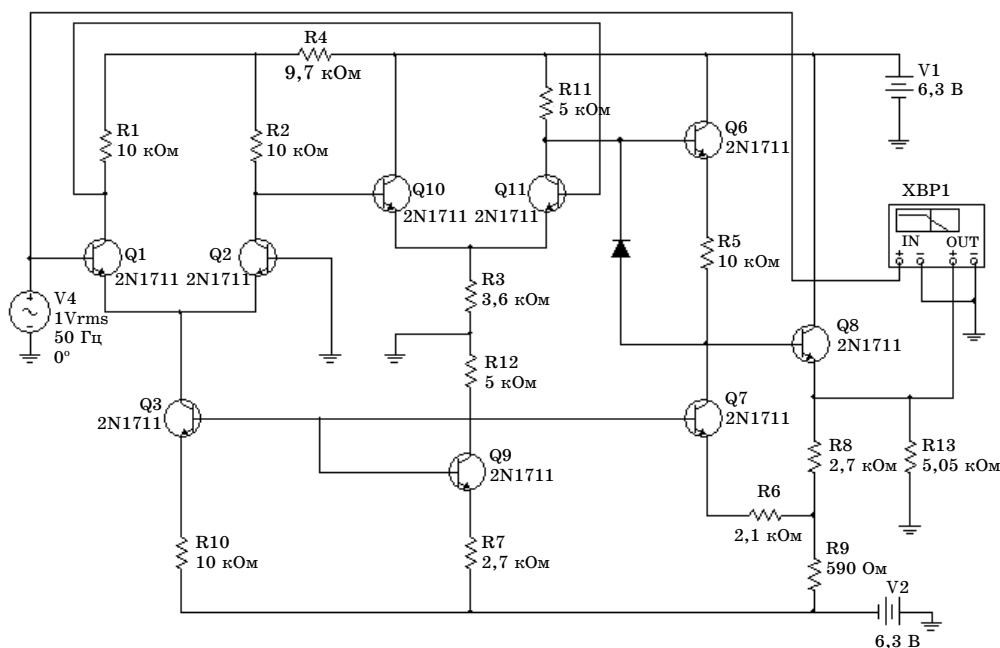


Рис. 1. Схема операционного усилителя КР140УД1А в среде Multisim

Проведенные исследования частотных свойств схемы операционного усилителя КР140УД1А позволяют определить соответствие модели справочным данным и провести дальнейшее сравнение их с частотными свойствами МОУ. Согласно справочным данным частота единичного усиления ОУ КР140УД1А  $f_T = 0,1$  МГц.

В результате имитационного моделирования получаем логарифмическую амплитудно-частотную характеристику ОУ КР140УД1А (рис. 2).

Показанная на графике (рис. 2) частота единичного усиления ОУ КР140УД1А  $f_T = 7,406$  МГц. Расхождение со справочным значением связано с тем, что в схеме ОУ КР140УД1А выбран биполярный транзистор 2n1711 с частотой единичного усиления  $f_T = 70$  МГц.

На рис. 3 показано значение частоты среза  $f_{\text{срез}}$ , на которой коэффициент  $K_U$  снизился до 0,707 своей величины. Данное значение равно  $f_{\text{срез}} = 482,655$  кГц.

#### Исследования частотных свойств мультидифференциального операционного усилителя, спроектированного на основе ОУ КР140УД1А

Были проведены частотные исследования мультидифференциального операционного усилителя, спроектированного на основе ОУ КР140УД1А с добавлением дополнительного дифференциального каскада (рис. 4).

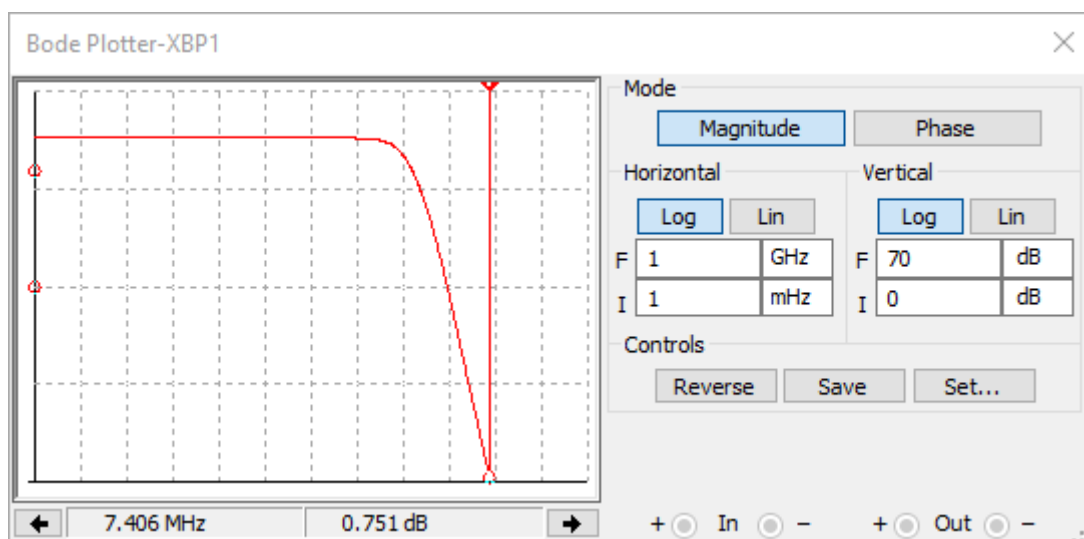


Рис. 2. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика ОУ КР140УД1А с указанием частоты единичного усиления  $f_T$

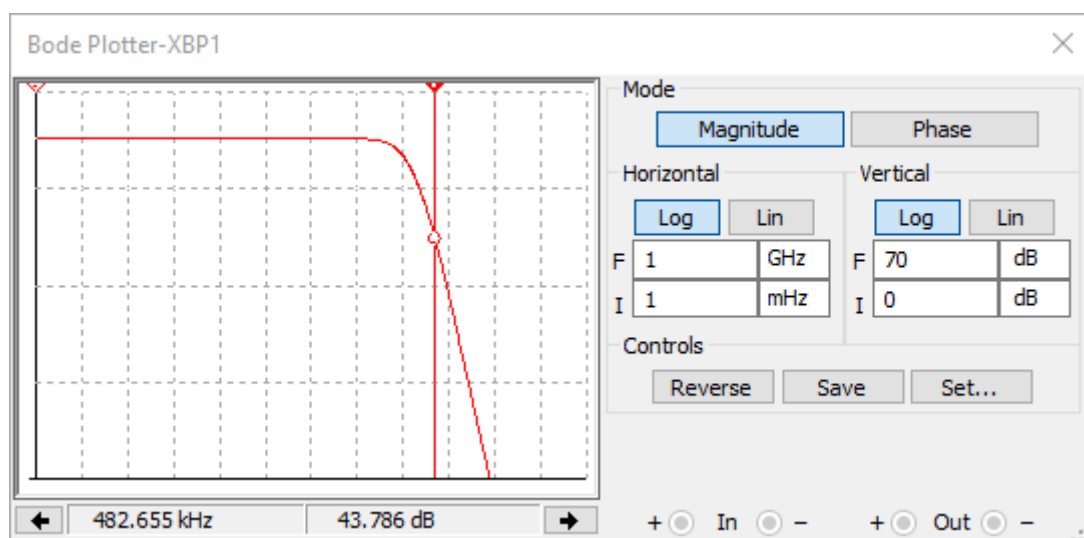


Рис. 3. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика ОУ КР140УД1А с указанием частоты среза  $f_{\text{срез}}$



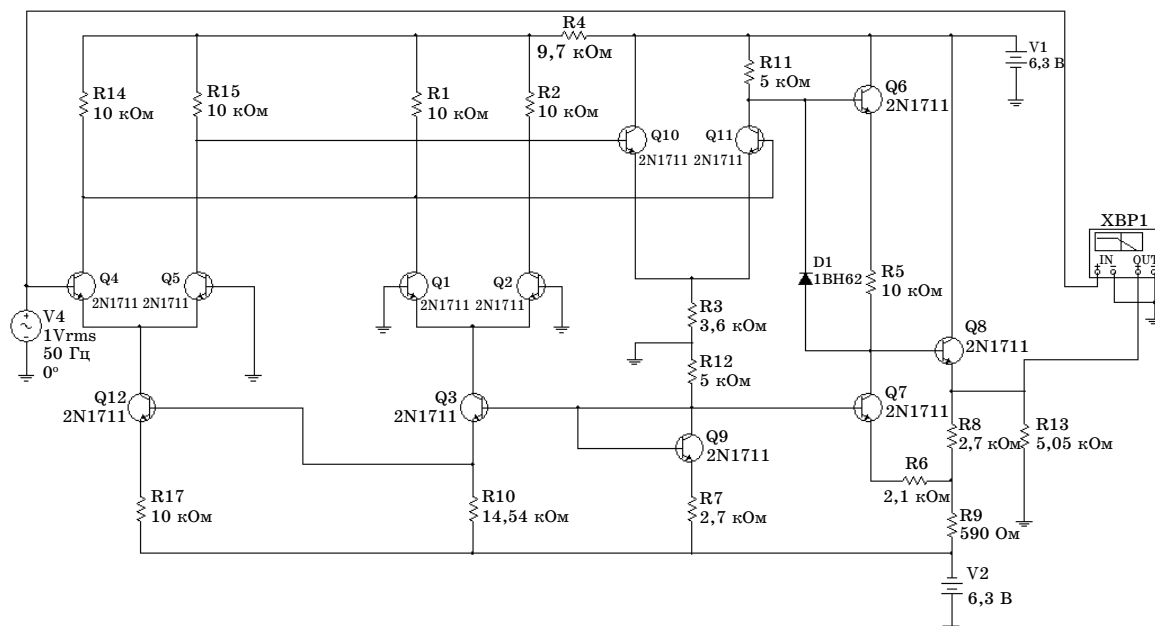


Рис. 4. Имитационная модель мультидифференциального операционного усилителя, спроектированного на основе ОУ КР140УД1А

В результате имитационного моделирования получена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика МОУ на базе КР140УД1А (рис. 5).

На рис. 5 показана частота единичного усиления МОУ  $f_T = 6,342$  МГц. На рис. 6 показано значение частоты среза  $f_{\text{срез}}$ , на которой коэффициент  $K_U$  снизился до 0,707 своего значения. Данное значение равно  $f_{\text{срез}} = 558,795$  кГц.

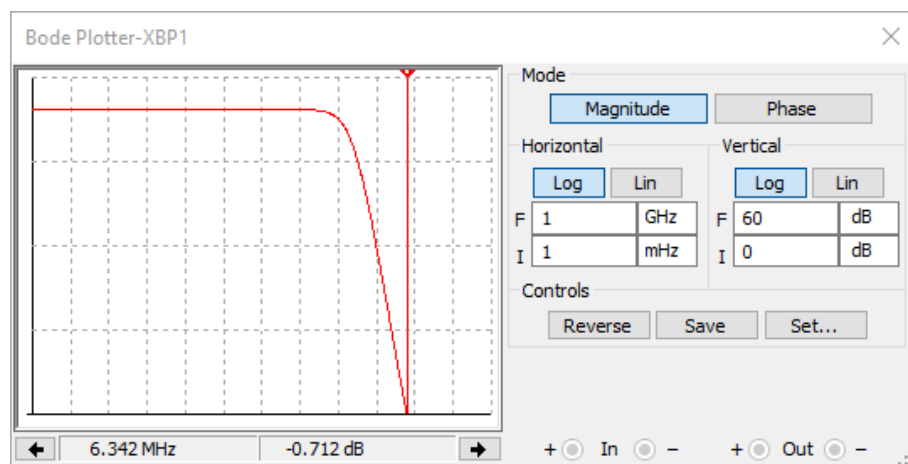


Рис. 5. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика МОУ на базе КР140УД1А с указанием единичного усиления  $f_T$

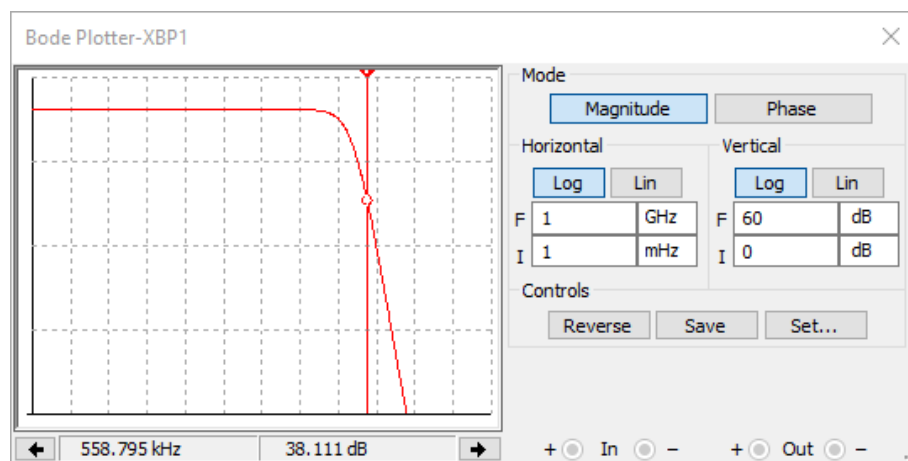


Рис. 6. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика МОУ с указанием частоты среза  $f_{\text{срез}}$

### Заключение

В результате проведенных исследований смоделирована схема операционного усилителя КР140УД1А, а также спроектирована и смоделирована схема МОУ на базе КР140УД1А в среде Multisim. Исследованы частотные свойства данных схем. Полученные результаты представлены в таблице.

Сравнение параметров ОУ КР140УД1А с мультидифференциальным усилителем

Параметры операционного усилителя	Справочные данные для КР140УД1А	Экспериментальные данные для КР140УД1А	Экспериментальные данные для МОУ
Частота единичного усиления $f_T$ , МГц	0,1	7,406	6,342
Частота среза $f_{срез}$ , кГц	—	482,655	558,795

Сравнение частотных параметров ОУ КР140УД1А с МОУ показывает их идентичность. Таким образом, основной задачей МОУ является улучшение параметров, связанных с повышением прецизионности МОУ: уменьшением их напряжения смещения нуля, повышением коэффициента усиления по напряжению и коэффициента ослабления входного синфазного сигнала в условиях воздействия температур и радиации, расширением диапазона линейной работы входных каскадов [9].

### Литература

1. Югай В. Я. и др. Метод повышения синфазной помехоустойчивости мультидифференциальных и

инструментальных усилителей датчиковых систем // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2016. № 5(178). С. 150—161.

2. Крутчинский С. Г., Нефедова А. В., Старченко Е. И. Инструментальные усилители на базе мультидифференциальных ОУ // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2008. № 1. С. 360—365.

3. Манжула В. Г., Прокопенко Н. Н. Прецизионный операционный усилитель с интегрированным мультидифференциальным входным каскадом // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1. — 189 с.

4. Крутчинский С. Г. и др. Прецизионные аналоговые интерфейсы на базе двух мультидифференциальных операционных усилителей // Инженерный вестник Дона. 2013. № 3(26). — 72 с.

5. Крутчинский С. Г., Тимов А. Е. Оптимизация структур инструментальных усилителей с мультидифференциальными операционными усилителями // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2014. № 3. С. 9—14.

6. Прокопенко Н. Н., Бутырлагин Н. В., Пахомов И. В. Основные параметры и уравнения базовых схем включения мультидифференциальных операционных усилителей с высокоимпедансным узлом // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2014. № 3. С. 111—116.

7. Соболев В. А. Применение среды MULTISIM 10.1 для изучения режимов работы биполярного транзистора // Альманах современной науки и образования. 2016. № 5(107). С. 68—72.

8. Осадченко В. Х., Волкова Я. Ю. Операционные усилители: учеб. пособие. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. — 56 с.

9. Пахомов И. В. Мультидифференциальные операционные усилители напряжений и токов с активной отрицательной обратной связью: дисс. ... канд. техн. наук. — Ростов-на-Дону, 2017. — 208 с.

## INVESTIGATION OF FREQUENCY PROPERTIES OF A MULTIDIFFERENTIAL OPERATIONAL AMPLIFIER OF SENSOR SYSTEMS

S. V. Fedorov

Kumertau branch of Orenburg State University, Republic of Bashkortostan, Kumertau, Russia

*This article describes a new class of multidifferential operational amplifiers used in instrumental amplifiers. These amplifiers are widely used in modern information and measurement technology, instrumentation, sensor systems, various analog-to-digital interfaces. A scheme of a multidifferential operational amplifier based on the KR140UD1A has been developed by adding an additional differential stage. Comparative studies of the frequency properties of the operational amplifier KR140UD1A and the multidifferential operational amplifier have been carried out. Conclusions are drawn about the influence of additional differential cascades on the frequency characteristics of the amplifier.*

**Keywords:** instrumental amplifier, multidifferential operational amplifier, sensor systems, frequency properties of an operational amplifier.

Федоров Сергей Витальевич, доцент.  
E-mail: proinfosystem@gmail.com

Статья поступила в редакцию 20 мая 2021 г.

УДК 620.179.1.05

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_1\_14

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СКАНИРУЮЩЕЙ КОНТАКТНОЙ ПОТЕНЦИОМЕТРИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

М. Б. Иваний, канд. техн. наук; В. И. Сурин, канд. техн. наук; А. А. Щербаков  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

*Проведен поточечный неразрушающий контроль сечения разрушения садового инструмента методом сканирующей контактной потенциометрии. Сечение разрушения представляет собой дугообразную поверхность длиной 24 и шириной 1,5 мм, усиленную вертикальным ребром жесткости длиной 4 и шириной 2 мм. При построении потенциограмм выбраны два дцать уровней фиксации для дугообразной поверхности сечения разрушения и четыре уровня фиксации для вертикального ребра усиления. На дугообразных поверхностях сечения разрушения обнаружены три симметрично расположенных концентратора напряжений одного знака, а на ребрах жесткости — симметричные, но противоположные по знаку концентраторы напряжений. Наличие в сечении разрушения локальных областей, характеризующихся высокими значениями сигнала контроля, свидетельствует о внутренних остаточных напряжениях, сохраняющихся длительное время после разрушения на обеих частях разрушенного инструмента.*

**Ключевые слова:** сканирующая контактная потенциометрия, фрактография, разрушение механического инструмента.

При анализе причин разрушения применяют различные фрактографические методы [1], с помощью которых определяют механизм и кинетику разрушения материалов и изделий, устанавливают закономерности влияния структуры, состава и других факторов на развитие процесса разрушения. Как правило, подобные исследования начинают с визуального осмотра изломов, чтобы установить общий характер вязкого либо хрупкого разрушения и определить главную причину разрушения. Визуальный осмотр с применением оптических инструментов позволяет определить и другие важные характеристики. Например, при относительно большом размере зерна (50—100 мкм) данный метод позволяет выявить место начала и характер разрушения изделия (внутризеренный или межкристаллитный). Оптическая фрактография позволяет исследовать образовавшийся излом без предварительной обработки поверхности травлением или полированием с увеличением до 1500 раз. Основные трудности, возникающие при использовании методов оптической фрактографии, заключаются в расфокусировке изображений микроплощадок излома, располагающихся на разных уровнях и под разными углами. В этом смысле большие возможности предоставляют методы электронной микроскопии. Электронный микроскоп со значительно большей глубиной резкости изображения, чем оптический, имеет и более высокую разрешающую способность и возможности широкого диапазона увеличений.

В представленной работе для изучения поверхностей излома и определения механизма разрушения в качестве дополнительного инструмента использовали метод сканирующей контактной потенциометрии (СКП) [2, 3]. Запатентованный и внедренный на нескольких рос-

сийских промышленных предприятиях метод [4] имеет ряд преимуществ перед другими методами контроля, поэтому позволяет расширить круг решаемых задач.

Одной из важнейших характеристик метода СКП является предоставляемая возможность поточечного контроля материалов и изделий в любом месте поверхности, а также способность определять на поверхности или в объеме объекта контроля локализованные области концентрации внутренних напряжений размерами менее 0,1 мм.

В работе дана методика исследования сечения разрушения металлических изделий методом СКП на примере садового инструмента, разрушенного в результате длительного использования; приведены качественные и количественные характеристики процесса разрушения инструмента; сделаны выводы относительно причин его разрушения.

### Методика исследования

Электрофизические измерения были выполнены вручную методом поточечного сканирования вдоль дугообразной поверхности и вертикальной перегородки сечения разрушения. Выбор садового инструмента для проведения исследований обусловлен малыми размерами сечения разрушения рукоятки садовых ножниц, что позволяет выявить ряд очевидных преимуществ метода СКП. Длина и ширина дугообразной поверхности составляли, соответственно, 24 и 1,5 мм, а длина и ширина вертикального ребра жесткости — 4 и 2 мм. Для измерений применяли конический электрофизический преобразователь с чувствительным элементом из меди диаметром 0,3 мм [5, 6]. Потенциометрические измерения были выполнены на всей площади

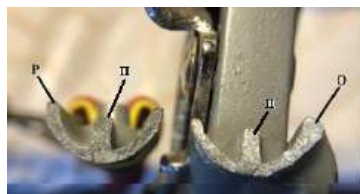
сечения разрушения с суммарным числом точек контроля около четырехсот. Для этого использовали пять треков сканирования для каждой из двух образовавшихся частей разрушения. Частота дискретизации измерений составляла 1 Гц. Материал рукояток и основания ножниц — технический алюминий. Исследования выполнены на программно-аппаратном комплексе ElphysLAB-ИДС мобильной информационно-диагностической системы, размещенной на ноутбуке Huawei MateBook D16.

### Результаты сканирующей контактной потенциометрии

В верхней части рис. 1 приведено изображение разрушенной рукоятки садовых ножниц.



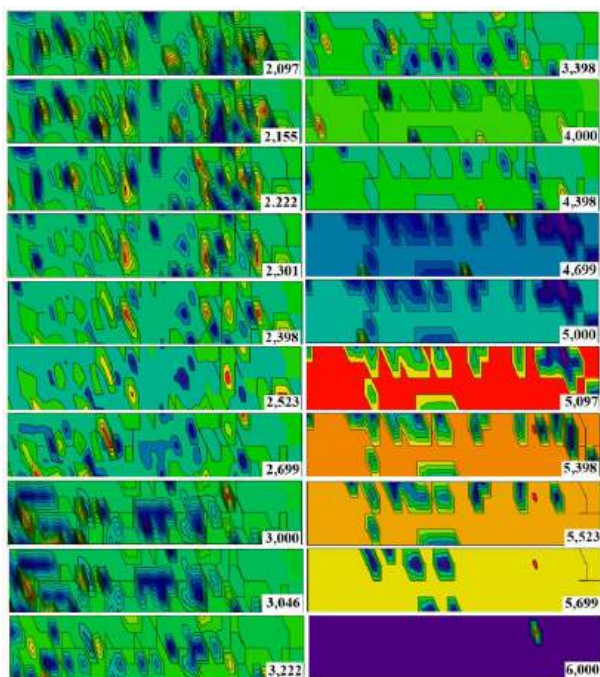
*a*



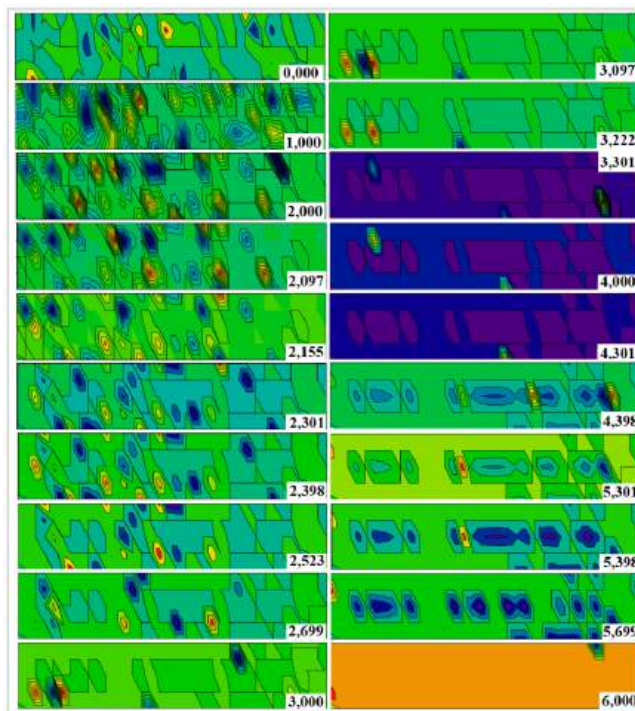
*б*

**Рис. 1. Разрушенная рукоятка садовых ножниц:** *a* — вид сломанных ножниц; *б* — дугообразная поверхность сечения разрушения со стороны рукоятки (Р) и со стороны основания (О) ножниц. Буквой П обозначена вертикальная перегородка ребра жесткости

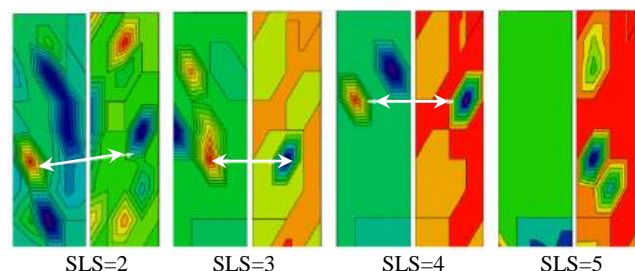
Результаты контроля дугообразной поверхности сечения разрушения представлены на потенциограммах (рис. 2 и 3), вертикального ребра усиления жесткости рукоятки — на рис. 4.



**Рис. 2. Поверхностные потенциограммы рукоятки ножниц в сечении дугообразной поверхности разрушения (Р). В нижнем правом углу указано значение уровня фиксации SLS**



**Рис. 3. Поверхностные потенциограммы основания ножниц (О) в сечении разрушения**



**Рис. 4. Поверхностные потенциограммы вертикального ребра усиления жесткости у рукоятки П (слева) и у основания ножниц (справа) в сечении разрушения для разных значений уровня фиксации. Потентиограммы показаны в вертикальном положении**

По горизонтальной оси (ось  $x$ ) отложено число отсчетов измерений (для дуги — от 0 до 35, для ребра усиления — от 0 до 7), а по вертикальной оси (ось  $y$ ) — номер трека. Для анализа полученных результатов, как и в предыдущих работах авторов, использовали структурный параметр сигнала или уровень фиксации  $SLS = |\lg|\Delta\phi||$ , где  $\Delta\phi$  — контактная разность потенциалов, который выбирали с помощью программируемого амплитудного дискриминатора измерительных сигналов [7, 8].

Наблюдаемый с помощью оптических инструментов излом отличается неоднородностью строения, наличием площадок с различным макрорельефом, шероховатостью и блеском.

Макроструктура излома рукоятки имеет матовый блеск (рис. 1) и заметные вытяжки по краям сечения излома, а со стороны основания — серебристый оттенок и аналогичные вытяжки. На изломе углубления и канавки соединены между собой тонкими перемычками, образо-



вавшимися при разрушении пор в результате объёмного растяжения в условиях отрыва при изгибе. Неоднородность строения излома связана с особенностями процесса разрушения и влиянием неоднородности по отношению к перпендикулярной относительно напряжённо-деформированного состояния, о чем можно судить по рефлексам на представленных потенциограммах.

Разрушение произошло в сечении наибольших изгибных напряжений у основания крепления нижней рукоятки к механизму поворота ножей. Излом произошел в процессе эксплуатации по плоскости, близкой к продольной оси рукоятки. При визуальном осмотре с помощью лупы выявлен вязкий характер разрушения.

Микроструктура излома представляет собой типичный ямочный рельеф с различными диаметрами ямок, образовавшихся при возникновении локальных очагов разрушения (микроступов), с последующими ростом ямок и их слиянием или коалесценцией. Рост микропустот приводит к ослаблению сечения. В результате возрастает вероятность разрушения. Микроуглубления на поверхности излома свидетельствуют о характере медленного подрастания трещины и об образовании при этом значительной пластической деформации.

Сравнение потенциограмм на разных уровнях фиксации позволяет отметить некоторые обнаруженные закономерности. Так, с увеличением уровня фиксации на рис. 2 остаются рефлексы только от вытяжек и по краям кромок сечения, а на рис. 3 — рефлексы от центральной канавки. На низких уровнях фиксации видны мощные концентраторы внутренних напряжений, которые расположены симметрично относительно обеих частей разрушения и выделены на рис. 5 стрелками.

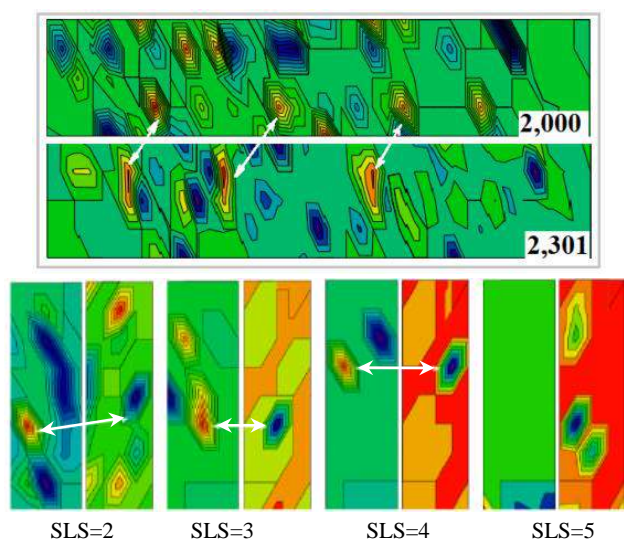


Рис. 5. Потенциограммы сечения разрушения для обеих 0-градусных поверхностей рукоятки. Нижняя потенциограмма повернута на угол 18Р

Более отчетливо симметричные концентраторы видны на потенциограммах ребра усиления жесткости для значений  $SLS = 2, 3$  и 4 (рис. 4), где они также обозначены стрелками. Для уровня фиксации  $SLS = 5$  у рукоятки не обнаружено симметричного концентратора.

Отличие этих концентраторов напряжений от концентраторов, изображенных на рис. 5, заключается в том, что центральные части соответствующих рефлексов на потенциограммах окрашены в красные либо в синие цвета (см. электронную версию), что означает наличие противоположного знака у сигнала контроля (плюс или минус).

Противоположные по знаку сигнала контроля рефлексы соответствуют различному характеру действия внутренних напряжений. Данный результат связан тем, что в процессе коалесценции микропустот образуются вытянутые параболические по форме ямки, которые ориентированы на сопряженных поверхностях излома в противоположных направлениях. Со стороны основания на малой глубине от поверхности излома остаются внутренние близко расположенные пустоты или полости (возможно, одна полость), которые концентрируют вокруг себя сжимающие напряжения. При этом образуются рефлексы синего цвета. Со стороны рукоятки внутренние поры или полости разрушены действием растягивающих напряжений. Образуются рефлексы красного цвета, которые подтверждают наличие на потенциограммах остаточного эффекта действия напряжений.

Рефлексы на потенциограммах имеют форму вытянутых шестиугольных фигур, что означает действие в указанных микрообластях как нормальных, так и касательных остаточных напряжений. Видно также, что максимальное значение сигнала (положительного или отрицательного) приходится на центр шестиугольного рефлекса и постепенно уменьшается в направлении его границ.

Разрушение инструмента обусловлено недостаточной прочностью тонкостенной алюминиевой рукоятки. Следы вязкого разрушения присутствуют на обеих поверхностях рукоятки в сечении излома. На рис. 6 показана потенциограмма для разрушенной части изделия Р, повторяющая по форме сечение разрушения.

Зона сечения, в которой произошел долом изделия, видна на части Р (см. рис. 1) внизу ребра усиления П. В этом месте происходила заключительная стадия разрушения, связанная с уменьшением площади сечения при росте трещины. С одной стороны дугообразной поверхности сечения практически посередине наблюдается канавка, образовавшаяся на последней стадии разрушения. На симметричной части изделия виден соответствующий гребень. Рядом с указанной зоной располагаются два мощных симметричных концентратора напряжений, из трех показанных на нижнем рис. 5.



Третий концентратор, расположенный с левой стороны рисунка, находится ближе к левому краю сечения разрушения (см. рис. 6).

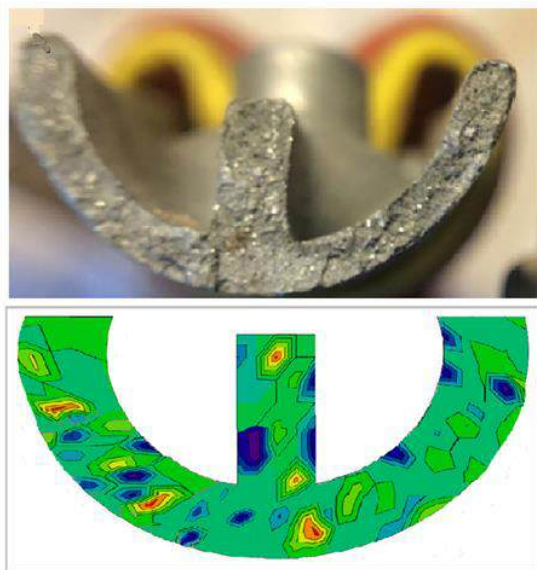


Рис. 6. Сечение разрушения рукоятки Р (вверху) и поверхностная потенциограмма, спроецированная на сечение разрушения для уровня фиксации SLS = 2,398 (внизу)

Таким образом, присутствие на потенциограммах рис. 2 и 3 большого количества шестиугольных рефлексов разного размера и разной формы свидетельствует о присутствии в области сечения излома различных по форме концентраторов. Разделение рефлексов от концентраторов, расположенных в самом сечении (углублений, ямок, перегородок и вытяжек), и от концентраторов, находящихся внутри объема разрушенных частей изделия, является актуальной для метода СКП задачей.

#### Расчет максимальных напряжений в сечении излома

На рис. 7 показана схема нагружения рукоятки, место разрушения и направление приложения рабочей (эксплуатационной) нагрузки. Чёрная сплошная линия в данном случае примерно совпадает с осью рукоятки, которую можно рассматривать как консольную балку.

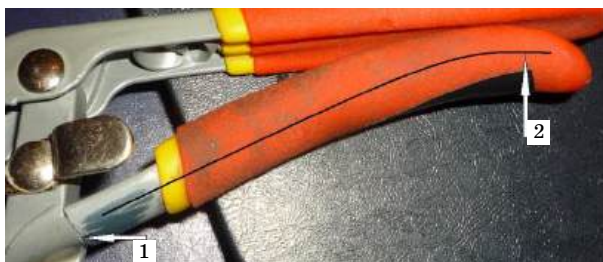


Рис. 7. Схема нагружения рукоятки ножниц: 1 — разрушение в опасном сечении; 2 — приложение рабочей (эксплуатационной) нагрузки

Поскольку радиус осевой линии рукоятки достаточно велик, рассмотрение её как криволинейного стержня не представляется целесообразным. Поэтому предлагается рассчитывать данный объект как простейшую рамную конструкцию, состоящую из двух участков. Расчётные схемы балки показаны на рис. 8.

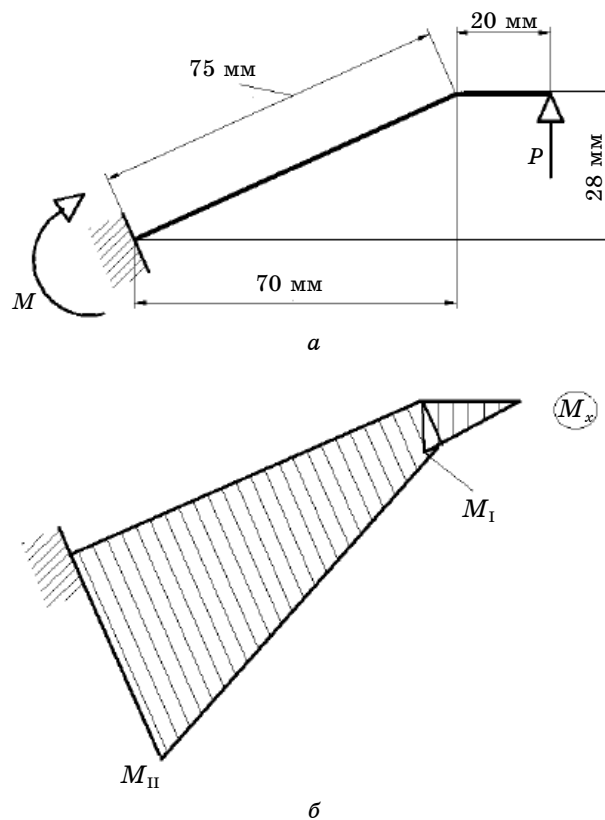


Рис. 8. Расчетная схема балки (а) и эпюра изгибающего момента (б)

Как для любой консольной балки, максимальное значение изгибающего момента отвечает сечению заделки, что соответствует реальному месту разрушения детали (1 на рис. 7).

Размеры поперечного сечения в месте разрушения детали приведены на рис. 9.

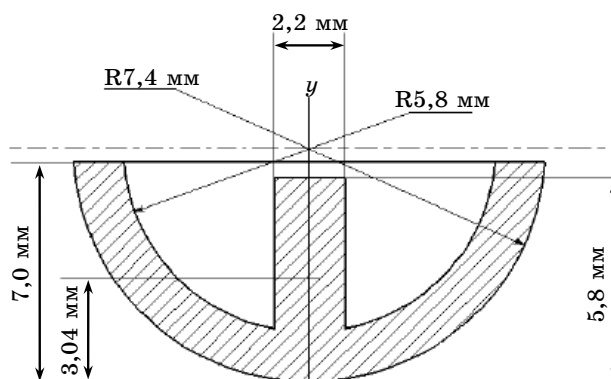


Рис. 9. Размеры поперечного сечения в месте разрушения

В процессе эксплуатации в детали могут возникнуть остаточные деформации, что также сказывается на точности измерений и отклонениях полученных значений от размеров сертифицированного изделия. Методика расчета сводится к следующему.

Изгибающий момент на участке I равен  $M_I = P \cdot 0,02$  нм; изгибающий момент в заделке на участке II  $M_{II} = M_I + P \cdot 0,075 \cos \alpha = 0,02P + 0,09P = 0,09P$  нм.

Момент инерции сечения  $J = 162,3$  мм<sup>4</sup>, координата центра тяжести сечения  $y_c = 3,04$  мм (рис. 9), площадь сечения  $F = 26,43$  мм<sup>2</sup>.

Расчётную нагрузку можно принять только ориентировочно. Примем средний диаметр образца равным 5 мм. Усилие рассчитаем из предела прочности на раскалывание древесины поперёк волокон. Для относительно мягких пород оно равно  $\tau = 1,2$  МПа.

Отсюда усилие среза

$$Q = P = \tau F = \tau \frac{\pi d^2}{4} = 1,2 \frac{\pi \cdot 5^2}{4} = 23,5 \text{ н} \approx 25 \text{ н}.$$

Таким образом, максимальный момент в заделке

$$M_{\max} = 0,09 \cdot 25 = 2,175 \text{ нм},$$

а максимальное напряжение

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{J_x} y_{\max} = \frac{2,25 \cdot 10^3}{162,3} \cdot 3,963 = 54,9 \text{ МПа}.$$

В качестве материала для рукоятки можно взять часто применяемый для таких изделий алюминий марки 6061 (отечественный аналог АД-33). Его механические характеристики приведены в таблице.

Коэффициент запаса по статическим нагрузкам определяется как

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma}.$$

Коэффициент запаса на выносливость определяется по обыкновенной формуле для циклических напряжений:

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma} K_{F\sigma}} \sigma_a + \psi_{\sigma} \sigma_T}.$$

В этой формуле можно принять эффективный коэффициент концентрации  $K_{\sigma} = 1,2$ , так как деталь в сечении разрушения почти гладкая с небольшим закруглением в сторону выступа (см. рис. 7). Характерный размер сечения близок к 10 мм, а поверхность обработана до высокой степени шероховатости (возможно, применено декоративное покрытие), что позволяет принять масштабный коэффициент  $K_{d\sigma} = 1$ , а коэффициент, характеризующий состояние поверхности,  $K_{F\sigma} = 1,1$ . Коэффициент чувствительности к асимметрии цикла для алюминиевых сплавов можно принять равным  $\psi_{\sigma} = 0,37$ .

Рабочая нагрузка при эксплуатации изделия изменяется от нуля до максимума. Следовательно, цикл — отнулевой. Для отнулевого цикла амплитудное и медианное напряжения равны половине максимального:

$$\sigma_a = \sigma_T = \frac{\sigma_{\max}}{2} = 27,5 \text{ МПа}.$$

При уточнении размеров, режимов нагружения, в том числе и с учётом разброса по величине и по времени, рассмотрение вопроса определения коэффициента запаса рассматриваемой детали с учётом циклических нагрузок может являться предметом отдельного исследования.

Данный расчёт является ориентировочным, так как нормативный метод определения долговечности и коэффициента запаса выносливости опирается прежде всего на стабильность технологии. При нестабильной технологии, неоднородности свойств металла и других неблагоприятных факторах требуется проведение усталостных испытаний изделий.

Проведенный прочностной расчет позволяет определить оценочное значение чувствительности метода СКП к образующимся концентраторам напряжений в сечении разрушения изделия.

Механические характеристики алюминия АД-33

Состояние (режим термообработки)	Предел прочности (временное сопротивление) $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести, $\sigma_T$ , МПа	Предел выносливости при симметричном цикле $\sigma_{-1}$ , МПа	Коэффициент запаса по статическим нагрузкам	Коэффициент запаса при циклическом нагружении
0	125	55	60	1,002	1,5
T4	240	145	95	2,64	2,37
T6	318	275	95	5,01	2,37

### Заключение

Проведен поточечный неразрушающий контроль сечения разрушения садового инструмента методом сканирующей контактной потенциометрии вдоль дугообразной поверхности сечения длиной 24 и шириной 1,5 мм, а также вертикального ребра жесткости длиной 4 и шириной 2 мм. Выбор садового инструмента для проведения исследований обусловлен малыми размерами сечения разрушения, что позволяет акцентировать ряд очевидных преимуществ метода СКП.

Причиной разрушения садовых ножниц стало накопление структурных дефектов в процессе эксплуатации в сечении наибольших изгибных напряжений у основания крепления нижней рукоятки к механизму поворота ножей. Излом произошел по плоскости, близкой к перпендикулярной по отношению к продольной оси рукоятки.

При визуальном осмотре с помощью лупы выявлен вязкий характер разрушения: микроструктура излома представляет собой типичный ямочный рельеф с различными диаметрами ямок, образовавшихся при возникновении локальных очагов разрушения (микропустот).

При построении потенциограмм выбраны наиболее представительные с точки зрения анализа причин разрушения уровни фиксации: двадцать уровней для дугообразной поверхности сечения разрушения и четыре уровня для вертикального ребра усиления.

На дугообразных поверхностях обнаружены три симметрично расположенных концентратора напряжений одного знака, а на ребрах жесткости — симметричные, но противоположные по знаку концентраторы напряжений. Наличие в сечении разрушения локальных областей, характеризующихся высокими значениями сигнала контроля, свидетельствует о внутренних остаточных напряжениях, сохраняющихся длительное время после разрушения на обеих частях разрушенного изделия.

Проведенный прочностной расчет позволяет связать действующие в сечении разрушения механические напряжения со значением амплитуды сигнала контроля методом СКП.

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований и выделенным грантом по договору №19-08-00266/19 от 10.01.2019.*

### Литература

1. Шестопалова Л. П., Лихачева Т. Е. Методы исследования материалов и деталей машин при проведении автотехнической экспертизы. — М.: МАДИ, 2017. — 180 с.
2. Сурин В. И., Польский В. И., Осинцев А. В., Джумаев П. С. Применение метода сканирующей контактной потенциометрии для регистрации образования зародышевой трещины в сталях // Дефектоскопия. 2019. № 1. С. 53—60.
3. Абу Газал А. А., Сурин В. И., Шеф Е. А., Бокучава Г. Д., Папушкин И. В. Автоматизация электрофизической диагностики при физико-механических испытаниях материалов // Автоматизация в промышленности. 2019. № 2. С. 48—51.
4. Surin V. New potential for potentiometry // Nuclear Engineering International. 2018. № 63(765). P. 30—32.
5. Сурин В. И., Шульга А. В., Востренков Ю. Ю., Кокряков Р. А. Применение метода сканирующей контактной потенциометрии при механических испытаниях материалов на растяжение // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2015. № 2. С. 24—31.
6. Евстюхин Н. А., Сурин В. И., Оборин С. Б., Чебурков В. И. Использование методов измерений контактно-разностных потенциалов для изучения поверхностной деформации металлов и сплавов: мат. междунар. симп. "Качество, инновации, образование и CALS-технологии". — М.: Фонд "Качество", 2006. С. 160—163.
7. Абу Газал А. А., Джумаев П. С., Осинцев А. В., Польский В. И. Экспериментальное исследование процесса разрушения стали ЭИ847 методами структурного анализа // Письма о материалах. 2019. Вып. 1. № 9. С. 33—38.
8. Alwaheba A. I., Surin V. I., Beketov V. G., Abu Gaza A. A. Results of the application of the contact potential difference method to monitor NPP process equipment // J. Physics: Conference Series. 2020. № 1636. P. 012017.

---

## APPLICATION OF THE METHOD OF SCANNING CONTACT POTENTIOMETRY IN THE STUDY OF MECHANICAL DESTRUCTION OF PRODUCTS

M. B. Ivaniy, V. I. Surin, A. A. Shcherbakov  
National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

*Point-to-point non-destructive testing of the garden tool destruction section by scanning contact potentiometry was carried out. The fracture section is an arcuate surface 24 mm long and 1.5 mm wide, reinforced with a vertical stiffener 4 mm long and 2 mm wide. When constructing the potentiograms, twenty levels of fixation were selected for the arcuate surface of the fracture section and four levels of fixation actography, mechanical tool destruction for the vertical reinforcement rib. for the vertical reinforcement rib. On the arcuate surfaces of the fracture section, three symmetrically located stress concentrators of the same sign were found, and on the stiffening ribs — symmetric, but opposite in sign, stress concentrators. The presence of local regions in the fracture section, characterized by high values of the control signal, indicates internal residual stresses that persist for a long time after fracture on both parts of the fractured tool.*

**Keywords:** scanning contact potentiometry, fractography, destruction of mechanical tools.

---

**Иваний Михаил Борисович**, доцент.  
E-mail: ivanynadezhda@yandex.ru  
**Сури́н Виталий Иванович**, доцент.  
E-mail: VISurin@mephi.ru  
**Щербаков Александр Антонович**, ассистент.  
E-mail: AAShcherbakov@mephi.ru

*Статья поступила в редакцию 9 октября 2021 г.*

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

Г. С. Батршина, канд. пед. наук

Башкирский государственный университет, г. Уфа, Башкортостан, Россия

*Рассмотрены некоторые способы объемного автоматизированного проектирования штучных керамических изделий в строгом соответствии с действующими стандартами и требованиями Российской Федерации.*

**Ключевые слова:** 3D-моделирование, керамическое производство изделий, автоматизированное проектирование, CAD-системы, геометрическое моделирование.

В промышленной сфере система конструкторско-технологической подготовки производства — одна из важнейших составляющих информационной системы, внедряющей технологии объемного проектирования в системах автоматизированного проектирования (CAD-системах), элементы геометрического 3D-моделирования, а также использующей традиционное 2D-черчение (программы Компас-3D, SolidWorks и т. д.). В процессе конструкторско-технологической подготовки производства происходит постепенный переход на 3D-модели, что приводит к необходимости внедрения на практике новых стандартов. 3D-модели — это не только геометрия изделия, но и вся технологическая информация. С их помощью можно определить геометрические плоские проекции детали и разнообразные размерно-технологические данные. Благодаря развитию CAD-систем и технологии 3D-проектирования в чертежах можно автоматически получить геометрические проекции, а также привязать размерно-технологические данные к 3D-моделям изделий. Внедрение в мировую практику нового стандарта ASME E14.41 Standard on Digital Product Definition Data Practices (Практика цифрового определения изделий, США) позволяет более интенсивно использовать технологию объемного проектирования [1].

Благодаря новому стандарту имеется возможность полного оформления технологического требования с привязкой данных к 3D-модели, сохранения введенной информации вместе с геометрической моделью изделия и документирования их на чертеже. Все новые возможности имеются в функциональном наборе практически всех современных CAD-систем. Проектирование 3D-моделей в CAD-системах остро востребовано и в керамическом производстве, где создаются 3D-модели не только самих изделий, но и пресс-инструментов для него. В керамическом производстве растущий спрос на объемы и качество изделий дает возможность использовать новейшую передовую IT-технологию, различные методы и средства проектирования. Общеизвестным условием для изготовления качественных изделий является использование промышленного компьютерного моделирования

в CAD-системах. В данных системах компьютерное моделирование сложного изделия начинают с простых чертежных приложений и заканчивают интегрированными программными комплексами, где обеспечивается единая поддержка всех этапов технологического процесса разработки изделия от технического предложения до технологической подготовки производства, изготовления, испытания, эксплуатации, сопровождения [2].

Целью работы является практическое использование инженерной деятельности современных CAD-систем автоматизированного проектирования как одно из важных инженерных направлений, которые позволяют повышать производительность и качество инженерного труда, сокращать сроки изготовления и внедрения нового изделия, разрабатывать новую технологию производства, получать качественную и надежную продукцию, а следовательно делать ее конкурентоспособной. Во время моделирования изделия конструктор может соединить нестыковки в конструкции изделия и сэкономить на стоимости изготовления физического оригинала. Эффективность использования систем автоматизированного проектирования определяется в какой-то степени совершенствованием аппаратных и программных средств, которые поддерживают функции моделирования и чертежно-конструкторскую документацию, соответствуют стандартам передачи информации, имеют хороший сервис и многофункциональный интерфейс, максимально приближая пользователя к предметной области разработки [3, 4].

**Методы и материалы**

Промышленное компьютерное 3D-моделирование обычно выполняют на основании технического задания (ТЗ), выданного заказчиком, который указывает степень детализации и количество вариантов, отдельные комплектующие детали, их позиционирование и функционирование в составе комплекса-изделия. 3D-модели таких комплектующих в составе рабочего проекта позволяют получить итоговый вариант готовой продукции [1].



Для технологии объемного проектирования автор предлагает использовать следующие программные средства из CAD-систем:

- По отраслевому назначению MCAD (Mechanical Computer-Aided Design). Это программа автоматизированного проектирования отдельных деталей модели и комплектующих (сборка) с параметрическим проектированием на основе конструктивных элементов твердотельного моделирования (Autodesk AutoCAD, SolidWorks, Компас-3D);

- По целевому назначению CAD (Computer-Aided Design). Это компьютерная поддержка проектирования, программа для решения конструкторских задач с оформлением конструкторской документации. В данном приложении имеются модули моделирования трехмерной (объемной) конструкции (детали) и модули оформления чертежей и текстовых конструкторских документов (спецификации, ведомости и т. д.), позволяющие реализовать сквозной цикл подготовки и производства сложных промышленных изделий.

Эти системы называются комплексными (или интегрированными) системами проектирования. В число основных процедур проектирования включают геометрическое моделирование и синтез. Геометрическая модель спроектированного или проектируемого изделия имеет важную роль практически во всех процедурах системы автоматизированного проектирования: инженерный анализ, разработка конструкторской документации и технологической подготовки производства, даже 3D-печать [2, 5–7].

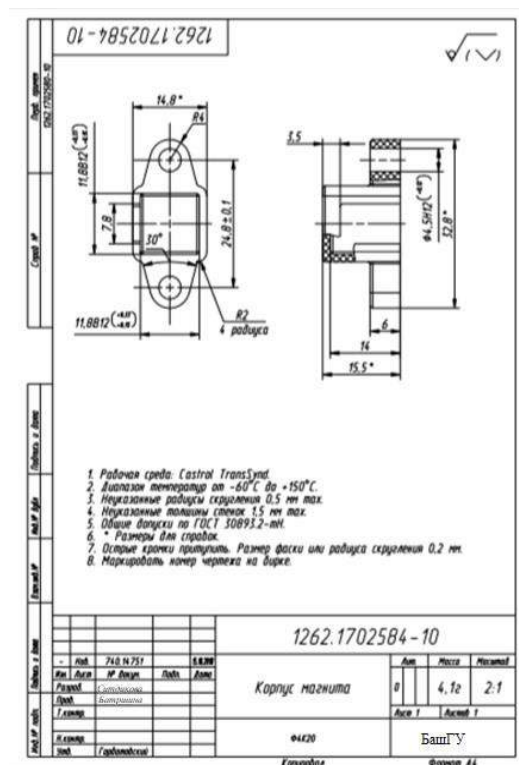
Цель геометрического моделирования — формирование объекта, максимально приближенного к реальному образцу. Он должен удовлетворять требованиям по функциональной характеристике и давать возможность изготовления изделия на реальном оборудовании [8].

### Результаты и обсуждение

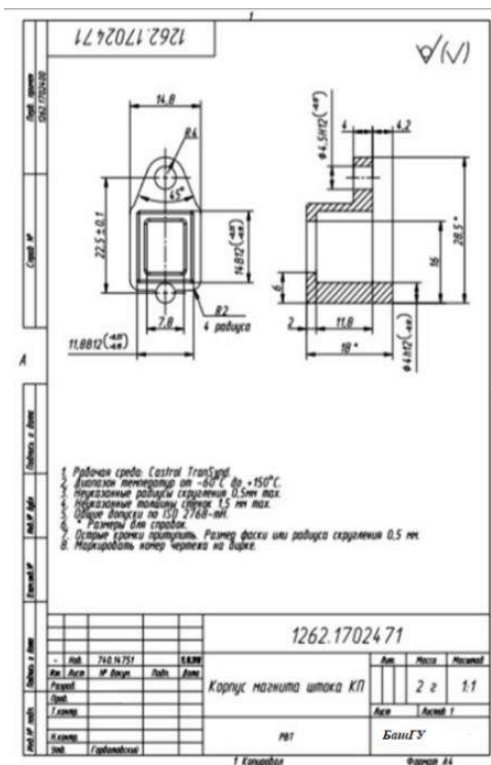
Структуру технологической подготовки производства изделия определяют задачами, для решения которых необходимо спроектировать данное производство изделия, при котором параллельно решают чисто технические, экономические задачи и выполняют расчеты. Как результат настоящей работы в программах CAD-систем автоматизированного проектирования представим 3D-модели штучных керамических изделий и пресс-формы для этих изделий.

Модели для керамических профилированных изделий разработаны системой Компас-3D. Программа разработана российской компанией АО "Аскон" и предназначена для комплексной автоматизации проектно-конструкторских и технологических работ на промышленных предприятиях. Основная задача программы Компас-3D — создание системы трехмерного твердотельного моделирования (трехмерный моделиер) [7, 8].

Технология создания изделий "Корпус магнита", "Фильтрующая сетка" в программе Компас-3D. Проектирование и разработку соответствующей конструкторской документации начнем с создания чертежей для изделий (рис. 1).



а



б

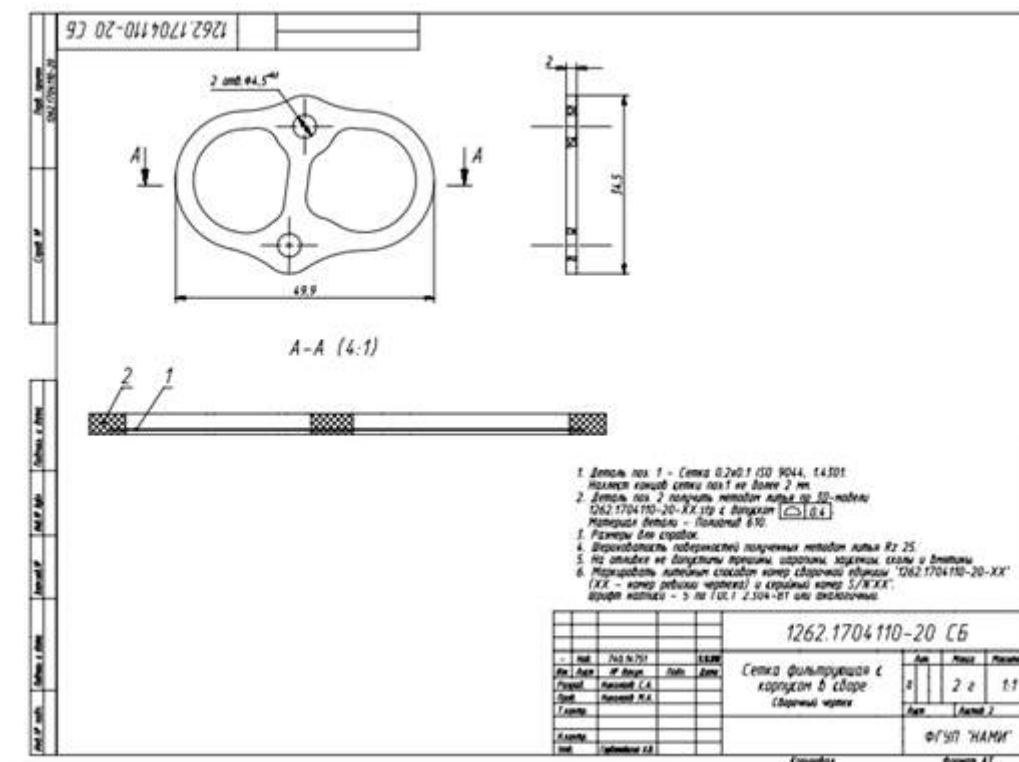


Рис. 1. Ассоциативный сборочный чертеж:

а — корпус магнита 1262.1702584-10; б — корпус магнита штока КП 1262.1702471;  
в — фильтрующая сетка 1262.1704110-20

Построение детали начнем с создания контура (эскиза) базового тела и преобразования его в пространстве при помощи стандартных инструментов посредством опера-

ций выдавливания, поворота вокруг своей оси, кинематической операции, построения объекта по сечениям в нужную форму (рис. 2) [8, 9].

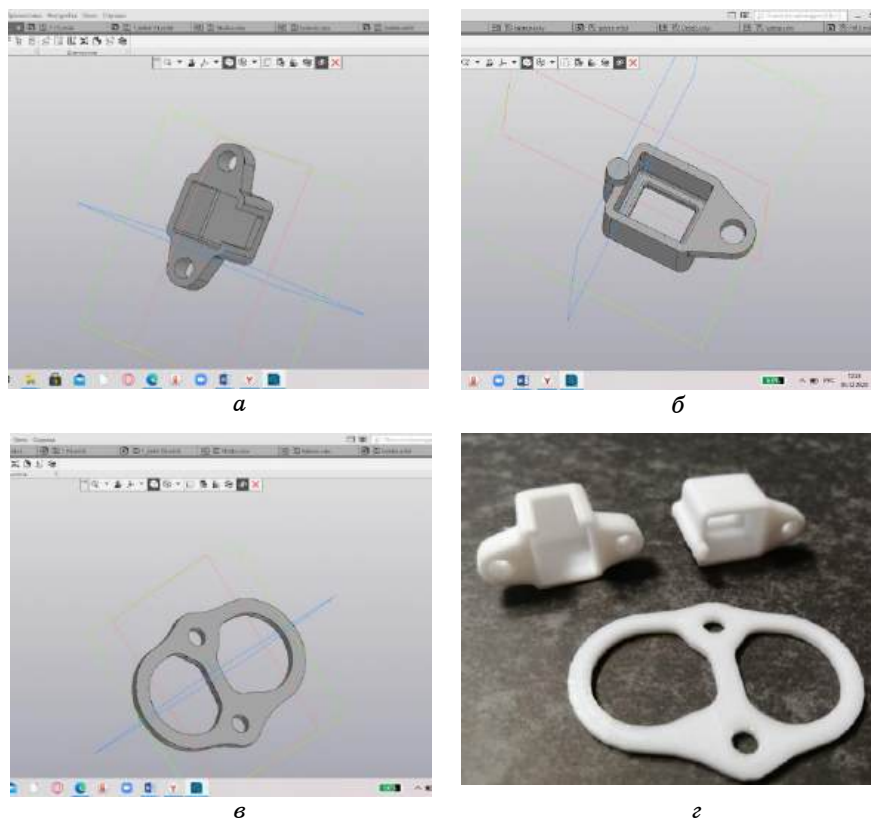
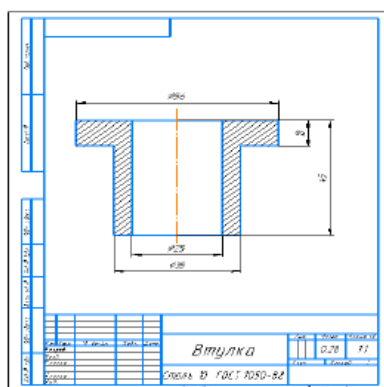


Рис. 2. Трехмерные модели изделий:

а — корпус магнита 1262.1702584-10;  
б — корпус магнита штока КП 1262.1702471;  
в — фильтрующая сетка 1262.1704110-20;  
г — 3D-печать изделий



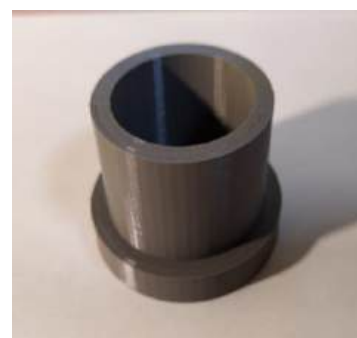
Изделие "Втулка" (рис. 5).



а



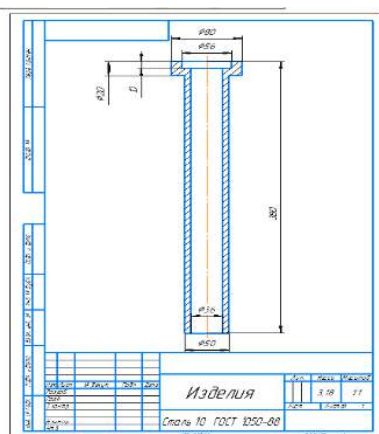
б



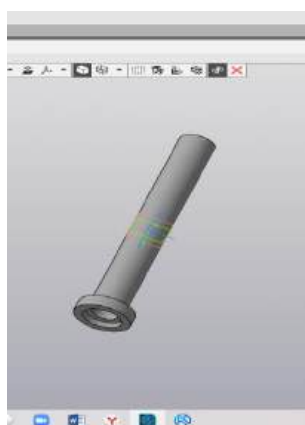
в

Рис. 5. Изделие "Втулка":  
а — чертеж; б — модель; в — 3D-печать

Изделие "Труба" (рис. 6).



а



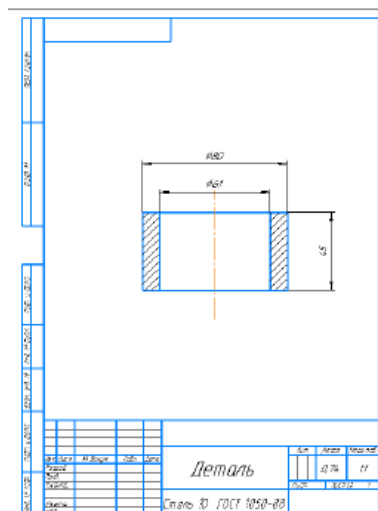
б



в

Рис. 6. Изделие "Труба":  
а — чертеж; б — 3D-модель; в — готовое изделие

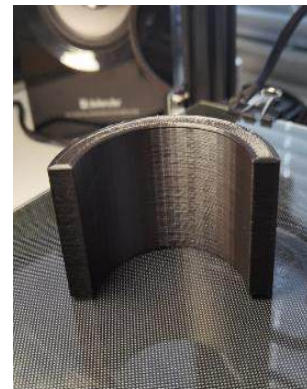
Изделие "Большой цилиндр" (рис. 7).



а



б



в

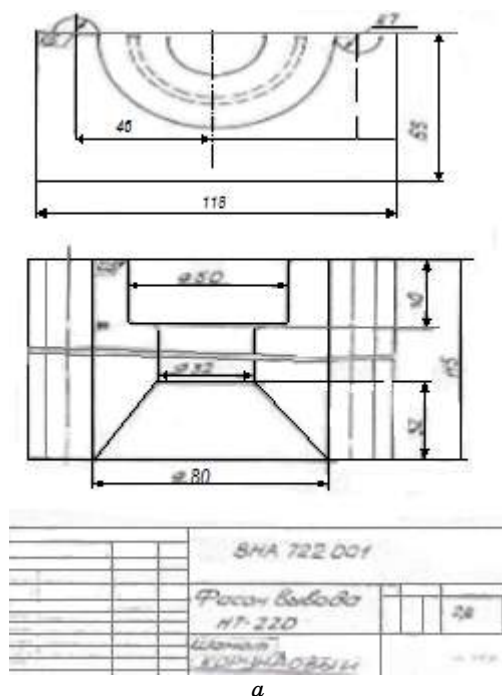
Рис. 7. Изделие "Большой цилиндр":  
а — чертеж; б — модель; в — 3D-печать изделия



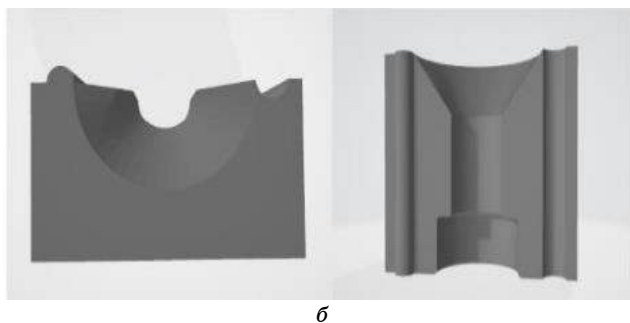
В результате 3D-моделирования точно известно, как будет выглядеть изделие и какие элементы понадобятся для его изготовления.

Создание следующего керамического изделия и пресс-формы для его прессования рассмотрим в программе SolidWorks, относящейся к системе автоматизированного проектирования для инженерного анализа и подготовки производства изделий любой сложности и назначения. SolidWorks является ядром интегрированного комплекса автоматизации предприятия, с помощью которого осуществляется поддержка жизненного цикла изделия в соответствии с концепцией CALS-технологий, включая двусторонний обмен данными с другими Windows-приложениями и создание интерактивной документации [11].

Изделие "Фасон вывода НТ-220" по чертежу 8НА 722 001 (рис. 8).



а

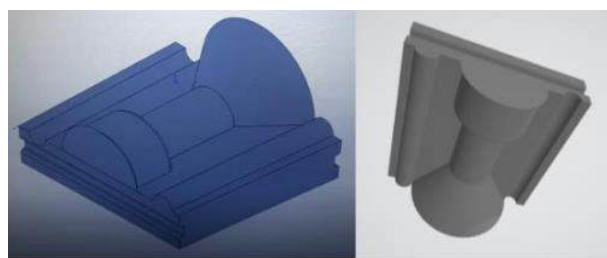


б

Рис. 8. Изделие "Фасон вывода НТ-220":

а — оформление чертежа прессуемого керамического изделия; б — 3D-модель изделия

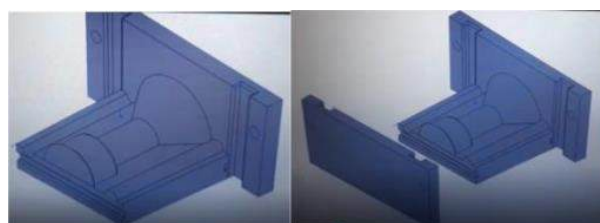
На рис. 9 показаны конструкции пресс-формы керамического изделия "Фасон вывода НТ-220".



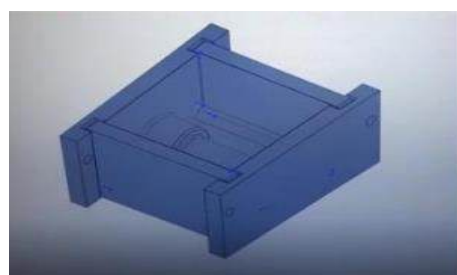
а



б



в



г

Рис. 9. Конструкции пресс-формы изделия "Фасон вывода НТ-220":

а — дно; б — стенки; в — соединение отдельных разработанных частей; г — пресс-форма

После выполнения необходимых операций выдавливания и вырезания, черчения эскизов, добавления смещенных плоскостей и скругления получаем результат сборки комплектующих деталей и сопряжением, соединенные вместе (рис. 9, г), — 3D-модель пресс-формы для керамического изделия "Фасон вывода НТ-220".

Полученная нами 3D-модель керамического изделия "Фасон вывода НТ-220" после прессования приведена на рис. 8, б.

### Заключение

После завершения изготовления керамических изделий по индивидуальному проекту обязательно проводят испытания. Проведение таких испытаний позволяет удостовериться в



высоком качестве произведенной конструкции: решается задача на прочность и устойчивость изделия, сравниваются размеры трехмерной модели с реальным результатом, делается инженерный анализ. Эти расчеты позволяют конструктору принимать правильные и обоснованные конструктивные решения, повышать качество и экономить время на разработку изделия, делая его конкурентоспособным [1, 9, 10].

CAD-система автоматизированного проектирования позволяет не только выполнять чертежи и модели на достаточно высоком профессиональном уровне, но и рассчитывать различные механические передачи, валы, напряженно-деформируемое состояние и т. д. На практике большинство проектов сводится к расчетам тех или иных видов информационной передачи.

Компьютерное 3D-моделирование с использованием CAD-систем может быть параметрическим, твердотельным, поверхностным и т. д. Промышленная сфера в керамическом производстве подразумевает массовый выпуск изделий с использованием 3D-моделей. Использование CAD-систем в решении промышленной задачи объемного моделирования дает следующие преимущества:

- многократное снижение затрат на изготовление физического прототипа изделия;
- мгновенная разработка нового изделия;
- максимально точное представление формы, размера, текстуры, оценивание внешнего вида и эргономики изделия;
- экономия массы времени инженеров-технологов (проектировщиков) при создании нового проекта или модели.

Таким образом, на практике инженер-технолог получает проверенное испытанное 3D-изделие для массового производства [1, 3, 4].

### Литература

1. Пиликов Н. А. Объемное проектирование изделий машиностроения с применением стандартов трехмерного проектирования // Конструкторские задачи. 2010. № 5(59). С. 49—53.
2. Батршина Г. С. Компьютерное моделирование керамического изделия: мат. VI Междунар. молодежной науч.-практ. конф. — Уфа: РИЦ БашГУ, 2020. С. 44—51.
3. Алямовский А. А. и др. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике (+ CD-ROM). — М.: БХВ-Петербург, 2017. — 800 с.
4. Алямовский А. А. и др. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. — М.: БХВ-Петербург, 2016. — 800 с.
5. Батршина Г. С. Компьютерное проектирование пресс-формы для керамического изделия // Norwegian J. development of the International Science. 2019. № 11-1(36). С. 30—34.
6. Батршина Г. С., Батршина С. И., Ситдикова С. А. Метод проектирования профилированного изделия в среде Компас-3D: сб. статей по мат. Междунар. науч.-практ. конф. "Индустриальная Россия: вчера, сегодня, завтра". — Уфа: Изд. НИЦ "Вестник науки". 2019. С. 28—34.
7. Большаков В. П. Построение 3D-моделей сборок в системе автоматизированного проектирования "Компас". — СПб.: СПб ГЭТУ "ЛЭТИ", 2005. — 80 с.
8. Ганин Н. Б. Автоматизированное проектирование в системе Компас-3D. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 360 с.
9. Evtushenko E. I., Moreva I. Yu., Sysa O. K., Bedina V. I., Trunov E. M. Control of the structural and phase characteristics of raw materials in the technology of fine ceramics // Refractories and Industrial Ceramics. 2011. V. 51. № 6. P. 397—398.
10. Vereshchagin V. I., Buruchenko A. E., Menshikova V. K., Mogilevskaya N. V. Ceramic materials based on diopside // Glass and Ceramics. 2011. V. 67. № 11—12. P. 343—346.
11. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике (+ DVD-ROM). — М.: БХВ-Петербург, 2013. — 669 с.

## AUTOMATED DESIGN OF CERAMIC PRODUCTS

G. S. Batrshina

Bashkir State University, Ufa, Bashkortostan, Russia

*The article uses some methods of three-dimensional computer-aided design of piece ceramic products, strictly applying the current standards and requirements of the Russian Federation.*

**Keywords:** 3d modeling, ceramic product manufacturing, computer-aided design, CAD systems, geometric modeling.

Батршина Гузель Сайфулловна, доцент.  
E-mail: guzel.com@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13 октября 2021 г.

УДК 681.518.2

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_1\_28

## ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Д. А. Колесников, канд. техн. наук

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

*Рассмотрены вопросы повышения эффективности процессов нанесения покрытий при изготовлении технических деталей с применением информационных технологий, использующих техническое зрение, системы регистрации и контроля, комплексы датчиков и видеонаблюдения с распознаванием. В основу системы положено несколько программных продуктов, таких, как WinCC OA, Teamcenter, MS SQL, работающих в комплексе с вновь созданными приложениями автоматизированных рабочих мест.*

**Ключевые слова:** автоматизация, программирование, интеграция, гальваника, контроль, видеонаблюдение, технологическое моделирование, технологический процесс, базы данных.

Цель проводимой работы — создание программного комплекса для автоматизированной регистрации параметров технологических процессов нанесения покрытий в условиях реального производства непосредственно на рабочем месте. Реализация данного комплекса позволит повысить точность и корректность проводимых операций и снизить количество бракованных изделий, что, в свою очередь, даст экономический эффект и снизит общее время производства партии деталей. Рассмотрим операции нанесения медно-серебряных покрытий в специальных ваннах. Эти операции занимают значительное время и при возникновении ошибки в режимах или иных параметрах повторная обработка требует дополнительных и зачастую значительных затрат времени.

Планируемая разработка обеспечит наиболее полное соответствие технологического процесса цифровому двойнику изделия. Кроме того, будет проведен автоматизированный сбор параметров процесса посредством установки комплекта датчиков на ванны и другое оборудование, задействованное в операциях нанесения покрытий. Датчики регистрируют наиболее значимые для обеспечения качества параметры и передают информацию напрямую в

автоматизированную систему, где оператор сверяет их с шаблонными значениями из документации. Это позволит вовремя скорректировать режимы и характеристики работ и избежать неправильного проведения операции. Для повышения удобства и обеспечения независимости от настольных ПК планируется разработка мобильных автоматизированных рабочих мест (АРМ), которые будут устанавливать на планшеты Samsung с операционной системой Android.

Этапы работы системы следующие:

- подключение системы к проводимому технологическому процессу;
- загрузка параметров для текущей детали и операции;
- получение параметров с датчиков;
- вывод данных в форму приложения на АРМ;
- проверка данных оператором;
- принятие решения о необходимости корректировки параметров или режимов;
- занесение результатов в журнал.

На рис. 1 показана упрощенная схема работы комплекса.

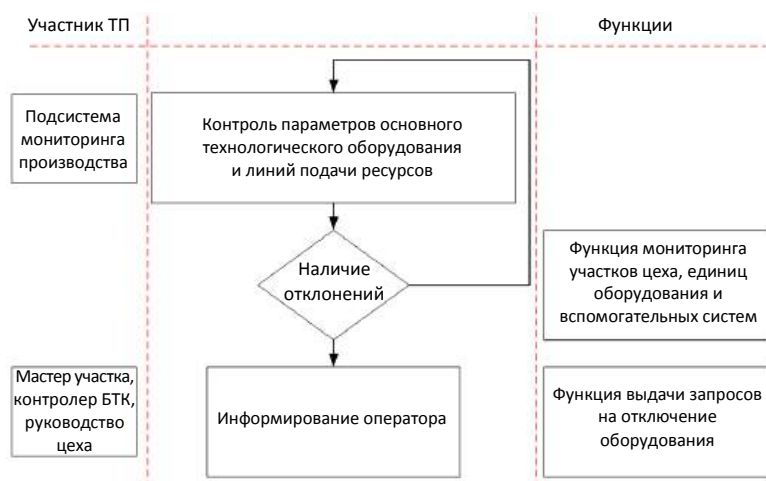


Рис. 1. Работа системы в рамках техпроцесса

Для работы с параметрами и структурой технологических процессов планируют использовать базу данных в среде MS SQL, которая будет хранить групповые и единичные технологические процессы, все операции, входящие в них, данные об изделии, режимы и параметры операций. Изначально эта информация консолидируется в системе Teamcenter, используемой на предприятии заказчика. Таким образом, есть возможность исключить ручной ввод данных путем автоматизации процесса их передачи из Teamcenter непосредственно в БД в SQL (рис. 2). Большим плюсом является наличие в Teamcenter функции экспорта данных из своей внутренней базы в стандартном формате. Это позволит избежать необходимости изучения способов получения доступа к хранилищу системы, которое, вероятно, является закрытым.

Решение этой задачи видится в следующем: формирование промежуточного файла обмена JSON системой Teamcenter и запись его в заданное хранилище, создание дополнительного приложения, запускаемого из Teamcenter и выполняющего процедуры "разбора" файла экспорта с последующей записью всех требуемых полей в базу данных SQL. В результате получается полностью исключить ручной ввод и значительно сократить время для формирования базы данных для работы системы.

Приложение будет работать в составе АРМ "Технолог", которое реализует следующие функции:

- идентификация пользователя;
- просмотр загруженных технологических процессов;
- редактирование единичных технологических процессов;
- создание единичных технологических процессов.

Штатным вариантом ввода техпроцесса является загрузка из Teamcenter. Существует утверждённый регламент ввода для деталь/сборочной единицы (ДСЕ) основного производства. Предполагается, что заказчик к началу промышленной эксплуатации должен разработать регламент ввода технологического процесса (ТП) в Teamcenter для ДСЕ вспомога-

тельного производства и единичных техпроцессов. Их ввод должен осуществляться по факту получения таких ДСЕ в производство.

Упрощённый ввод параметров техпроцесса применяют в случае отсутствия в Teamcenter информации о техпроцессе и принятия решения о возможности работы по алгоритму упрощённого ввода.

В случае наличия технологической документации только в бумажном виде (техпроцессы на ДСЕ, не входящие в перечень основной номенклатуры; ДСЕ, выпускаемые по разовым и единичным техпроцессам; ПИТ) и принятии решения о нецелесообразности заведения техпроцессов в Teamcenter в системе применяется алгоритм упрощённого ввода параметров техпроцесса [1]. При этом фиксируется, согласно какому документу был осуществлён ввод параметров (единичный или разовый).

Введенные в систему таким образом параметры будут формировать шаблон технологического паспорта (ШТП).

Технолог выбирает из списка необходимых для данной ДСЕ техпроцесс и вводит общую площадь покрываемой поверхности (ППП) в соответствующее поле на экранной форме исходя из количества ДСЕ в данной партии и площади одной ДСЕ.

Способы создания ШТП могут быть основаны на:

- ГТП;
- ранее созданном ШТП.

Система поддерживает привязку ШТП к изделию (двигателю) или к вспомогательному производству (поле "Группа ШТП").

Упомянутое ранее приложение будет работать в начале алгоритма системы АРМ "Технолога". Решено реализовать его в виде утилиты для командной строки (рис. 3).

Режим работы будет полностью автономным, т. е. оператор АРМ "Технолог" не увидит дополнительных форм или сообщений за исключением ситуаций возникновения ошибок при передаче данных, когда исходный массив параметров или структурных элементов технологического процесса прочитан некорректно или содержит недопустимые значения.

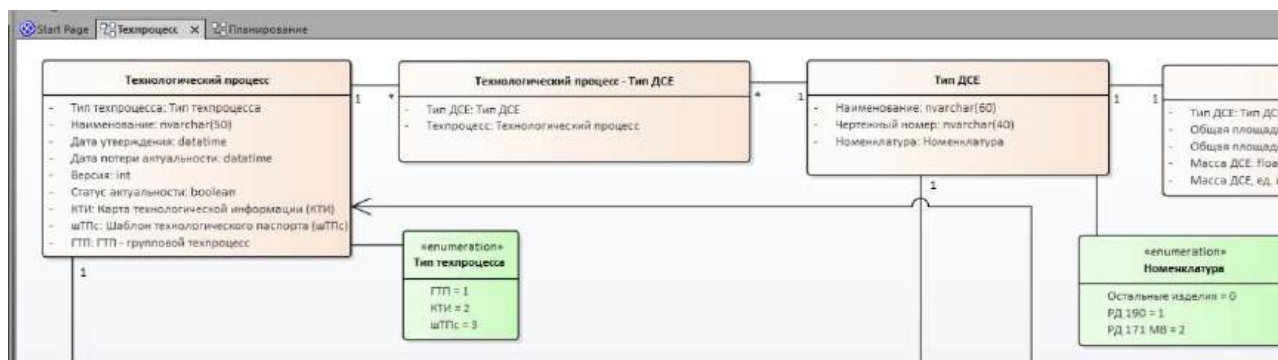


Рис. 2. Ключевые таблицы базы данных

Использование:

```
sarp-dataConverter [--f || --d || --l] [--y] [filePath || dirPath || filePath1 ... filePathN]
```

Режим источника данных:

- f - файл
- d - директория
- l - список

утвердительное согласие на вопросы о продолжении работы

путь или пути до файла(ов) с исходными данными, директориями или файлами списков

## Выбор источника входных данных

1. Один файл - ключ "--f";
2. Все файлы в директории - ключ "--d";
3. Файл со списком входных файлов - ключ "--l".

Рис. 3. Использование приложения интеграции

Для работы приложения требуется внедрить функцию его запуска в систему Teamcenter, установить необходимые ключи из списка (рис. 3, внизу) и передать имя файла экспорта в качестве параметра. В рабочем режиме приложение будет выдавать только лог и код ошибки при ее возникновении.

По результатам работы программы будет сформирована база в среде MS SQL, содержащая базовый набор таблиц, приведенный в табл. 1.

Таблица 1

Базовый набор таблиц в СУБД

Маршрутная карта
ДСЕ, тип
ДСЕ, экземпляр
Маршрутная карта-операция
ГТП, описание
ГТП, технологическая операция
Переход операции ГТП
КТИ, описание
КТИ, технологическая операция
КТИ, переход
Обозначения покрытия
<b>Цифровой паспорт ДСЕ</b>
Технологический переход выполненный
Результат замера режима технологического параметра
Измерительный канал
Фотофиксация, акт
Фотофиксация, серия
<b>Цифровой паспорт оборудования</b>
Замер химического состава
Действия по обслуживанию ванн
Наименование действия с ваннами (список)
Медленно меняющиеся параметры
Наименования статических параметров ванн

Для упрощения работы решено создать в базе дополнительно несколько справочников, из которых можно брать информацию для стандартных и типовых элементов техпроцесса (табл. 2).

Таблица 2

Набор таблиц справочников в СУБД

<b>Справочник оборудования</b>
Список подразделений по принятию и согласованию решений (по форме 15)
Журнал режима сушки
Виды контрольных операций
Несоответствия
Вероятные причины несоответствия гальванического покрытия
Оборудование технологическое основное, тип
Оборудование технологическое основное, экземпляр
Химический состав ванны
Норматив химического состава
Норматив физического параметра
<b>Справочник оснастки</b>
Технологическая оснастка, тип
Технологическая оснастка, экземпляр
Оборудование общего назначения, экземпляр
Типы оборудования общего назначения
Типы оснастки
Исправность оборудования
<b>Справочник контрольно-измерительного инструмента</b>
Измерительный инструмент, тип
Измерительный инструмент, экземпляр
Наименования измерительного инструмента
<b>Служебные таблицы для организации списков</b>
Наименование типа оборудования
Периодичность очистки и промывки промывных ванн

В целом работа АРМ "Технолог" будет сведена к формированию рабочего технологического процесса под конкретное задание на основе группового техпроцесса, получаемого из Teamcenter и хранимого в базе данных. Предполагается, что перед запуском системы она автоматически формируется и полностью готова. При необходимости ввода новых элементов используется упомянутое приложение интеграции.

Помимо АРМ "Технолог" в системе будет реализовано АРМ "Химик". Оно отличается работой с большим количеством данных, получаемых с датчиков, установленных на оборудовании.

Это АРМ имеет ключевое значение для контроля технологических операций, поскольку работает непосредственно с операциями нанесения покрытий, которые являются основными объектами и занимают значительную часть времени от общего времени процесса.

Перечень функций АРМ:

- планирование работы по обслуживанию процессных ванн;
- ведение цифрового "Журнала состава ванн";
- ведение цифрового "Журнала действий с ваннами";
- введение цифрового "Журнала корректировок состава ванн";
- получение, хранение и обработка информации о качестве воды в ваннах и системе водоподготовки;
- получение, хранение и обработка информации о проведении вспомогательных технологических операций (долив воды, корректировка состава электролита и т. д.);
- получение данных о результатах мониторинга работы оборудования (ванн);
- блокировка проведения технологических операций и генерация отчетов об останове оборудования по результатам обработки проб;
- получение, хранение и обработка данных химического анализа состава рабочих сред в процессных ваннах от энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра;
- получение, хранение и обработка данных химического анализа состава рабочих сред в процессных ваннах от первичных преобразователей, установленных в процессных ваннах.

Для получения параметров по данным операциям в системе предусмотрена установка датчиков на ванны, в которых выполняется операция нанесения покрытия, таким образом, чтобы

можно было получить те характеристики и значения, которые оказывают решающее влияние на процесс.

В целях максимального охвата всего оборудования, задействованного в технологическом процессе, в системе предусмотрена графическая схема (рис. 4), отражающая полный набор ванн и прочих агрегатов цеха, чтобы оператор мог выбрать текущий рабочий процесс и место, на котором он будет выполнен.

Большинство параметров оборудования можно контролировать стандартными датчиками, однако для процесса нанесения покрытия на изделия оказалось важным расположением деталей и электродов в ванне, которое с помощью имеющихся в наличии датчиков установить проблематично. Кроме того, необходимо решить задачу проверки правильности завеса согласно разработанной схеме, т. е. нужно иметь графическую схему реального завеса для текущей операции и шаблонную схему, с которой можно ее сравнить и вынести заключение о допустимости продолжения операции. Для достижения поставленной цели принято решение использовать систему видео- и фотофиксации с последующим распознаванием расположения и построения схемы завесы на основе алгоритмов распознавания изображений.

Возможны две реализации: через специальные метки, нанесенные на объекты распознавания, и через применение нейросетей, которые смогли бы распознать схему целиком [2—5]. Оба метода достаточно проработаны в существующих решениях, но имеют свои особенности: первый требует хорошего качества камеры без искажений и наличия самих меток на изделиях, второй — большого количества фотографий на реальном месте с разными вариантами завеса (рис. 5).

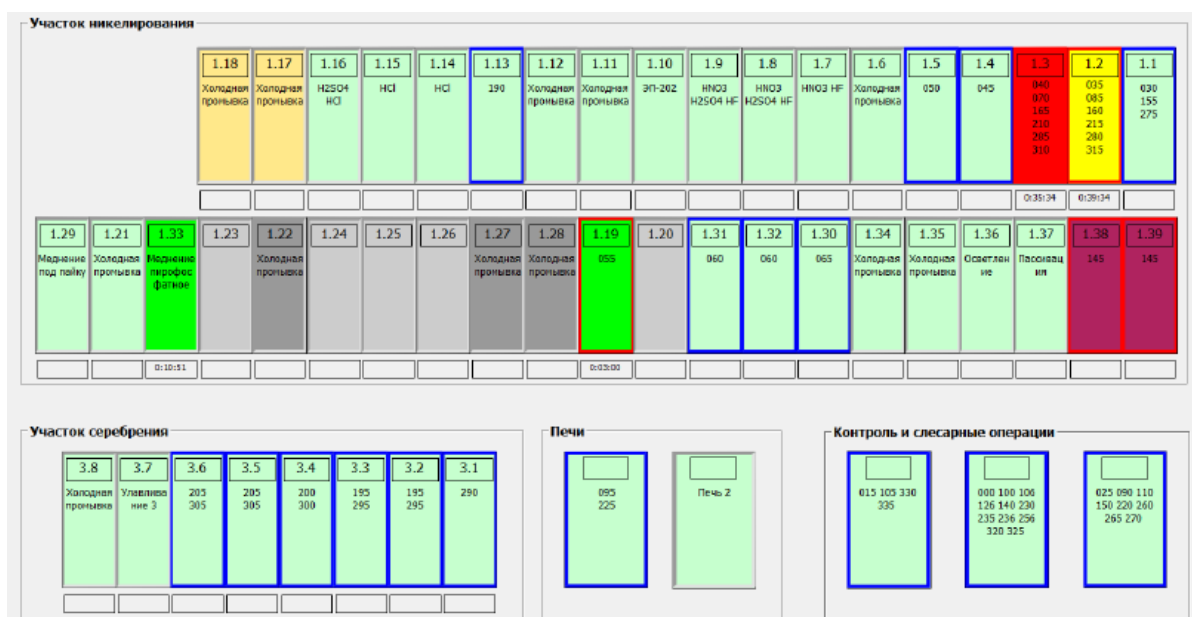


Рис. 4. Схема размещения оборудования

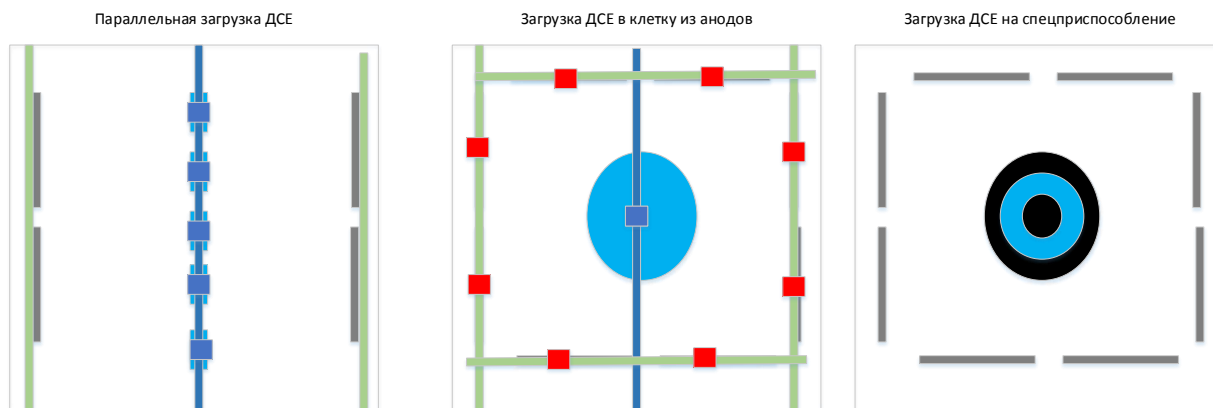


Рис. 5. Типовые схемы завеса

Эти требования оказались достаточно проблематичными конкретно в данной работе. Если повесить качественную камеру на нужное место не вызывает особых трудностей, то нанесение меток на все возможные и будущие объекты — не такая простая задача по причине физической невозможности нанесения меток на некоторые детали и системы подвеса. В случае нейросетей возникает сложность в реализации самого накопления нужного количества снимков всех возможных комбинаций деталей и подвесов, ввиду того что для этого нужно иметь в свободном доступе все возможные детали, поступающие в производство, что нельзя обеспечить одновременно. Кроме того, на сбор и подготовку такого количества изображений будет затрачено значительное время, что, очевидно, замедлит разработку системы на месяцы. В итоге было решено остановиться на системе с метками и маркировать границы ванны и опорные элементы подвесов, что является решаемой за допустимое время задачей.

На следующем этапе рассмотрены варианты подвеса камеры для успешного распознавания меток. Здесь основная проблема состоит в невозможности подвеса прямо над ванной по техническим причинам и условиям проведения процесса. В результате решено установить камеру, как это показано на рис. 6.

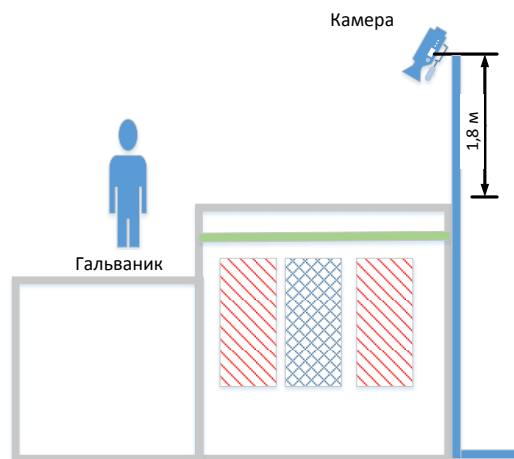


Рис. 6. Расположение камеры над ванной

В качестве программного решения предлагается включить в систему дополнительный модуль распознавания изображений на основе меток. Прототип находится на завершающей стадии разработки и в дальнейшем будет интегрирован в одно из АРМ. На стадии тестирования программа показала неплохие результаты, успешно распознав все метки размером 4×4 см.

На финальном этапе проектирования системы произведена выработка схем идентификации пользователей, имеющих доступ к разным компонентам и задействованных в технологических процессах. Так как на предприятии уже имела автоматизированная пропускная система с электронными пропусками на базе NFC RFID, было решено использовать их и для авторизации в системе. В этих целях были предусмотрены аппаратные расширения в виде настольного сканера NFC, который подключается к АРМ и позволяет идентифицировать пользователя по его пропуску, что является наиболее удобным решением в данном проекте. Поскольку система имеет и мобильные рабочие места, удачным выходом послужило наличие встроенных NFC-датчиков в планшетах, на которых планировалась установка этих АРМ.

В итоге пользователи системы были разделены на следующие роли: "Гальваник", "Контролер", "Мастер участка", "Технолог", "Химик", "ЛПР". Под эти роли разработаны отдельные АРМ, представленные в виде программных модулей.

Практически все компоненты уже реализованы. Планируется развертывание системы в подразделениях заказчика. Для успешного внедрения будут реализованы следующие этапы:

- подготовка рабочих мест на производстве (установка датчиков, меток, камер, персональных компьютеров);
- построение сети, в которой будет работать система;
- развертывание базы данных;
- тестирование оборудования на месте;
- установка программного обеспечения;
- установка мобильных АРМ;
- тестирование работы системы в целом.



По итогам тестирования системы планируется оценить реальную эффективность и сопоставить процент ошибочных операций за определенный промежуток времени с таковым до внедрения решения, так как этот показатель является наиболее важным в данном проекте.

### Заключение

Предлагаемое решение является достаточно сложным, однако ожидаемый эффект от его реализации должен заметно повлиять на качество производства деталей любых изделий, где требуется проведение технологических операций с длительным сроком завершения, так как в подобных условиях каждая такая операция в случае ошибки приводит к значительным потерям времени, не говоря уже о потерях на брак. Большая часть действий в разрабатываемой системе автоматизирована, что также приводит к снижению ошибок, возникающих при ручном их выполнении.

По результатам проведенных работ делаем вывод, что можно получить повышение качества процессов нанесения покрытий (снизить процент ошибочных операций) путем реализации автоматизированных элементов контроля некоторых ключевых операций. Таким образом, будет получен экономический эффект за счет снижения количества бракованных изделий и сокращения времени выпуска партии.

### Литература

1. Цыркoв А. В. Методология проектирования в мультимедийной информационной среде. — М.: ВИМИ, 1998. — 281 с.
2. Вудс Р., Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2005. — 1072 с.
3. Дж Ту., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. — М.: Мир, 1978. — 414 с.
4. Вапник В. Н., Червоненкис А. Я. Теория распознавания образов. Статистические проблемы обучения. — М.: Наука, 1974. — 416 с.
5. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. — М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. — 752 с.

## SPECIFICS OF THE REALIZATION OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR REGISTERING THE PARAMETERS OF COATING PROCESSES

D. A. Kolesnikov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*The article considers the issues of increasing of the efficiency for coating processes in the manufacture of technical parts using modern information technologies, including technical vision, registration and control systems, sensor complexes and video surveillance with recognition. The system is based on several software products, such as WinCC OA, Teamcenter, MS SQL, working in conjunction with newly created workstation applications.*

**Keywords:** automation, programming, integration, electroplating, control, CCTV, technological modeling, technological process, database.

---

Колесников Дмитрий Александрович, доцент.  
E-mail: thysis@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 1 октября 2021 г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОЧАГОВ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ В СПЛАВЕ Д16Т НА ДЕФЕКТАХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

В. И. Сурин, канд. техн. наук

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Г. Д. Бокучава, канд. физ.-мат. наук; И. В. Папушкин

Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Московская область, Россия

*Исследовано влияние дефектов механической обработки поверхности образца из сплава Д16Т на его деформационное упрочнение при растяжении в интервале прикладываемых напряжений от 50 до 500 МПа. При этом использованы методы сканирующей контактной потенциометрии и метод дифракции тепловых нейтронов. Показано, что в области упругой деформации при напряжении 50 МПа дефекты механической обработки, как и в случае нулевой нагрузки, сконцентрированы главным образом в середине и по краям образца. Следы точения и шлифовки поверхности в виде соответствующих пятен и полос на потенциограммах при нагрузках более 50 МПа на высоких уровнях фиксации трансформируются в отдельные рефлексы размерами 1–2 мм, которые представляют собой локальные области деформационно-упрочненного материала, излучающего волны механических напряжений.*

**Ключевые слова:** деформационное упрочнение поверхности, метод сканирующей контактной потенциометрии, метод дифракции тепловых нейтронов.

Дефекты поверхностных слоев металлов и сплавов исполняют активную роль в процессе деформационного упрочнения и влияют на прочность и долговечность оборудования и изделий. Такие дефекты в условиях действия механических нагрузок служат источниками концентрации напряжений. Поэтому контроль за состоянием поверхностных слоев ответственных изделий является практически важной задачей как при их изготовлении, так и при эксплуатации.

Проведено исследование влияния дефектов механической обработки поверхности образца из сплава Д16Т на его упрочнение при растяжении в интервале прикладываемых напряжений от 50 до 500 МПа. При этом использованы методы неразрушающего контроля: метод сканирующей контактной потенциометрии (СКП) [1, 2] и метод дифракции тепловых нейтронов [3, 4]. Сплав Д16Т был выбран для исследования как широко применяемый в авиационной, автомобильной и других отраслях промышленности [5, 6].

Для анализа результатов измерений методом СКП разработан и активно применяется при решении различных задач программируемый амплитудный дискриминатор (ПАД) электрических сигналов [7]. С помощью регулируемой шкалы амплитудной дискриминации ПАД в диапазоне до 40 дБ выполняется анализ результатов. Дискриминатор производит автоматическую отсечку тех значений амплитуды сигнала, которые превышают установленный уровень, что позволяет исследовать составляющие сигнала контроля в разных масштабах и на разных уровнях фиксации. Узкополосный фильтр позволяет настраивать ПАД по амплитуде, начиная с уровня десятых микровольт, с шагом 0,1 мкВ, широкополосный — от единиц до десятков милливольт.

### Экспериментальная часть

**Дифракция тепловых нейтронов.** Эксперименты по дифракции нейтронов проводили на фурье-дифрактометре ФСД на импульсном реакторе ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ (г. Дубна). Специальная корреляционная методика — использование быстрого фурье-прерывателя для модуляции интенсивности первичного нейтронного пучка и RTOF-метода для накопления данных [8, 9] — позволяет получать на ФСД дифракционные спектры с высоким разрешением ( $\Delta d/d \approx 2 \cdot 10^{-3}$  при угле рассеяния  $2\theta = 140^\circ$  и  $\Delta d/d \approx 4 \cdot 10^{-3}$  при  $2\theta = \pm 90^\circ$ ) в широком диапазоне межплоскостных расстояний, что обеспечивает необходимую точность регистрации небольших смещений дифракционных пиков и их уширений.

Измеренные дифракционные спектры были обработаны методом профильного анализа по Ритвельду [10]. Время экспозиции дифракционного спектра для каждого режима нагрузки на образце составляло 4 ч.

Образец из сплава Д16Т был испытан на растяжение на нагрузочной машине LM-29. Шероховатость поверхности образца до испытаний составляла  $R_a = 12,5$  мкм. Испытания образца были проведены для одиннадцати различных значений нагрузок от нулевой до 500 МПа с интервалом 50 МПа. Деформацию кристаллической решетки вычисляли по известной формуле:

$$\varepsilon = (a - a_0) / a_0, \quad (1)$$

где  $a$  и  $a_0$  — параметры кристаллической решетки деформированного и недеформированного материала соответственно. Из линейной аппроксимации данных в области упругости сделаны оценки для модуля упругости и коэффициента Пуассона:  $E = 67$  ГПа и  $\nu = 0,29$  (рис. 1).

На рис. 2 показан вид образца до и после испытаний.

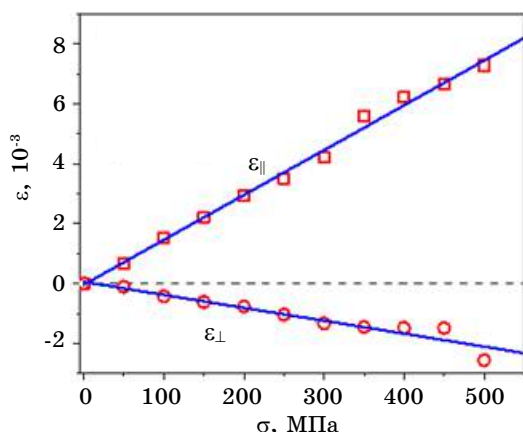


Рис. 1. Диаграмма нагружения образца из сплава Д16Т, построенная по данным дифракции нейтронов: величина деформации кристаллической решетки образца  $\varepsilon$  из сплава Д16Т в зависимости от приложенного напряжения  $\sigma$



Рис. 2. Вид образца из сплава Д16Т до (справа) и после (слева) испытаний на растяжение. Относительная деформация образца после испытаний составила 3,2 %

Сравнение поведения ширины дифракционных пиков образцов из сплава Д16Т в зависимости от межплоскостного расстояния  $d_{hkl}$  с функцией разрешения прибора, измеренной на эталонном образце, показало, что основной вклад в уширение пиков вносит микродеформация, связанная с повышенной плотностью дислокаций в исследуемом материале. При этом вклад в уширение пиков из-за малых размеров когерентно рассеивающих кристаллитов практически отсутствует. Усредненная по всем индексам Миллера ( $hkl$ ) микродеформация оценена из уширений дифракционных пиков по сравнению с эталонным образцом [11]. При нагрузках в диапазоне от 0 до 400 МПа микродеформация слабо варьируется с тенденцией к

небольшому росту (см. далее). При нагрузках свыше 400 МПа наблюдал значительный рост микродеформации материала из-за образования пластической деформации.

**Сканирующая контактная потенциометрия.** При проведении измерений использовали конический преобразователь с углом конуса, близким к  $90^\circ$ , и радиусом скругления вершины, равным примерно 0,3 мм. Шероховатость поверхности  $R_a$  чувствительного элемента, изготовленного из аустенитной стали X18H10T, соответствовала значению 0,15 мкм. Длина измерительной базы образца для сканирования равнялась 53 мм.

Потенциограммы были построены для различных уровней фиксации SLS ( $SLS = |\lg|\varphi||$ , где  $\varphi$  — амплитуда сигнала). Сканирование поверхности производили прибором Spectroelph последовательно с общим количеством треков более тридцати и средней скоростью сканирования 1,7 мм/с.

#### Построение и обсуждение линейно-временных потенциограмм

Для анализа результатов СКП выбраны уровни фиксации выше пятого, поскольку на низших уровнях для всех значений нагрузок заметных изменений на потенциограммах не обнаружено. В отличие от поверхностных потенциограмм линейно-временные потенциограммы показывают распределение структурных неоднородностей на линейном участке контроля (в данном случае вдоль образующей цилиндрической поверхности образца). На потенциограммах видны цветные картины рефлексов (см. электронную версию), которые представляют изображения небольших локальных объемов, излучающих волны механических напряжений (ВМН).

На рис. 3 показана линейно-временная потенциограмма для уровня фиксации  $SLS = 2$ , полученная перед началом испытаний. На ней видны дефекты механической обработки поверхности образца: пятна и полосы, обозначенные буквой А, а также мощные источники (концентраторы) внутренних напряжений (ИБН), обозначенные буквой В. Полосы на потенциограммах соответствуют винтообразным следам точения на токарном станке, образованным на поверхности в виде неглубоких рисок. Известно, что при токарной обработке образуется поверхностная деформация или происходит наклеп. Последующее шлифование при обработке приводит к удалению упрочненного слоя и образованию растягивающих остаточных напряжений, которые залегают на глубине нескольких микрометров от поверхности. Более отчетливо поверхностные дефекты видны на рис. 4 (сконцентрированы в центральной части образца).

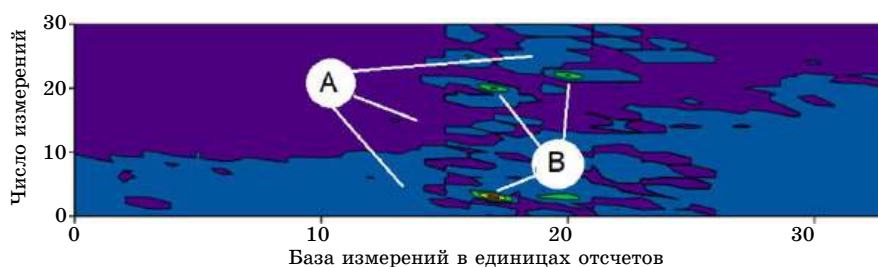


Рис. 3. Линейно-временная потенциограмма образца из Д16Т перед началом испытаний для уровня  $SLS = 2$

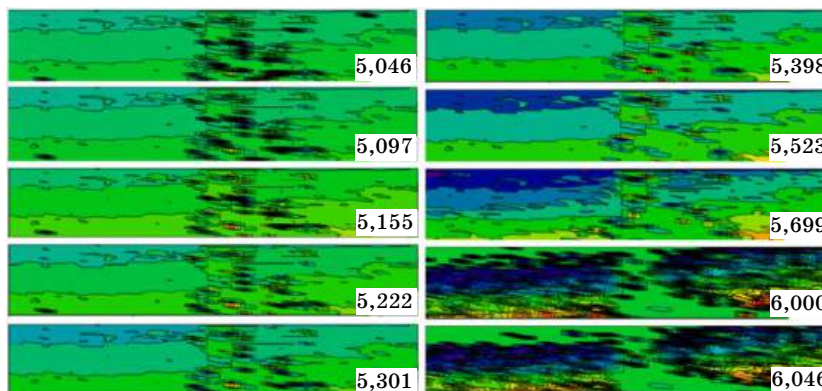


Рис. 4. Линейно-временные потенциограммы образца из Д16Т перед началом испытаний для высоких значений уровня фиксации (указаны в нижнем правом углу)

Как следует из потенциограмм, рефлекс от ИВН (В) присутствуют в разных частях образца вдоль всей базы измерений. В частности, они видны на втором и двадцатом измерительных треках (на рисунке по оси числа измерений), а также на втором и двадцать втором треках. В первом случае (для источника В1) временной интервал между фиксациями ИВН равен примерно 600 с, во втором (В2) — примерно 650 с. Таким образом, частота фиксации обоих ИВН примерно равна  $1,7 \cdot 10^{-3}$  Гц. Забегая вперед, отметим, что и для других значений нагрузок наблюдаются рефлексы от двух указанных ИВН.

Рефлексы от них видны также в отсутствие нагрузки на более высоких уровнях фиксации

(рис. 4). В интервале 5,046—5,398 видно большое скопление ИВН в центральной части образца. Для источника В1, показанного на рис. 1, на более высоких уровнях фиксации частота фиксации возрастает. Для источника В2 частота фиксации также возрастает, но менее заметно, чем для источника В1. При  $SLS = 6,000$  и  $6,046$  по обеим сторонам образца относительно его середины появляется большое количество слабых по мощности ИВН.

В начале испытаний на растяжение при нагрузке, соответствующей напряжению 50 МПа, на потенциограммах можно увидеть заметные отличия от предыдущей картины (рис. 5) как по цвету (см. электронную версию), так и по характеру распределения рефлексов.

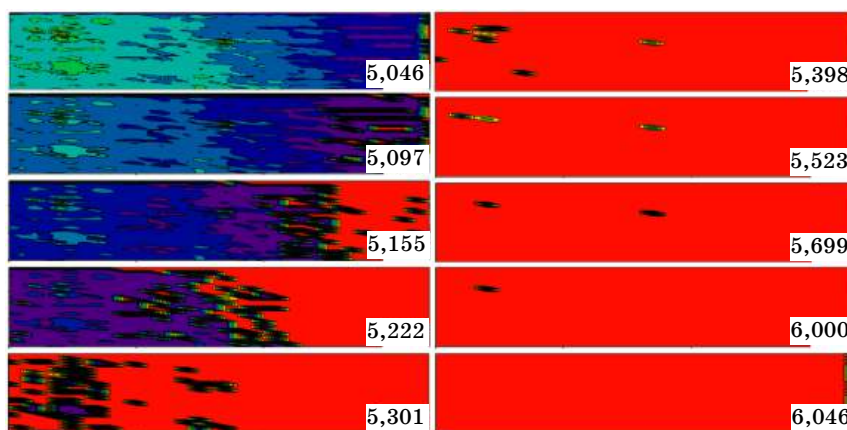


Рис. 5. Линейно-временные потенциограммы для нагрузки 50 МПа

Так, в интервале 5,398—6,046 заметно уменьшается число источников: на уровне 6,000 остается один из них, а на уровне 6,046 их нет совсем. Продолжая сравнение, отметим, что в интервале 5,046—5,301 для начала испытаний без нагрузки на потенциограммах нет изменений, а для следующей нагрузки (50 МПа) видны заметные различия. Также видно, что с увеличением SLS источники группируются с левой стороны образца, т. е. со стороны прикладываемой нагрузки. Источник В1, протяженность которого составляет примерно 2 мм, хорошо виден в интервале 5,398—5,699.

При распространении волн в среде, поглощающей энергию, интенсивность волны с удалением от источника колебаний постепенно уменьшается, т. е. наблюдается затухание волны. В соответствии с теоремой Парсевала [12] мощность источника ВМН определяется интегральной функцией  $E_{\text{mech}}$ :

$$E_{\text{mech}} = \int_{t_1}^{t_2} [\Delta\varphi(t)]^2 dt. \quad (2)$$

При этом предполагается, что она пропорциональна той части механической энергии, которая при деформировании поглощается электронной системой. Разделив правую часть (1) на величину временного интервала  $\Delta t$  ( $\Delta t = t_2 - t_1$ ), обычно равного времени измерения, получим другую важную характеристику:

$$W = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} [\Delta\varphi(t)]^2 dt. \quad (3)$$

Значения мощности источников в зависимости от уровня фиксации дефекта

Уровень фиксации	Мощность, Вт	Примеры источников
0	1	Точечная поверхностная коррозия, следы механической обработки поверхности
1	$10^{-2}$	Проникающая коррозия, глубокие поверхностные и объемные дефекты
2	$10^{-4}$	Стенки отверстий и канавки в металлах после механического сверления и фрезерования, очаги усталостного разрушения в объеме
3	$10^{-6}$	Очаги механических разрывов и усталостного разрушения
4	$10^{-8}$	Зародышевые трещины
5	$10^{-10}$	Зоны образующегося мартенсита, фазовые переходы, зародышевые трещины, полосы Чернова—Людерса
6	$10^{-12}$	Спаренные дефекты, скопления и кластерные образования
7	$10^{-14}$	Отдельные, глубокорасположенные в объеме дефекты

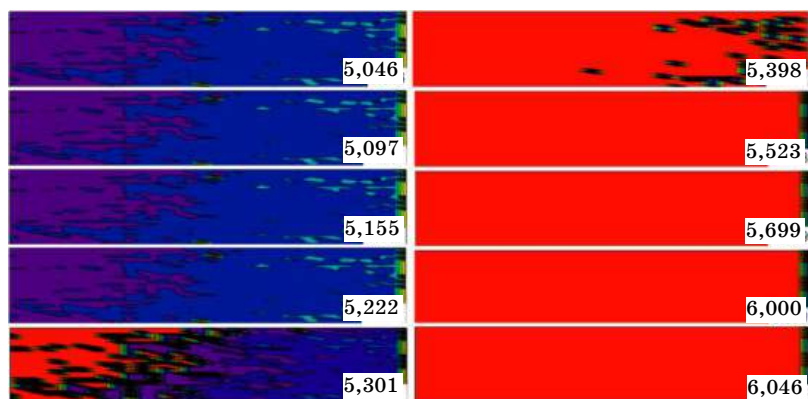


Рис. 6. Линейно-временные потенциограммы для нагрузки 100 МПа

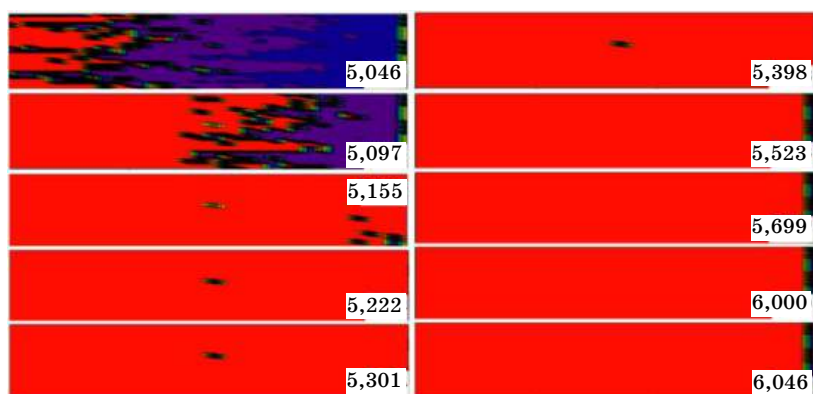
Согласно следствию теоремы Парсевала величина  $W$  есть средняя мощность чисто резистивной нагрузки, численно равной 1 Ом, к концам которой приложено электрическое напряжение  $\Delta\varphi$ . В методе СКП напряжение  $\Delta\varphi$  представляет собой дифференциальную контактную разность потенциалов, зависящую от работы выхода электронов.

В таблице приведены значения мощности источников для разных уровней фиксации, рассчитанные по формуле (2) для временного интервала, равного одной секунде. Приведенные данные получены при идентификации дефектов разными методами неразрушающего контроля.

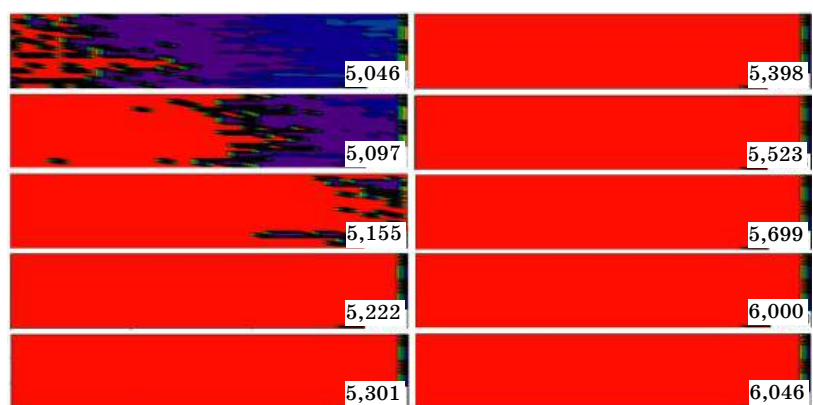
Сравнивая рис. 5 и 6, отметим, что при нагрузке 100 МПа на потенциограмме (уровень 5,398) с правой стороны видно много одиночных дефектов, которых нет на данном уровне при нагрузке 50 МПа.

На построенных потенциограммах с увеличением нагрузки на высоких уровнях фиксации не наблюдается отдельных рефлексов (рис. 6, 7). Образующаяся микропластическая деформация постепенно охватывает весь объем образца, что и приводит к начальной стадии деформационного упрочнения. При этом маломощные источники перестают интенсивно излучать низкоамплитудные упругие волны (рис. 8—11). Заметно отличаются потенциограммы при нагрузках 450 и 500 МПа (рис. 12—14). Видно также, что плотные по интенсивности цвета полосы на поверхности образца, образованные в результате шлифования, на высоких уровнях фиксации состоят из многочисленных отдельных рефлексов.

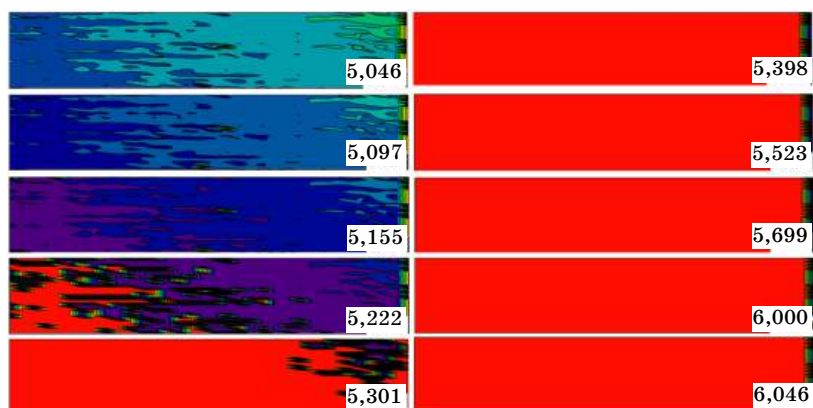




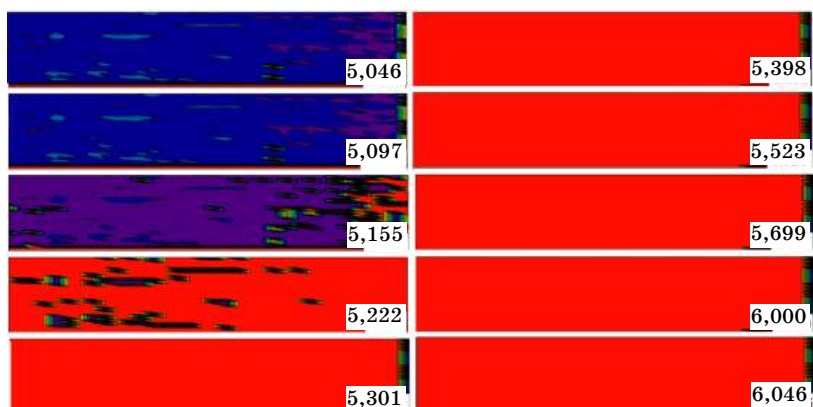
*Рис. 7. Линейно-временные  
потенциограммы для нагрузки 150 МПа*



*Рис. 8. Линейно-временные  
потенциограммы для нагрузки 200 МПа*



*Рис. 9. Линейно-временные  
потенциограммы для нагрузки 250 МПа*



*Рис. 10. Линейно-временные  
потенциограммы для нагрузки 300 МПа*



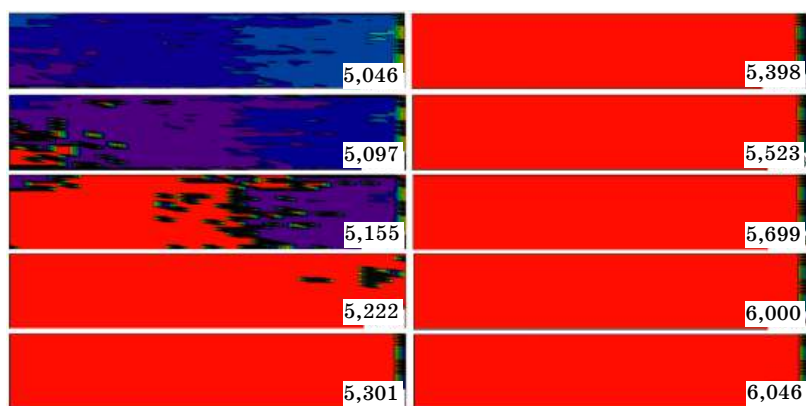


Рис. 11. Линейно-временные  
потенциограммы для нагрузки 350 МПа

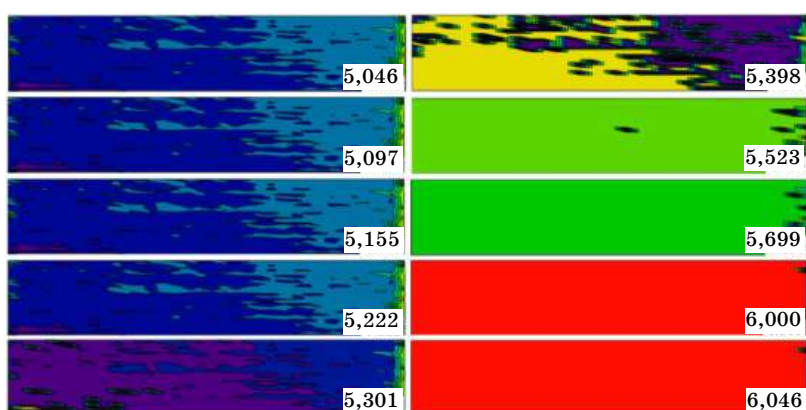


Рис. 12. Линейно-временные  
потенциограммы для нагрузки 400 МПа

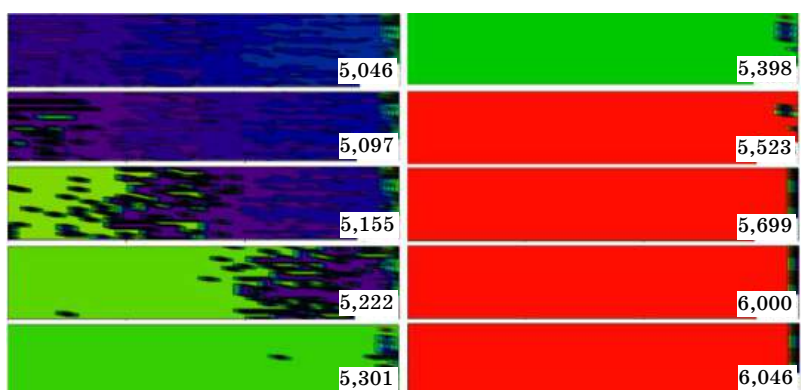


Рис. 13. Линейно-временные  
потенциограммы для нагрузки 450 МПа

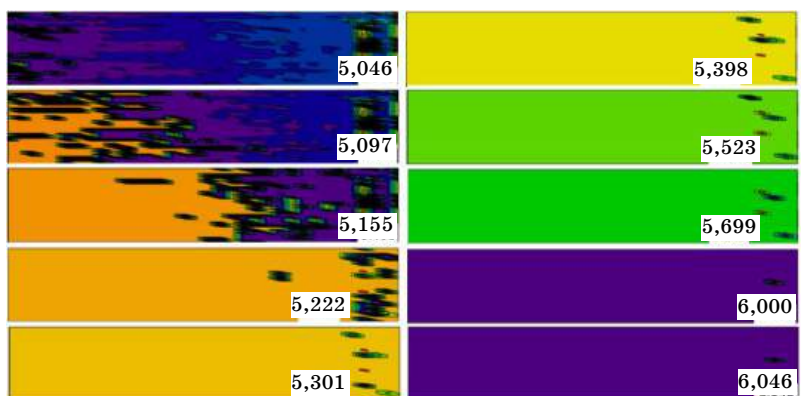


Рис. 14. Линейно-временные  
потенциограммы для нагрузки 500 МПа

При нагрузке 150 МПа в интервале 5,097—5,398 опять хорошо виден источник В1.

При приближении к пределу текучести при нагрузке 200 МПа на потенциограммах суще-

ственно изменяется распределение одиночных дефектов.

С увеличением нагрузки, особенно выше предела текучести при напряжениях 400—500 МПа

заметно возрастает число рефлексов по краям образца.

### Статистическая обработка полученных результатов

Построены гистограммы распределения амплитуды электрических сигналов для всех рассматриваемых режимов испытаний для уровня фиксации  $SLS = 5,155$ . Они позволяют узнать распределение ИВН по мощности источников. На представленных гистограммах (рис. 15 и 16) по оси  $x$  отложены значения амплитуд, по оси  $y$  — количество значений, попадающих в заданный интервал. Ширина интервала взята малой (порядка  $10^{-9}$  В), чтобы отобразить на гистограмме все имеющиеся значения амплитуд.

На рис. 15 показана гистограмма для нулевой нагрузки, на рис. 16 — для всех остальных нагрузок. Для нулевой нагрузки наблюдается симметричное распределение сигналов относительно начала координат.

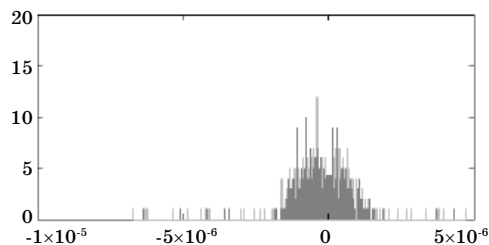


Рис. 15. Гистограмма распределения амплитуд электрических сигналов для нулевой нагрузки на уровне фиксации  $SLS = 5,155$

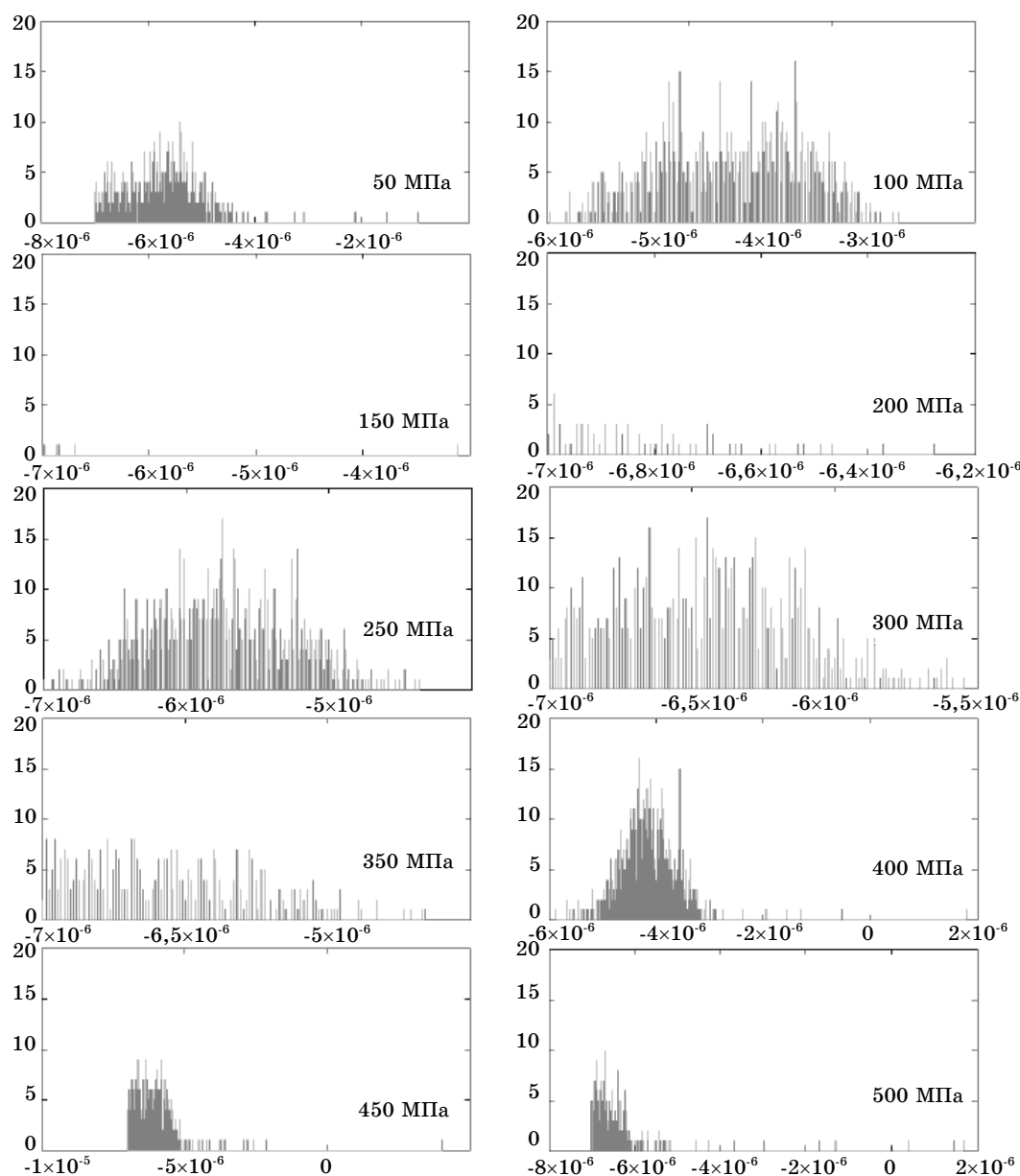


Рис. 16. Гистограммы распределения амплитуд электрических сигналов для всех нагрузок на уровне фиксации  $SLS = 5,155$

Построенные гистограммы коррелируют с поведением микродеформации материала образца, полученной по данным дифракции тепловых нейтронов (рис. 17). Приложение растягивающей нагрузки, соответствующей напряжению 50 МПа, сдвигает всю гистограмму влево относительно начала координат в отрицательную область.

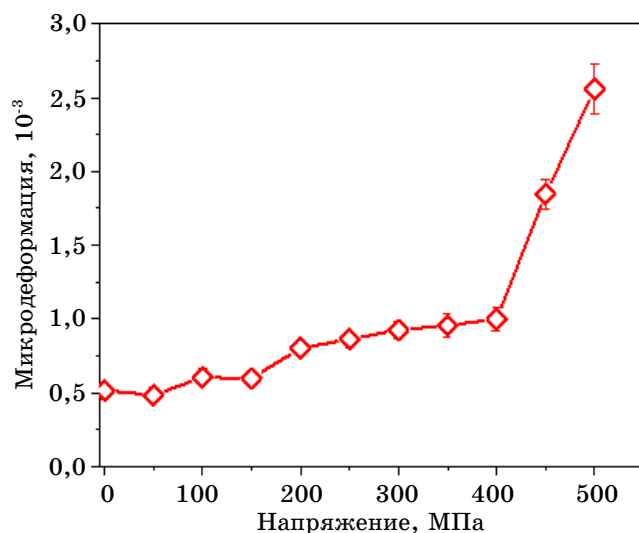


Рис. 17. Микродеформация в материале образца из сплава Д16Т в зависимости от приложенной нагрузки (по данным дифракции нейтронов)

При напряжении 150 МПа на гистограмме практически отсутствуют значения сигналов для выбранного уровня фиксации. Из рис. 17 видно, что микродеформация в это время не изменилась по сравнению с предыдущей нагрузкой. Можно сделать вывод о том, что при данном значении нагрузки активные источники внутренних напряжений не срабатывают, поскольку для их активации требуется более высокая нагрузка [13]. С увеличением нагрузки до напряжения 200 МПа эти источники начинают излучать более интенсивно, и в дальнейшем при смене механизма деформации данный процесс только усиливается.

В представленной работе предложен метод выделения сигналов малой амплитуды в условиях их экранирования сигналами большой амплитуды. Метод основан на численном разделении полного электрического сигнала на его составляющие и анализе составляющих с помощью специальной программы. Данный метод может быть также рекомендован для случаев экранирования от электромагнитных излучений как дополнительный метод выделения сигналов малой амплитуды на фоне высокоамплитудных помех.

Чтобы оценить количественно влияние экранирования на результаты СКП, определим коэффициент экранирования электрического

сигнала  $K_{SC}$  в единицах децибел на основе следующего выражения:

$$K_{SC} = 10 \lg \left( \frac{\varphi_1}{\varphi_2} \right)^2, \quad (4)$$

где  $\varphi_1$  — амплитуда электрического сигнала до экрана;

$\varphi_2$  — амплитуда электрического сигнала после экрана.

Результат экранирования здесь следует понимать как процедуру применения ПАД на различных уровнях фиксации. Для выбранного значения нагрузки коэффициент экранирования в интервале SLS от 5 до 6 практически линеен (рис. 18).

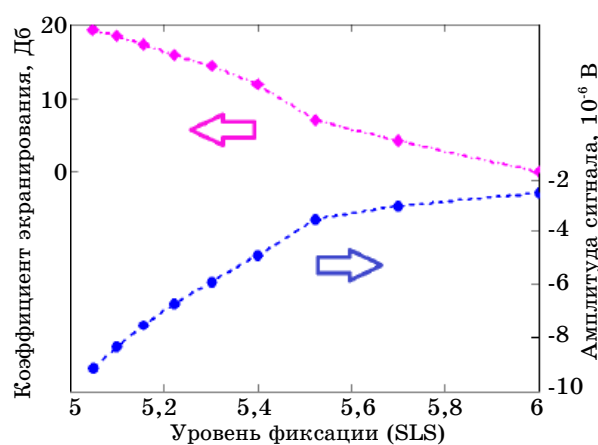


Рис. 18. Изменение наименьшего значения сигнала контроля (нижняя кривая) и коэффициента экранирования (верхняя кривая) в зависимости от уровня фиксации при напряжении 50 МПа

На рис. 18 показаны кривые изменения наименьшего значения сигнала контроля и коэффициента экранирования в зависимости от уровня фиксации при напряжении 50 МПа. При сопоставлении этих результатов с приведенными ранее потенциограммами становится понятной суть экранирования сигналов малой амплитуды (по модулю) сигналами большой амплитуды, а также связь экранирования сигналов с распределением ИВН по глубине залегания от уровня поверхностного слоя. На низких значениях уровня фиксации не видны малые по модулю составляющие амплитуды сигнала, которые несут важную информацию о состоянии образца и отображаются на потенциограммах только при высоких значениях SLS.

По результатам, представленным на потенциограммах, а также по данным из литературных источников можно сделать некоторые выводы о протекающем процессе деформационного упрочнения при малых остаточных деформациях. Начальная стадия диаграммы деформации сплава Д16Т обусловлена легким упрочнением.

На этой стадии безразмерный модуль упрочнения  $\theta = d\sigma/d\varepsilon E$  (где  $\sigma$  — приложенное напряжение;  $\varepsilon$  — относительная деформация) имеет низкие значения ( $10^{-5}$ — $10^{-4}$ ; рис. 19).

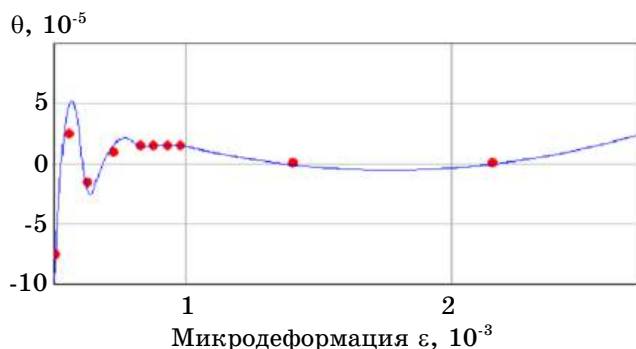


Рис. 19. Изменение безразмерного модуля упрочнения  $\theta$  в зависимости от степени микродеформации для сплава Д16Т

Результаты металлографии и электронной микроскопии сплавов алюминия, полученные при растяжении, показывают [14—16], что при низкой степени пластической деформации во многих зернах отчетливо видны тонкие линии, а также образующиеся полосы скольжения дислокаций. Некоторые зерна в процессе растяжения аккомодируют накапливающуюся микродеформацию, взаимодействуя с соседними зернами. При этом образуется большое количество сильно деформированных областей, включающих от нескольких единиц до нескольких десятков зерен с ярко выраженной неоднородностью по размерам, что приводит к накоплению на границах ненулевого суммарного разворота зерен на малые углы. Данный процесс известен в металловедении как зернограницное проскальзывание. Наблюдается и высокая локальная разориентировка зерен. В рассматриваемом случае образование большого количества одиночных и близко расположенных на потенциограммах рефлексов характеризует неоднородность распределения деформированных с высокой степенью деформации областей вдоль оси растяжения образца. Наблюдение таких групп рефлексов в центральной части образца при различных нагрузках свидетельствует об активном участии поверхностных дефектов, образованных еще при механической обработке поверхности, в процессе деформационного упрочнения. Процесс возврата, протекающий одновременно с деформационным упрочнением, контролируется механизмом пересечения винтовых дислокаций и их аннигиляцией, в то время как краевые дислокации, по мнению авторов работы [15], вносят свой вклад в упрочнение материала. Появление многочисленных ИВН выше 200 МПа связано с разгрузкой локальных объемов за счет протекания сдвиговых процессов, приводящих к усилению эффекта деформационного упрочнения.

Интересно проследить поведение функции наибольших и наименьших значений амплитуды сигналов на выбранном уровне фиксации в зависимости от прикладываемой нагрузки (рис. 20). В начале эксперимента в момент приложения нагрузки происходит инверсия амплитуды сигнала, что заметно по поведению кривой наибольших значений (кривая 1). Эти значения сигнала остаются отрицательными вплоть до момента активного образования пластической деформации при нагрузках 400, 450 и 500 МПа, когда они снова принимают положительные значения.

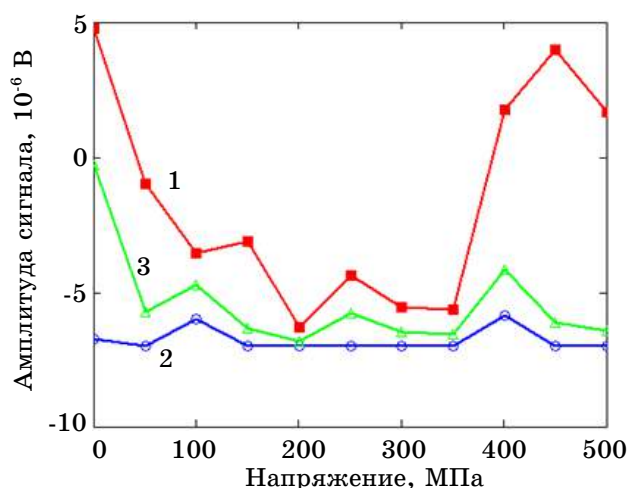


Рис. 20. Изменение наибольшего значения (кривая 1), наименьшего значения (2) и среднего значения (3) сигнала на уровне фиксации  $SLS = 5,155$  в зависимости от приложенной нагрузки

Таким образом, поведение кривой 1 на рис. 20 можно объяснить сменой механизма деформации, или переходом от микропластической деформации к макропластической. Представленные результаты коррелируют с данными по дифракции нейтронов (см. рис. 17).

На рис. 21 показано распределение наибольших и наименьших отрицательных значений амплитуды сигнала на измерительной базе образца для всех нагрузок, что отражает распределение по мощности ИВН. Видно, что источники расположены в основном в центре образца и вблизи захватов нагрузочной машины.

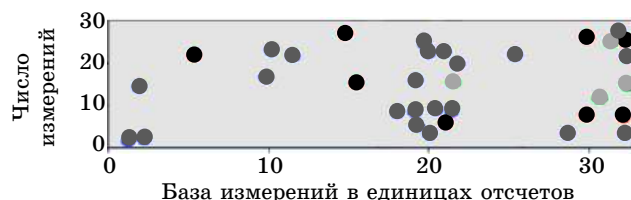


Рис. 21. Распределение наибольших отрицательных (темные кружки) и наименьших отрицательных (темно-серые) значений амплитуды сигнала на измерительной базе образца для всех нагрузок. Светло-серые кружки — наибольшие положительные значения сигнала

## Заключение

Исследовано влияние дефектов механической обработки поверхности образца из сплава Д16Т на его деформационное упрочнение при растяжении в интервале прикладываемых напряжений от 50 до 500 МПа. При этом использованы методы сканирующей контактной потенциометрии и метод дифракции тепловых нейтронов.

Показано, что в области упругой деформации при напряжении 50 МПа дефекты механической обработки, как и в случае нулевой нагрузки, сконцентрированы главным образом в середине и по краям образца. Следы точения и шлифовки поверхности в виде соответствующих пятен и полос на потенциограммах при нагрузках более 50 МПа на высоких уровнях фиксации трансформируются в отдельные рефлексy размерами 1—2 мм, которые представляют собой локальные области деформационно-упрочненного материала, излучающего волны механических напряжений.

Образование таких групп рефлексов в центральной части образца свидетельствует об активной роли дефектов поверхностной обработки в процессе образования микропластической деформации на стадии начального упрочнения.

Появление многочисленных источников излучения при напряжении выше 200 МПа, особенно в области предела текучести (250—300 МПа) связано с разгрузкой локальных объемов за счет протекания сдвиговых процессов, приводящих к усилению эффекта деформационного упрочнения.

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований и выделенным грантом по договору № 19-08-00266/19 от 10.01.2019.*

## Литература

1. Сурин В. И., Польский В. И., Осинцев А. В., Джумаев П. С. Применение метода сканирующей контактной потенциометрии для регистрации образования зародышевой трещины в сталях // Дефектоскопия. 2019. № 1. С. 53—60.
2. Сурин В. И., Абу Газал А. А., Волошин Е. В., Тельнов Е. Ю., Титовец Д. О. Разработка средств и методов обработки сигналов электрофизической диагностики для физико-механических испытаний материалов // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 4. С. 55—59.
3. Bokuchava G. Neutron RTOF Stress Diffractometer FSD at the IBR-2 Pulsed Reactor // Crystals. 2018. V. 8. P. 318. <http://doi.org/10.3390/cryst8080318>
4. Balagurov A. M., Bokuchava G. D., Kuzmin E. S., Tamonov A. V., Zhuk V. V. Neutron RTOF diffractometer FSD for residual stress investigation // Zeitschrift für Kristallographie. 2006. Supplement Issue № 23. P. 217—222. <http://doi.org/10.1524/9783486992526-038>
5. Климов В. Н., Козлов Д. М. Современные авиационные конструкционные сплавы. — Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2017. — 40 с.
6. Физическое материаловедение: учеб. для вузов. В 6 т. / под общей ред. Калина Б. А. — М.: МИФИ, 2008. Т. 6.
7. Абу Газал А. А., Сурин В. И., Шеф Е. А., Бокучава Г. Д., Папушкин И. В. Автоматизация электрофизической диагностики при физико-механических испытаниях материалов // Автоматизация в промышленности. 2019. № 2. С. 48—51.
8. Bokuchava G. Correlation RTOF diffractometry at long-pulse neutron source: I. Data acquisition in list-mode // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2020. V. 964. P. 163770. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.163770>
9. Bokuchava G. Correlation RTOF diffractometry at long-pulse neutron source: II. Analysis of frequency windows and diffraction peak profiles // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2020. V. 983. P. 164612. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164612>
10. Rietveld H. M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures // J. Applied Crystallography. 1969. V. 2. P. 65—71.
11. Bokuchava G. D. Materials microstructure characterization using high resolution time-of-flight neutron diffraction // Romanian J. Physics. 2016. V. 61. № 5, 6. P. 903—925. [http://www.nipne.ro/rjp/2016\\_61\\_5-6/0903\\_0925.pdf](http://www.nipne.ro/rjp/2016_61_5-6/0903_0925.pdf)
12. Ахмед Н., Рао К. Р. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов. — М.: Связь, 1980.
13. Штремель М. А. Прочность сплавов. Ч. II. — М.: МИСИС, 1997.
14. Zebing Xu, Roven H. J. Zhihong Jia Mechanical properties and surface characteristics of an AA6060 alloy strained in tension at cryogenic and room temperature // Materials Science and Engineering A. 2015. V. 648. P. 350—358.
15. Gruber B., Weibensteiner I., Kremmer T. et al. Mechanism of low temperature deformation in aluminum alloys // Materials Science and Engineering A. 2020. V. 795. P. 1—11.
16. Zu Li, Ning Li, Duzhen Wang, Di Quyang, Lin Liu Low temperature deformation behavior of an electromagnetically bulged 5052 aluminum alloy // Scientific Reports. 2016. V. 6. Article number: 29973 DOI: 10.1038/srep29973.

## STUDY OF DEFORMATION HARDENING PLACES IN ALUMINUM ALLOY ON DEFECTS OF MECHANICAL SURFACE TREATMENT

V. I. Surin

National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

G. D. Bokuchava, I. V. Papushkin

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow region, Russia

*The influence of defects of mechanical processing of the surface of a sample made of alloy D16T on its strain hardening in tension in the range of applied stresses from 50 to 500 MPa was investigated. For this purpose, the methods of scanning contact potentiometry and the method of thermal neutron diffraction were used. It is shown that in the region of elastic deformation at a stress of 50 MPa, the defects of inter-machining, as in the case of zero load, are concentrated, strongly at the same time, in the middle and along the edges of the sample. Traces of turning and grinding of the surface in the form of corresponding spots and stripes on potentiograms, at loads of more than 50 MPa at high levels of fixation, are transformed into separate reflexes 1–2 mm in size, which are local areas of the strain-hardened material, emitting mechanical stress waves.*

**Keywords:** strain hardening of the surface, scanning contact potentiometry method, thermal neutron diffraction method.

---

**Сурин Виталий Иванович**, доцент.

E-mail: VISurin@mephi.ru

**Бокучава Гизо Дазмирович**, заведующий сектором дифракции отделения конденсированных сред, лаборатория "Нейтронная физика им. Франка".

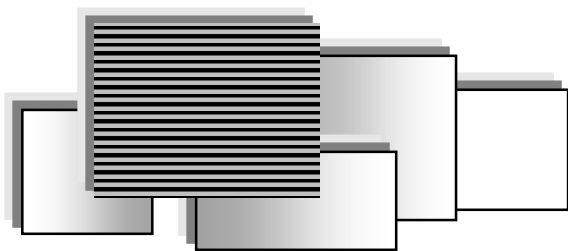
E-mail: gizo@nf.jinr.ru

**Папушкин Игорь Викторович**, ведущий инженер.

E-mail: piv@nf.jinr.ru

*Статья поступила в редакцию 22 сентября 2021 г.*





## ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 658.5

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_1\_45

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЙ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Р. В. Шубин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

*Рассмотрены вопросы синтеза моделей сложных организационно-технических систем в целях их реинжиниринга и автоматизации. Предложенная методика синтеза моделей систем деятельности и систем автоматизированных технологий, основанная на актуальных концепциях повышения конкурентоспособности, системном и процессном подходах, а также методах познания и описания IDEF0 и IDEF1X, может служить базой для построения эффективных интегрированных автоматизированных систем и технологий организаций.*

**Ключевые слова:** сложная система, система технологий организации, IDEF, IDEF1X, DFD.

#### Актуальность проблемы исследования

Современные условия рынка высокотехнологичных наукоемких изделий предъявляют повышенные требования к эффективности и конкурентоспособности организации и ее продукции. Перед организациями и отраслями ставятся государственные задачи соответствия продукции мировому уровню научно-технического развития. Научно-производственные организации (НПО), обеспечивающие жизненный цикл (ЖЦ) такой продукции, генерируют, управляют и хранят значительные объемы быстро меняющихся данных и информации, эффективное управление которыми не представляется возможным без комплексного применения современных интегрированных информационных систем и технологий (ИТ).

Большое внимание уделяется комплексной цифровизации и автоматизации деятельности организаций, созданию интегрированных автоматизированных систем управления технологическими процессами и производствами, работе с цифровыми двойниками и прототипами. Образуются виртуальные предприятия, обеспечивающие ЖЦ сложных наукоемких изделий (энергетики, судостроения, авиастроения, космоса). Совершенствуется нормативная база, регламентирующая управление электронными конструкторскими документами, процессы системной и

программной инженерии, стадии и технологии управления ЖЦ изделий [1—3].

Основными направлениями цифровизации наукоемких отраслей промышленности являются:

- сохранение, систематизация и доступность базы знаний, компетенций, технических решений, технологий и ноу-хау;
- снижение доли затратных натурных испытаний и исследований;
- повышение качества создаваемой продукции;
- повышение прозрачности и эффективности управления процессами.

Накоплен значительный опыт автоматизации процессов и процедур проектирования, производства и логистической поддержки продукции средствами CAD\CAM\CAE\PDM\PLM\ERP\MES-систем. Однако процессы управления организацией слабо охвачены средствами и технологиями автоматизации. Следовательно, такие процессы не могут в полной мере организовывать эффективную и конкурентоспособную деятельность. Зачастую в организациях автоматизированные системы и технологии используются недостаточно эффективно: слабо связаны между собой, отсутствует связь между целями автоматизации и целями деятельности, недостаточно оценена экономическая эффективность использования технологий.

Конкурентоспособную деятельность необходимо поддерживать эффективной системой технологий — совокупностью взаимосвязанных автоматизированных средств, технологий (в том числе ИТ), инструментов и оборудования, обеспечивающих комплексную автоматизацию всех групп процессов деятельности организации.

Очевидно, что невозможно создавать конкурентоспособную продукцию без реинжиниринга сложных систем деятельности и систем технологий организаций. В качестве примера таких систем можно привести продукцию и конструкторско-производственные кластеры судостроения: многофункциональные суда, подводные аппараты, ледоколы, верфи, конструкторские бюро, испытательные центры.

Таким образом, перед организациями, стремящимися быть конкурентоспособными, возникают проблемы.

- Определение структуры системы деятельности на заданном горизонте планирования в целях достижения и поддержания заданного уровня конкурентоспособности.
- Определение структуры системы технологий, обеспечивающей такую систему деятельности.
- Генерация требований к средствам и технологиям автоматизации.

Существует и развивается ряд актуальных концепций и лучших практик автоматизации деятельности (CALS, ITIL, COBIT), регламентирующих развитие ИТ в организациях. Однако для улучшения деятельности и достижения глобальной конкурентоспособности требуется применение системного подхода, включающего моделирование системы процессов (в том числе процессов управления организацией), трассировку требований к системе технологий и классам и экземплярам классов технологий, в том числе ИТ. Такой подход может быть сформулирован в виде положений соответствующей методики, применимой к большинству организаций, в том числе НПО [4, 5].

#### **Потребность в моделировании системы деятельности и системы технологий**

Деятельность организации можно представить как многоконтурную автоматизированную организационно-техническую систему управления с обратными связями и регуляторами, аналогичную по структуре техническим системам, которые теория управления относит к классу многомерных многосвязных систем. Централизованное управление в таких системах эффективно, но трудно реализуемо [6, 7].

В целях решения проблем, реинжиниринга, повышения эффективности и автоматизации деятельности организация должна создавать понятные модели своего актуального состояния ("как есть") и целевого состояния на заданном

горизонте планирования ("как будет"). Аналогично необходимо моделирование системы (автоматизированных) технологий для каждого из состояний деятельности.

Актуальные стандарты моделирования организаций определяют общие требования к моделям и их ЖЦ, но не определяют методы и языки моделирования. Наиболее подходящими для многоаспектного моделирования сложных систем на ранних стадиях их ЖЦ и реинжиниринга могут являться методы IDEF методологии SADT [8].

IDEF-модели организации должны отвечать на вопросы о том, что надо делать и чем (какой информацией, данными) связаны необходимые компоненты деятельности (функции, процессы, работы). Организация как сложная многоконтурная и многосвязная открытая система может быть описана совокупностью моделей, построенных в нескольких аспектах. Функциональные модели систем в стандарте IDEF0 определяют все требуемые функции и процессы, их внутренние и внешние связи. Функции преобразуют связи "входы" в связи "выходы". Синтез внутренней структуры функций (декомпозиция блоков функций и данных) производится с использованием требований к ним (связи "управления") и с использованием выделенных функциям долгосрочных ресурсов (связи "механизмы"). При этом все функции и связи модели должны быть определены (рис. 1).

Информационное представление системы может содержать множество сущностей и их атрибутов, большее, чем подмножество объектов IDEF0-модели (например, объекты моделей, построенных с разных точек зрения), отражать связи между сущностями. Поэтому информационная модель может быть представлена семантической моделью (концептуальной схемой) данных в нотации IDEF1X (рис. 2). Информация генерируется посредством интерпретации данных семантической модели для ее использования в различных целях. С использованием семантической модели данных могут разрабатываться и согласовываться базы данных организации, целеориентированные программные приложения, которые потребляют и генерируют требуемые значения атрибутов соответствующего подмножества сущностей (объектов) модели данных организации [9].

Процессы деятельности организации подчинены декомпозированным целям. Следовательно, структура процессов может быть построена с заданной степенью детализации как целеориентированная структура подчиненного управления. Управлением является цель (требования), а результатом управления — степень достижения цели (значения показателей). Для достижения цели системы необходимо синтезировать структуру подчиненных процессов, использовать механизмы, ресурсы и генерировать результаты.

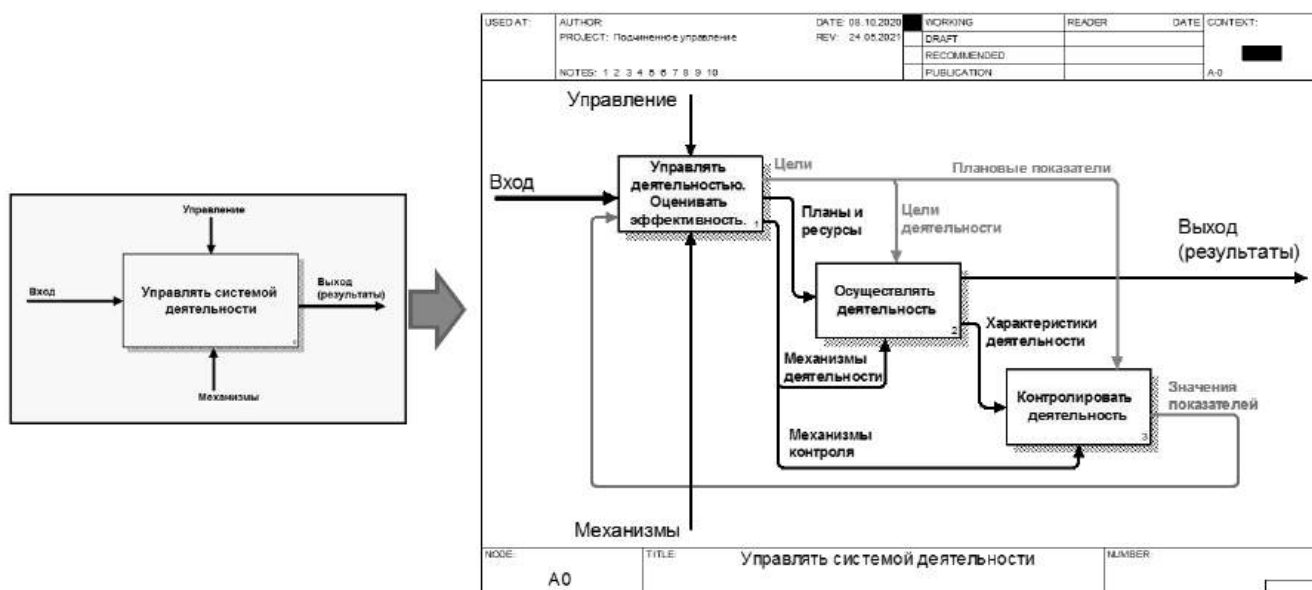


Рис. 1. Концептуальная IDEF0-модель системы деятельности организации с применением принципа подчиненного управления

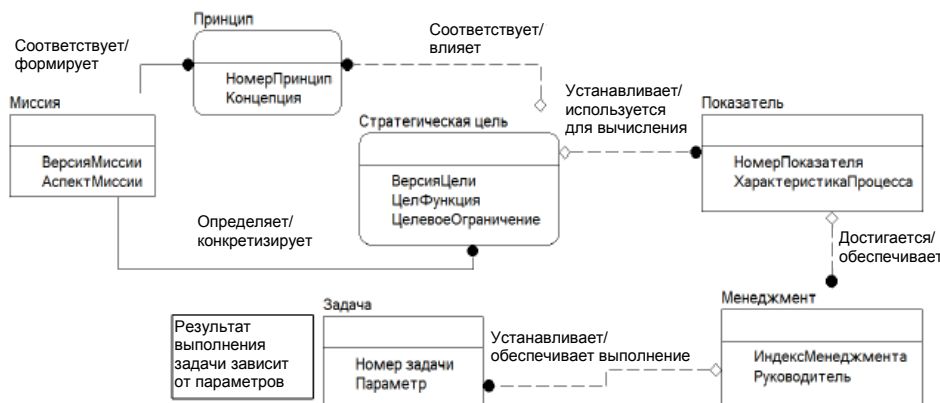


Рис. 2. Концептуальная IDEF1X-модель понятий системы деятельности

Таким образом, SADT-модели деятельности ориентированы на познание и определяют:

- требования к деятельности как системе (включая цели и критерии оценки);
- структуру деятельности и доминирование в ней требований, функций, контуров управления;
- функции, которые использует (должна использовать) система, и то, что они делают;
- связи между функциями и внешней средой, характеристики связей;
- используемые данные и атрибуты данных.

Адекватность моделей обеспечивается их коллективным обсуждением и рецензированием.

IDEF-модели деятельности не зависят от организационной структуры. Основные функции для различных организаций остаются неизменными. Могут быть добавлены новые автоматизированные функции и процессы, например интеграции процессов и обеспечивающих их информационных систем разных предприятий, входящих в консолидированную структуру организации.

При этом необходимо отметить, что моделирование трудоемко и сопряжено с рядом проблем:

- трудоемкость получения и неполнота данных, различная трактовка терминов и определений;
- отсутствие системы метрик (количественной оценки) процессов деятельности;
- трудность достижения консенсуса между участниками моделирования;
- отсутствие необходимых данных для синтеза целевой модели;

В связи с изложенным можно сформулировать принципы ранних стадий реинжиниринга организации:

- цель организации — конкурентоспособность процессов и деятельности;
- разработка моделей — одна из важнейших задач высшего руководства организации;
- моделирование выполняется для текущего и целевого состояний деятельности;
- для моделирования необходимо применять системный и процессный подходы;

- организация — многоконтурная система подчиненных процессов;
- IDEF-методы применимы для описания деятельности организации, ее реинжиниринга и автоматизации;
- детальность моделирования: должны быть определены решаемые задачи и согласованные с ними управляющие воздействия (требования), используемые механизмы, сущности и атрибуты связей;
- модель должна быть разработана с точки зрения высшего руководства организации;
- данные для моделей подсистем (в том числе системы технологий) определяют из модели деятельности организации.

Таким образом, моделируя деятельность по управлению организацией в различных аспектах и отвечая на поставленные перед моделями вопросы, можно уже на начальном этапе синтеза оптимальной (улучшенной) структуры деятельности выявлять функции, автоматизация и реинжиниринг которых наиболее актуальны и возможны на данном уровне развития организации для достижения и поддержки необходимого уровня конкурентоспособности, а также определять средства и механизмы, обеспечивающие автоматизированные функции и процессы.

#### Генерация требований к автоматизированным системам и технологиям

Модель целевого состояния ("как будет") системы деятельности (рис. 3) содержит процесс управления средствами и технологиями, в том числе автоматизированными (рис. 4).

Указанный процесс генерирует группы общих требований деятельности к системе технологий:

- функциональности средств и технологий;
- качества результатов работы технологий;
- стоимости технологий;
- характеристики используемых данных.

Главными задачами системы технологий являются:

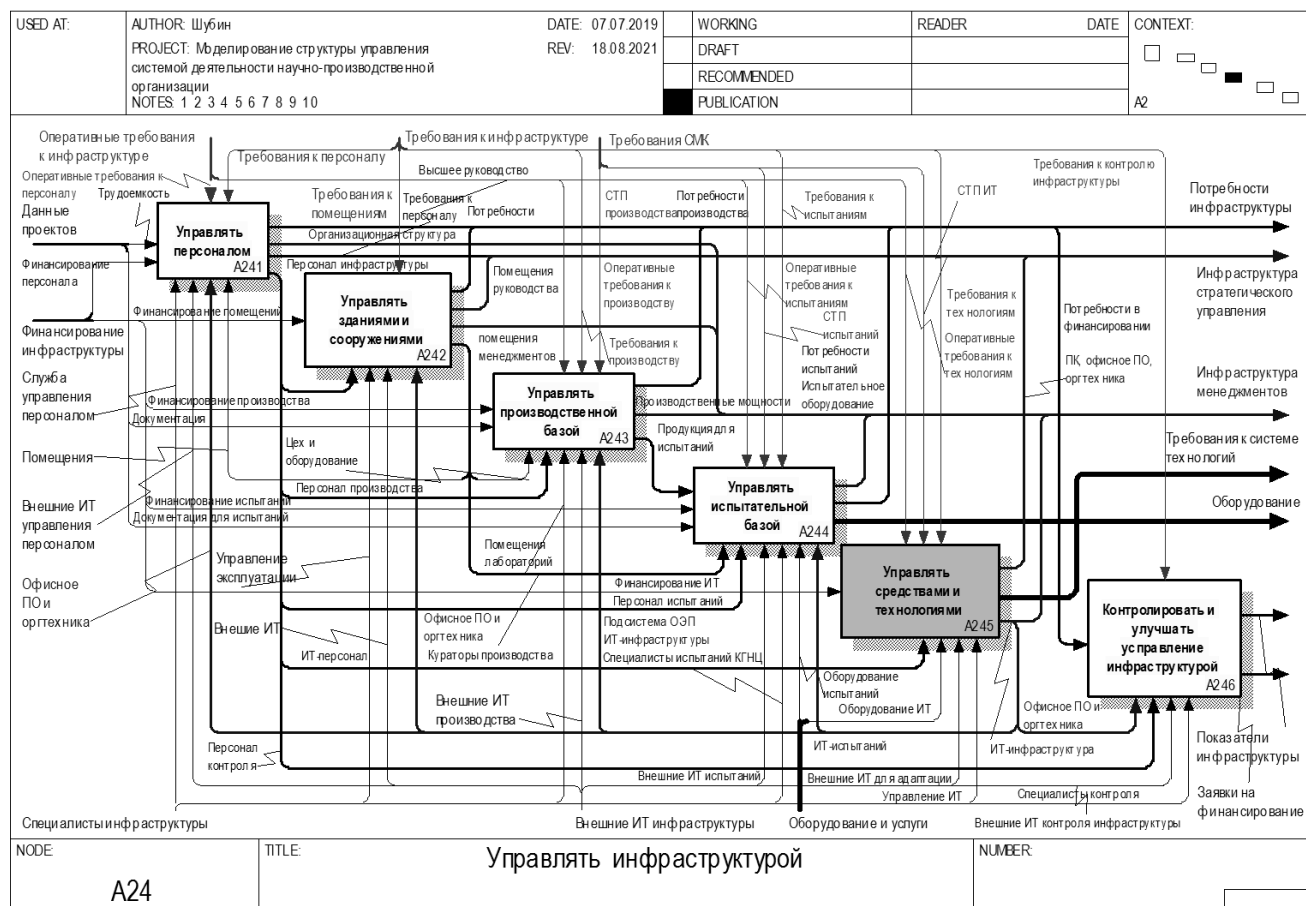
- обеспечение высшего руководства актуальными непротиворечивыми данными о функционировании процессов и текущем состоянии портфеля проектов;
- создание механизмов анализа процессных данных, прогнозирования и разработки планов;
- генерация требований и оценка эффективности используемых автоматизированных систем и технологий;
- определение будущих потребностей в автоматизированных технологиях;
- обеспечение связи развития системы технологий с целориентированным развитием организации.

Цель разработки модели системы технологий — на основании анализа системы деятельности построить понятную структуру взаимосвязанных классов средств и технологий, обеспечивающих целевую (конкурентоспособную) систему деятельности примера НПОр.

Модель должна быть пригодна для выявления и уточнения требований к классам технологий — компонентам системы технологий НПОр, обеспечивающей процессы успешной деятельности при переходе на более высокие уровни зрелости, автоматизации и реинжиниринге процессов. Должны быть определены связи между средствами и технологиями в виде форм представления и характеристик данных.



Рис. 3. Контекстная диаграмма функциональной модели целевого состояния системы деятельности НПОр



**Рис. 4. Диаграмма процесса управления инфраструктурой функциональной модели целевого состояния системы деятельности НПОр**

Модель должна отражать общее и особенное в структуре и функционировании системы технологий НПОр, указывать на общие проблемы автоматизации деятельности организаций такого класса.

Модель должна ответить на вопросы о том, какие:

- классы технологий должны использоваться и внедряться при переходе на целевые уровни зрелости, реинжиниринге и автоматизации процессов;
- какими должны быть их взаимосвязь и иерархия?
- особенности системы технологий после реинжиниринга могут быть выявлены по результатам моделирования;
- требования предъявляются к классам технологий на целевом уровне зрелости организации.

Требуемая степень детальности модели: выявление всех классов технологий и их взаимосвязей, обеспечивающих деятельность НПОр.

Практическое использование модели: определение требуемых для перехода на целевой уровень зрелости классов технологий, генера-

ция требований и определение связей между ними.

Точка зрения: ИТ-руководитель организации.

Границы модели: процессы и работы системы деятельности, для получения результатов которых используются технологии, и их связи с внешней средой, в том числе с процессами структуры высшего уровня.

Контекстная диаграмма А-0 (рис. 5) определяет связи системы технологий с внешней средой в виде форматов файлов данных. Входными связями системы технологий с внешней средой являются информация и данные, поступающие в НПОр, хранимые и обрабатываемые в электронном виде (конструкторская документация, 3D-модели (каркасные, поверхностные, твердотельные, с деревом построений и без него), эскизы, письма, отчеты, планы, заказы, материалы и сортаменты, комплектующие, счета, договоры, акты, рекламации, запросы, технические задания, литература).

Декомпозиция контекстной диаграммы модели системы технологий приведена на рис. 6. Показаны функции автоматизации групп процессов (менеджментов) НПОр и связи между ними.



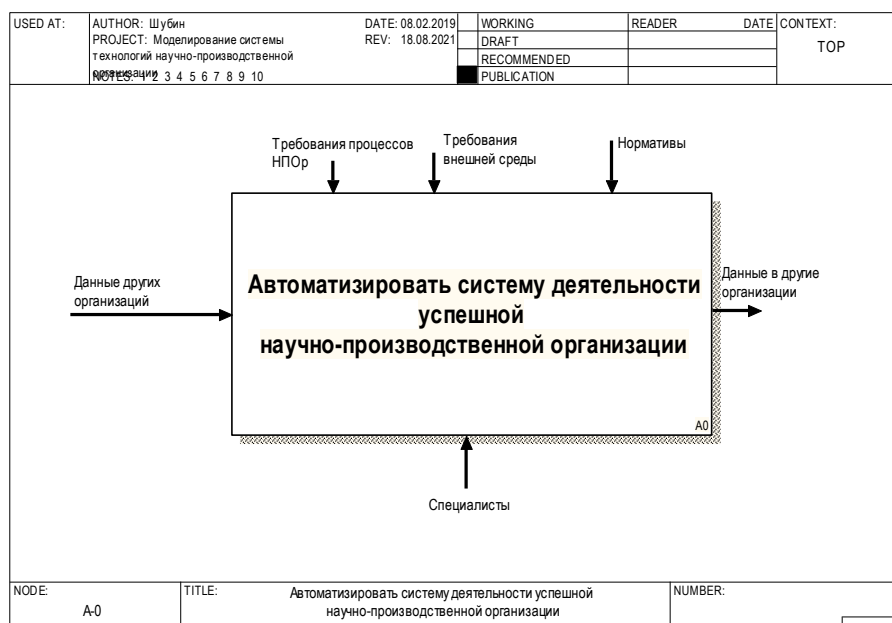


Рис. 5. Контекстная диаграмма функциональной модели системы технологий целевого состояния НПО

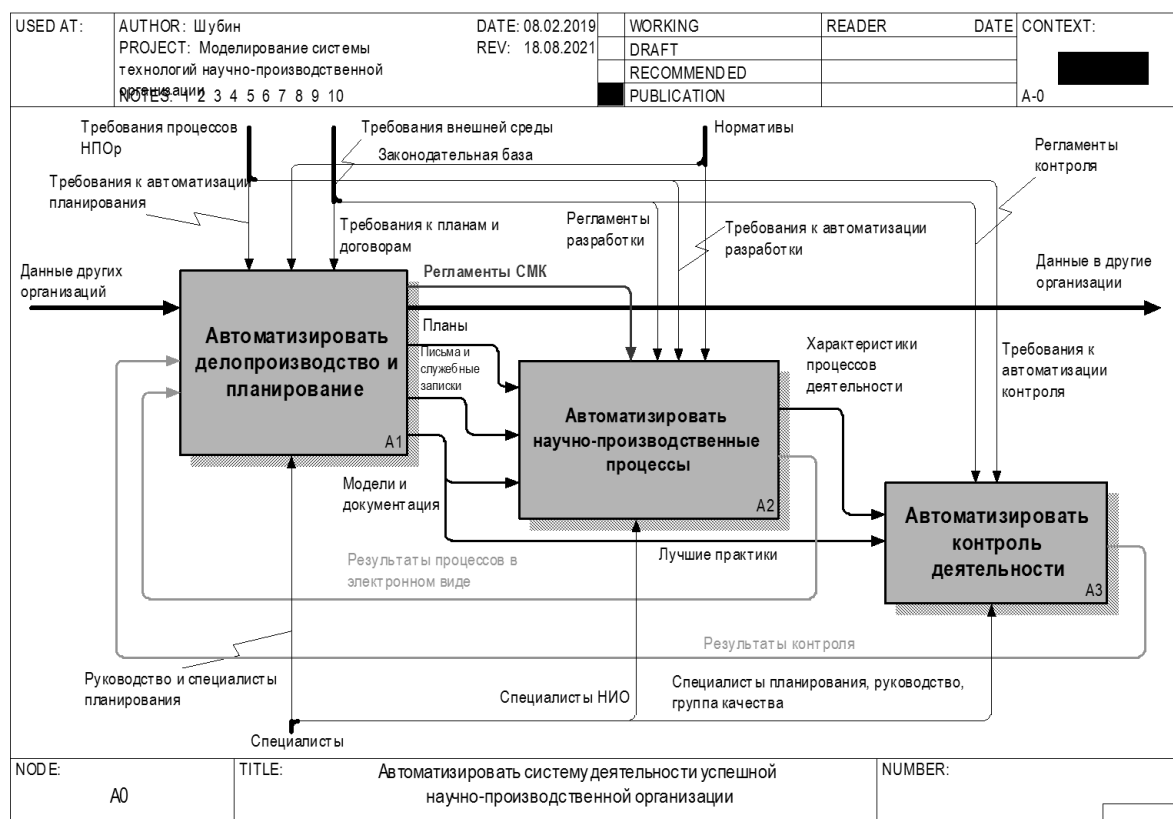


Рис. 6. Декомпозиция контекстной диаграммы функциональной модели системы технологий целевого состояния НПО

При дальнейшей декомпозиции уровни модели систем технологий образуют подчинённую структуру систем, связанных данными. Для организации взаимодействия систем целесообразно использовать в связях формы представления и характеристики данных (таблицы, текст, растровая и векторная графика, твердотельные модели). Набор характеристик и форм представле-

ний данных определяет структуры данных, функциональные процедуры и операции, возможности автоматизированных систем и технологий. На уровне систем также определяют используемые классы технологий.

В связи с этим наиболее удобной и наглядной является разработка уровней декомпозиции модели на языке методологии графического струк-

турного анализа и проектирования информационных систем DFD (Data Flow Diagrams — диаграммы потоков данных). DFD-диаграммы легко встраиваются в IDEF0-модели, оперируют информационными системами (в рассматриваемом случае классами технологий) и данными [10]. При декомпозиции модели системы представ-

ляются в виде взаимосвязанной совокупности подсистем (рис. 7).

В дополнение к связям управления (требованиям) верхнего уровня декомпозиции модели формулируют новые требования к классам технологий и средствам автоматизации (рис. 8).

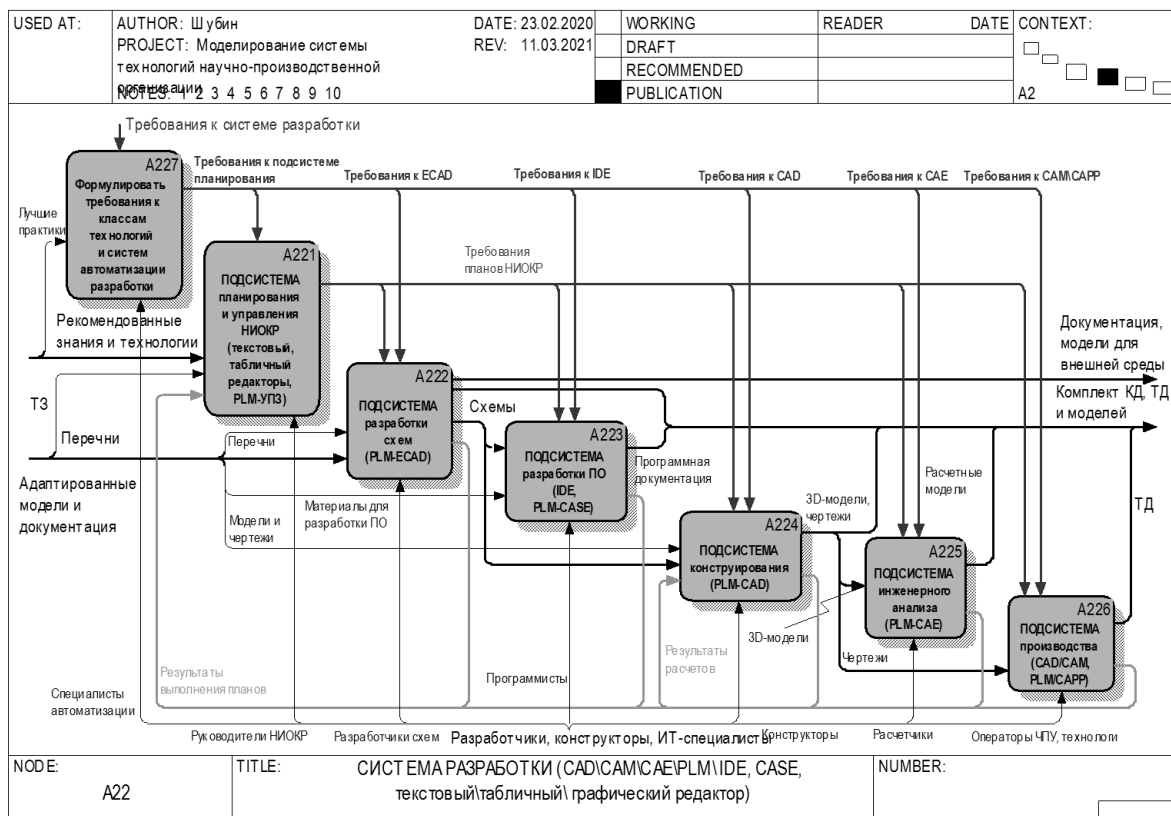


Рис. 7. DFD-диаграмма системы автоматизации процессов разработки функциональной модели системы технологий целевого состояния НПО



Декомпозиция модели

Требования к классу технологий:

- функциональные;
- качества;
- стоимости приобретения и владения

Декомпозиция модели

- требования к экземпляру класса технологий (конкретной технологии, системе, средству);
- сравнительная оценка с заданием весовых коэффициентов

Рис. 8. Генерация требований к автоматизированным технологиям при разработке модели системы технологий НПО

Например, для подсистемы конструирования (А224 на рис. 7) требования могут быть следующими:

- функциональные (к оперативности, ускорению):
  - возможность разработки твердотельных 3D-моделей и работа с большими сборками;
  - автоматизированное формирование перечней, ведомостей и спецификаций в соответствии с требованиями ЕСКД и организации, наличие конструктора, отчетов, открытого API и экспорта в форматы обмена MS Office;
  - наличие инструментов визуализации и получения тоновых изображений 3D-моделей;
  - возможность согласования КД и интеграция с системами ЭЦП;
  - интеграция с ECAD, EDA, CAM-системами, экспорт/импорт форматов STEP, DWG, DWF, XML;
  - интеграция с отечественными PLM-системами, в том числе наличие многопользовательских библиотек;
  - вхождение в Реестр отечественного ПО Минкомсвязи;
  - возможность выполнения упрощенного автоматизированного прочностного, электромагнитного, гидрогазодинамического инженерного анализа, определения массинерционных характеристик;
  - поддержка систем Windows и Linux;
- качества:
  - обеспечение функционирования СМК и ее соответствие ГОСТ ИСО 9000 и ГОСТ РВ 0015-002;
  - соответствие отраслевым и государственным нормативам;
  - сокращение ошибок при оформлении документов;
  - сокращение числа претензий и рекламаций по качеству продукции;
- стоимости:
  - сокращение времени поиска конструкторских решений, выбора методик анализа и расчета;
  - минимальное время, необходимое для конвертации данных;
  - итоговое уменьшение трудоемкости конструкторского проектирования;
- иные требования:
  - обучение и консультационная поддержка пользователей;
  - использование задела организации в виде массива данных в других CAD-системах;
  - наличие опыта использования в организациях отрасли;
  - поддержка необходимого числа пользователей без снижения производительности.

Для обоснования выбора конкретного экземпляра класса технологии или средства автоматизации создают сводную таблицу требований и их значений для всех имеющихся на рынке систем и технологий данного класса. Значения требований нормируют, вычисляют интегральное значение для каждого экземпляра. По результатам сравнительного анализа интегральных значений можно сделать вывод о целесообразности внедрения в систему технологий конкретной автоматизированной технологии [11].

### Выводы. Формулировка методики

Полученные по результатам моделирования требования к классам технологий направлены на минимизацию стоимости владения, улучшение функциональности используемых и внедряемых систем и технологий, улучшение качества процессов и продукции.

В работе введено понятие "система технологий организации". Это система взаимосвязанных функций, процессов, технологий и данных, обеспечивающая автоматизацию и конкурентоспособность организации, трассировку целей на характеристики средств и технологий. Система технологий организации исследуемого класса (НПОр) — сложная система вследствие многообразия процессов, связей между ними и данных, что является отличительной особенностью НПОр как организаций, занимающихся научными исследованиями и сопровождающих ЖЦ наукоемких изделий.

Таким образом, ранние стадии проектирования и реинжиниринга системы технологий должны выполняться согласно этапам.

- Выявление проблем и потребностей в автоматизации организации.
- Моделирование (познание) сложной системы деятельности организации с точки зрения высшего руководства для текущего состояния, а также на заданном горизонте планирования (целевое состояние). Упрощение системы деятельности достигается за счет ее представления в виде многоуровневой автоматизированной системы многоконтурного подчиненного управления с обратными связями. Наиболее подходящим является IDEF-моделирование, охватывающее все аспекты описания системы, определенные актуальными стандартами.
- Генерация из моделей деятельности общих требований к системе технологий, обеспечивающей достижение и поддержание заданного уровня конкурентоспособности организации.
- Разработка IDEF-моделей системы технологий, связанных с моделями деятельности. Трассировка требований к классам технологий.
- Сравнительный анализ и выбор конкретных автоматизированных технологий.
- Проектирование и реинжиниринг системы технологий с использованием лучших практик и методик (CALS, ITIL, ITISM).

Разработанная на основе системного и процессного подходов методика синтеза моделей системы технологий организации применима для организаций разного уровня развития, интегрирует концепции, использует стандарты, методы описания и познания. Созданные на базе сформулированных положений структуры и системы могут быть основой для автоматизации и улучшения деятельности, достижения и поддержания конкурентоспособности организаций.

#### Литература

1. Киселев В. Д., Рязанцев О. Н., Данилкин Ф. А., Губинский А. М. Информационные технологии в оборонно-промышленных комплексах России и стран НАТО. — М.: Знание, 2017. — 256 с.
2. Сб. докладов VIII форума "Информационные технологии на службе ОПК" [Электронный ресурс]. URL: [http://www.connect-wit.ru/wpcontent/uploads/2019/12/001\\_212\\_SD\\_ITOPK\\_2019\\_Sm-1.pdf](http://www.connect-wit.ru/wpcontent/uploads/2019/12/001_212_SD_ITOPK_2019_Sm-1.pdf)
3. Боровков А. И., Марусева В. М., Рябов Ю. А. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения: доклад "Цифровое производство: методы, экосистемы, технологии", 2018. С. 24—43.
4. Шаламов А. С. Интегрированная логистическая поддержка наукоемкой продукции. — М.: Университетская книга, 2008. — 464 с.

5. Шубин Р. В. Комплексная автоматизация разработки электротехнической продукции в филиале "ЦНИИ СЭТ" ФГУП "КРЫЛОВСКИЙ ГНЦ": [Электронный ресурс]. Труды первой отраслевой науч.-практ. конф. "Производственные технологии в судостроении — вопросы информатизации" (ПТС ВИ-2021). — СПб, 2021. С. 178—186.

6. Косяков А., Свит У. и др. Системная инженерия. Принципы и практика / Пер. с англ. / под ред. Батоврина В. К. — М.: ДМК Пресс, 2014. — 624 с.

7. Хан Д. Пик: Планирование и контроль: концепция контроллинга / Пер. с немецкого / под ред. Турчака А. А., Головача Л. Г., Лукашевича М. Л. — М.: Финансы и статистика, 1997. — 765 с.

8. Марка Д. А., МакГоуэн К. SADT-методология структурного анализа и проектирования. — М.: Метатехнология, 1993.

9. Прокофьев Г. И., Шубин Р. В. Методы IDEF в моделировании организаций // Изв. СПб ГЭТУ "ЛЭТИ". 2020. Вып. 6. С. 37—43.

10. Вендров А. М. Проектирование программного обеспечения экономических информационных систем: Учебник. Изд. 2., перераб. и доп. — М.: Финансы и статистика, 2005. — 544 с.

11. Шубин Р. В., Прокофьев Г. И. Модели структуры информационных технологий научно-производственной организации // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2021. № 1. С. 42—50.

## DESIGN OF THE TECHNOLOGY SYSTEM OF THE SCIENTIFIC AND PRODUCTION ORGANIZATION

R. V. Shubin

Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin),  
St. Petersburg, Russia

*The issues of synthesis of models of complex organizational and technical systems for the purpose of their reengineering and automation are considered. The proposed method of synthesis of models of activity systems and automated technology systems, based on current concepts of increasing competitiveness, system and process approaches, as well as methods of cognition and description of IDEF0 and IDEF1X, can serve as a basis for building effective integrated automated systems and technologies of organizations.*

**Keywords:** complex system, organization technology system, IDEF, IDEF1X, DFD.

Шубин Роман Валерьевич, аспирант кафедры "Робототехника и автоматизация производственных систем".  
E-mail: rvshubin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2021 г.

УДК 621.791.461:678.029.43  
DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_1\_54

## АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ СВАРКИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ПОМОЩЬЮ СЕДЛОВОГО ОТВОДА ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ВОЗДУХА НИЖЕ НОРМАТИВНЫХ

М. А. Васильева, канд. физ.-мат. наук; Н. П. Старостин, д-р техн. наук  
Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН – обособленное подразделение  
ФГБНУ ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения РАН», г. Якутск, Россия

*Проведен анализ динамики температурного поля при сварке распределительных трубопроводов с помощью седлового отвода при температурах окружающего воздуха ниже нормативных. Показана необходимость управления тепловым процессом при одновременной приварке седлового отвода к основной трубе и сварке трубы ответвления с отводом при низких температурах для получения динамики температурного поля, при которой формируются качественные сварные соединения.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, тепловой процесс, приварка, седловой отвод, фазовое преобразование, метод конечных элементов, оплавление, охлаждение.

Электросварные седловые отводы с закладным нагревателем используют для быстрого и простого монтажа ответвлений от магистральных или распределительных систем газопровода из полиэтиленовых труб к промышленным и бытовым потребителям. Работы по монтажу обычно проводят в период завершения строительства газопровода, зачастую в осенне-зимнее время, когда температура воздуха ниже предельно допустимой для проведения сварки полиэтиленовых труб. Сварку полиэтиленовых труб деталями с закладными нагревателями рекомендуется выполнять в диапазоне температур от  $-10$  до  $+40$  °C [1].

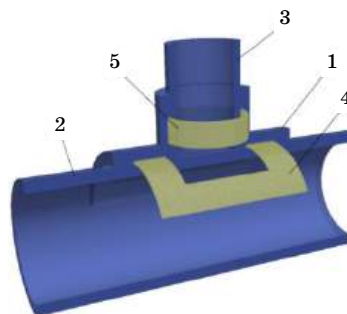
Способы стыковой сварки полиэтиленовых труб и раструбной сварки из полипропиленовых труб на открытом воздухе при температурах ниже нормативных на основе управления тепловым процессом сварки были предложены в работах [2, 3]. С использованием методов математического моделирования и информационных технологий определялись технологические параметры, обеспечивающие требуемую динамику температурного поля при низких температурах окружающего воздуха (ОВ). При этом соответствующее уравнение теплопроводности решали методом конечных разностей, эффективным для решения задач в областях простой формы. При моделировании теплового процесса приварки седлового отвода с закладным нагревателем к полиэтиленовой трубе необходимо решение уравнения теплопроводности в области сложной формы. Кроме того, более сложную форму имеет закладной нагреватель, представляющий собой металлическую проволоку, интегрированную в седловой отвод. Подобную задачу рассматривали в работе [4]. Для упрощения геометрии расчетной области нагреватель седлового отвода рассматривали в виде изогнутого кольца с толщиной, равной толщине проволоки. Для построения геометрии расчетной области воспользовались программой GMSH [5]. Для решения этой задачи применили метод конеч-

ных элементов, эффективный для решения задач со сложной геометрией [6–8]. Результаты расчетов показали необходимость предварительного подогрева с помощью штатного нагревателя и выравнивания температур путем свободного охлаждения под слоем теплоизоляции при приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе при низких температурах окружающего воздуха.

В данной работе рассмотрено применение электросварного седлового отвода с двумя закладными нагревателями, представляющими собой последовательно соединенные спирали с общим источником напряжения, для приварки двух полиэтиленовых труб разного диаметра. Такой седловой отвод используют для монтажа дополнительного ответвления от нерабочей трубы без давления газа. Цель работы — определение технологических операций, необходимых для проведения приварки седлового отвода при температурах воздуха ниже нормативной.

### Постановка задачи

Рассмотрим схему расчетной области (рис. 1) седлового отвода 1 (область  $D_1$ ), участка полиэтиленовых труб 2 и 3 (область  $D_2$ ), нагревательных элементов 4 (область  $D_3$ ) и 5 (область  $D_4$ ).



**Рис. 1. Расчетная модель седлового отвода и участка трубы:** 1 — седловой отвод; 2 — первая труба; 3 — вторая труба; 4 — первый нагревательный элемент; 5 — второй нагревательный элемент



Нагрев и оплавление свариваемых поверхностей производится закладными нагревательными элементами 4 и 5 при их подсоединении к источнику тока.

Границы промежуточной фазы (двухфазной области) определяются температурами солидуса ( $T_S$ ) и ликвидуса ( $T_L$ ). Температурное поле в сварном соединении определяется из уравнения теплопроводности:

$$\left[ c(T) + \rho_f L \frac{\partial \Psi}{\partial T} \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} [\lambda(T) \text{grad} T] + Q_1(t) + Q_2(t), \quad x \in D, \quad 0 < t \leq t_m, \quad (1)$$

где  $T$  — температура;  
 $L$  — удельная теплота фазового перехода;  
 $\rho_f$  — плотность фазы, претерпевающей превращение;  
 $D = \bigcup_{i=1}^5 D_i$  — расчетная область;  
 $\Psi(T) = \begin{cases} 0, & T < T_\Phi; \\ 1, & T \geq T_\Phi. \end{cases}$

Плотность теплового потока  $Q_i(t)$  определяется по формуле

$$Q_i(t) = \begin{cases} \frac{U_i^2}{R_i \{1 + \beta [T(x) - 20]\} V_i}, & x \in D_i; \\ 0, & x \in D / D_i, \end{cases}$$

где  $U_i$  — напряжение, подаваемое на нагревательный элемент  $i$ ;  
 $R_i$  — сопротивление нагревательного элемента  $i$ ;  
 $\beta$  — температурный коэффициент сопротивления;  
 $V_i$  — объем нагревательного элемента  $i$ .

Фазовый переход полиэтилена происходит в интервале температур  $[T_S < T_\Phi < T_L]$ . Приближение для функции  $\Psi(T)$  (функция Хевисайда) возьмем в следующем виде:

$$\tilde{\Psi}(T) = \begin{cases} 0, & T \leq T_S; \\ \frac{T}{T_L} \int_{T_S}^T q(u) du, & T_S < T < T_L; \\ \int_{T_S}^{T_L} q(u) du, & T \geq T_L, \end{cases}$$

где  $q(T)$  — зависимость теплового потока от температуры, отнесенная к единице массы вещества, регистрируемая дифференциальным сканирующим калориметром (ДСК).

Удельная теплота фазового перехода  $L$  определяется по формуле

$$L = \frac{(t_1 - t_2) \int_{T_S}^{T_L} q(u) du}{T_L - T_S},$$

где  $t_1, t_2$  — время начала и окончания фазового перехода.

Следовательно,

$$\chi(T) = L \frac{\partial \tilde{\Psi}}{\partial T} = \begin{cases} 0, & T \leq T_S; \\ \frac{q(T)}{\theta}, & T_S < T < T_L; \\ 0, & T \geq T_L, \end{cases}$$

где  $\theta$  — скорость нагрева, варьируемая в ДСК.

Таким образом, уравнение (1) для определения динамики температурного поля запишем в виде

$$\left[ c + \rho_f \chi(T) \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} (\lambda \text{grad} T) + Q_1(t) + Q_2(t), \quad x \in D, \quad 0 < t \leq t_m. \quad (2)$$

Коэффициенты уравнения выражаются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} c(T) &= \rho^- c^- + \tilde{\Psi}(T) (\rho^+ c^+ - \rho^- c^-); \\ \lambda(T) &= \lambda^- + \tilde{\Psi}(T) (\lambda^+ - \lambda^-); \\ \rho_f(T) &= \begin{cases} \rho^+, & \text{при оплавлении;} \\ \rho^-, & \text{при кристаллизации,} \end{cases} \end{aligned}$$

где  $c^-, \rho^-, \lambda^-$  и  $c^+, \rho^+, \lambda^+$  — удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность для твердой и жидкой фазы материала трубы соответственно.

Уравнение (2) дополняется начальным условием

$$T(x, 0) = T_0, \quad (3)$$

где  $T_0$  — температура окружающего воздуха.

На свободных боковых и внутренних поверхностях трубы и седлового отвода  $\Gamma$  задается условие конвективного теплообмена:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_\Gamma = \alpha (T|_\Gamma - T_0), \quad (4)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплообмена. На торцах трубы и отвода  $\Gamma_T$  задается граничное условие первого рода:

$$T|_{\Gamma_T} = T_0. \quad (5)$$

Аппроксимация уравнения (2) с условиями (3)—(5) проводится с использованием метода

конечных элементов. Для конечно-элементной дискретизации умножим уравнение (2) на функцию  $v$  и проинтегрируем по области  $D$  с использованием интегрирования по частям. Получаем

$$\begin{aligned} & \int_D [c(T) + \rho_f \chi(T)] \frac{\partial T}{\partial t} v dx + \\ & + \int_D [\lambda(T) \text{grad} T, \text{grad} v] dx = \\ & = - \int_{\Gamma} \alpha (T - T_0) v ds + \int_{D_1} Q_1 v dx + \int_{D_2} Q_2 v dx. \end{aligned} \quad (6)$$

Определим равномерную сетку по времени:  $\omega_\tau = \{t^n = n\tau, n = 0, 1, \dots, N_0, \tau N_0 = t_m\}$ . Аппроксимацию по времени проведем с использованием стандартной чисто неявной схемы [9]:

$$\begin{aligned} & \int_D [c(T^{n+1}) + \rho_f \chi(T^{n+1})] \frac{T^{n+1} - T^n}{\tau} v dx + \\ & + \int_D [\lambda(T^{n+1}) \text{grad} T^{n+1}, \text{grad} v] dx = \\ & = - \int_{\Gamma} \alpha (T^{n+1} - T_0) v ds + \int_{D_1} Q_1 v dx + \int_{D_2} Q_2 v dx, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $T^n = T(t^n)$ .

Тогда для решения задачи (2)–(5) методом конечных элементов рассматривается вариационная задача нахождения элемента  $T$ , такого, что

$$a(T, v) = f(v), \quad T \in U, \quad v \in V, \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} a(T, v) &= \frac{1}{\tau} \int_D [c(T^n) + \rho_f \chi(T^n)] T^{n+1} v dx + \\ & + \int_D [\lambda(T^n) \text{grad} T^{n+1}, \text{grad} v] dx + \int_{\Gamma} \alpha T^{n+1} v ds; \\ f(v) &= \frac{1}{\tau} \int_D [c(T^n) + \rho_f \chi(T^n)] T^n v dx + \\ & + \int_{\Gamma} \alpha T_0 v ds + \int_{D_1} Q_1 v dx + \int_{D_2} Q_2 v dx. \end{aligned}$$

С использованием вариационной постановки задачи и аппроксимации производной функции температуры по времени определение температурного поля сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений с применением библиотеки вычислительного пакета FEniCS [8].

### Численное решение

Моделирование температурных полей проводилось для труб ПЭ 100 SDR 11 с диаметрами 110 и 63 и седлового отвода 110/63 при различных температурах окружающего воздуха (от плюс 20 до минус 40 °C). Теплофизические свойства материала трубы и седлового отвода: коэффициенты теплопроводности  $\lambda^- = 0,46$  Вт/(м·К),  $\lambda^+ =$

$= 0,24$  Вт/(м·К); плотности  $\rho^- = 950$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho^+ = 800$  кг/м<sup>3</sup>; теплоемкости  $c^- = 1900$  Дж/(кг·К),  $c^+ = 2400$  Дж/(кг·К). Нагревательный элемент в седловом отводе был выполнен из меди (теплопроводность  $\lambda_{Cu} = 12,2$  Вт/(м·К); плотность  $\rho_{Cu} = 8400$  кг/м<sup>3</sup>; теплоемкость  $c_{Cu} = 460$  Дж/(кг·К)). Толщина нагревательных элементов 0,5 мм.

Продолжительности нагрева и охлаждения для стандартной приварки седлового отвода к полиэтиленовой трубе составляли 170 с и 30 мин соответственно. Общее сварочное напряжение бралось равным  $U = 40$  В. Температурный коэффициент сопротивления  $\beta = 1,70 \cdot 10^{-4}$  1/°C. Измеренные сопротивления нагревательных элементов составляли  $R_1 = 2,05$  Ом,  $R_2 = 0,85$  Ом. Значение напряжения для нагревательных элементов определим на основе закона Ома при последовательном соединении проводов:

$$U_i = \frac{UR_i}{R_1 + R_2}, \quad i = 1, 2.$$

Сравнением расчетной и экспериментальной временной температурной зависимости в множестве точек установлена адекватность математической модели реальному тепловому процессу приварки седлового отвода к полиэтиленовым трубам. На рис. 2 представлено сопоставление расчетной и экспериментальной временной зависимости температуры при приварке седлового отвода в точке под нагревательным элементом 1 на расстоянии 2 мм от внешней поверхности трубы при температуре окружающего воздуха 22 °C.

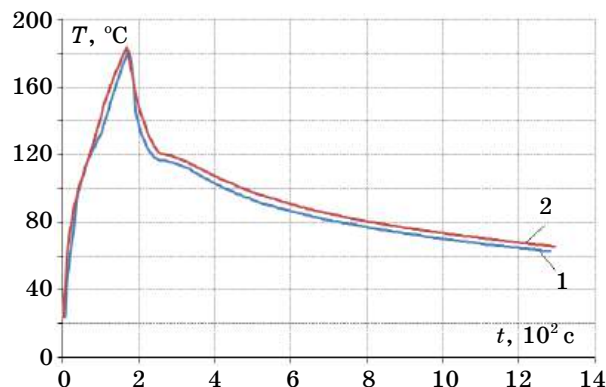
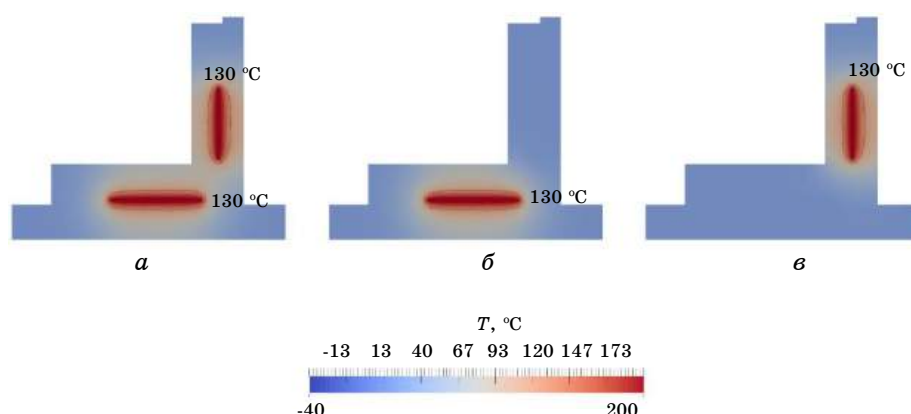


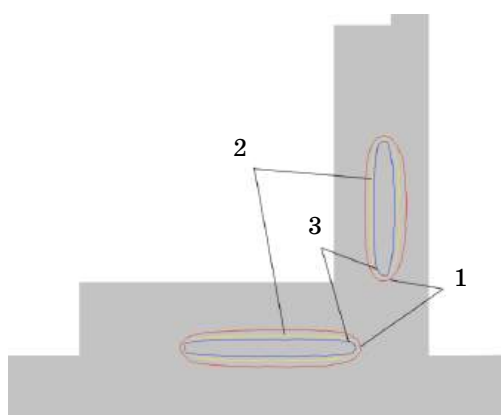
Рис. 2. Сопоставление экспериментальной (кривая 1) и расчетной (кривая 2) зависимости температур

Предположив, что один из источников нагрева выключен, проверим влияние нагрева в зоне оплавления. На рис. 3 приведено сравнение изолиний оплавленной зоны (130 °C) приварки седлового отвода к трубе в стандартном режиме и при выключении нагревательного элемента 1 или 2. Результаты анализа динамики температур показали, что нагревательные элементы при нагреве в стандартном режиме практически не влияют друг на друга.



**Рис. 3. Сравнение изотерм со значением температуры 130 °С в сечении седлового отвода и труб вертикальной плоскостью в момент завершения нагрева ( $t = 170$  с) при температуре окружающего воздуха 22 °С:**  
 а — стандартный режим нагрева; б — при выключении нагревательного элемента 2; в — при выключении нагревательного элемента 1

На рис. 4 приведено сравнение размеров оплавленной зоны (ограниченной изотермой со значением температуры 130 °С) в сечении вертикальной плоскостью при сварке при различных температурах окружающего воздуха в момент завершения нагрева.

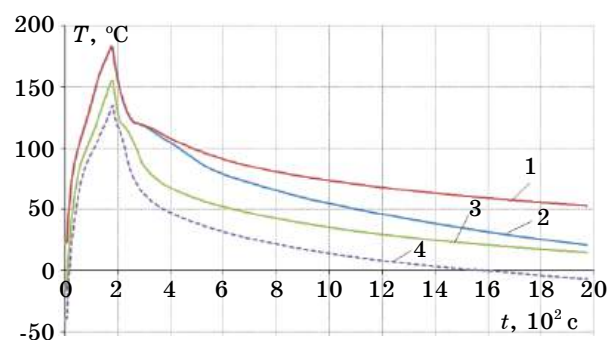


**Рис. 4. Сравнение изотерм со значением температуры 130 °С в сечении седлового отвода и труб вертикальной плоскостью в момент завершения нагрева ( $t = 170$  с) при температуре окружающего воздуха (°С):**  
 1 — 22; 2 — минус 15; 3 — минус 40

Наименьший размер оплавленной зоны получен при низкой температуре окружающего воздуха, что свидетельствует о меньшем объеме полученного расплава, следствиями которого являются недостаточное давление свариваемых поверхностей, более интенсивная кристаллизация, формирование мелкой структуры материала сварного шва и т. д., приводящие к низкому значению прочности соединения. Результаты расчета показывают необходимость предварительного подогрева при сварке в условиях низких температур.

Далее покажем, что предварительный подогрев без обеспечения необходимых условий охлаждения также не приводит к формированию качественного сварного шва. Рассмотрим расчет теплового процесса приварки седлового

отвода к трубам при температуре окружающего воздуха ниже нормативной. Пусть с использованием предварительного подогрева в зоне термического влияния в конце нагрева (оплавления) получено распределение температуры, характерное при приварке при температуре 22 °С. Далее охлаждение сварного соединения проводится на открытом воздухе при температуре ниже нормативной. На рис. 5 представлено сравнение временной зависимости максимальных температур при приварке седлового отвода к трубе при температуре минус 40 °С по описанному ранее режиму, при минус 40 °С и при допустимых для сварки температурах 22 и минус 15 °С — по регламентированному режиму. Аналогичные зависимости получаются и для других точек соединения.



**Рис. 5. Временная зависимость максимальных температур при различных режимах приварки седлового отвода к полиэтиленовой трубе:**

- 1 — нагрев и охлаждение при температуре ОВ 22 °С;
- 2 — нагрев при температуре ОВ 22 °С и охлаждение при минус 40 °С;
- 3 — нагрев и охлаждение при температуре ОВ минус 15 °С;
- 4 — нагрев и охлаждение при температуре ОВ минус 40 °С

### Заключение

Предложена математическая модель теплового процесса приварки седлового отвода с двумя последовательно соединенными закладными

нагревателями для приварки двух полиэтиленовых труб разного диаметра, учитывающая поглощение (при оплавлении) и выделение (при кристаллизации) теплоты в интервале температур. На основе анализа динамики температурных полей при приварке седлового отвода к полиэтиленовым трубам при температурах ОБ ниже нормативных продемонстрирована необходимость проведения предварительного подогрева до допустимой для сварки температуры и охлаждения сварного соединения под слоем теплоизоляции.

Работа выполнена в рамках  
государственного задания Минобрнауки РФ  
(проект № АААА-А21-121011590012-9  
от 14.01.2021).

#### Литература

1. ГОСТ Р ИСО 12176-2-2011 Трубы и фитинги пластмассовые. Оборудование для сварки полиэтиленовых систем. Ч. 2. Сварка с закладными нагревателями.

2. Старостин Н. П., Аммосова О. А. Моделирование теплового процесса сварки полиэтиленовых труб встык при низких температурах // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. № 3. С. 706—713.

3. Старостин Н. П., Аммосова О. А., Васильева М. А. Управление тепловым процессом сварки полипропиленовых труб в раструб при низких температурах // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 2(162). С. 73—78.

4. Старостин Н. П., Васильева М. А., Андреев Б. И. Определение технологических параметров приварки седлового отвода к полиэтиленовой трубе на основе анализа температурного поля // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 2(166). С. 78—83.

5. <http://geuz.org/gmsh/>

6. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. — М.: Мир, 1977.

7. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. — М.: Мир, 1979.

8. Mardal K.-A., Wells G ogg A. Automated solution of differential equations by the finite element method: The FEniCS book. Springer Science & Business Media, 2012.

9. Самарский А. А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1989.

## TEMPERATURE FIELD ANALYSIS IN THE WELDING OF POLYETHYLENE DISTRIBUTION GASPIPELINES WITH THE USE OF A SADDLE BRANCH AT AMBIENT TEMPERATURES BELOW STANDARD

M. A. Vasileva, N. P. Starostin

Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS - Division of Federal Research Centre "The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences", Yakutsk, Russia

*An analysis of the dynamics of the temperature field in the welding of a distribution gas pipeline in a non-pressure state is carried out using a saddle branch at ambient temperatures below the standard. The need to control the thermal process while simultaneously welding the saddle branch to the main pipe and welding the branch pipe to the tap at low temperatures is shown to obtain the dynamics of the temperature field at which qualitative welded joints are formed.*

**Keywords:** mathematical modeling, thermal process, welding, saddle branch, phase transformation, finite element method, reflow, cooling.

Васильева Мария Александровна, старший научный сотрудник.

E-mail: eowa@mail.ru

Старостин Николай Павлович, профессор, главный научный сотрудник.

E-mail: nikstar56@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2021 г.

## **Правила для авторов по оформлению рукописей статей, предлагаемых к публикации в журналах**

Направляя рукопись статьи в редакцию журнала, авторы передают редколлегии и издателю журнала безвозмездное неисключительное право опубликовать ее на русском языке в качестве статьи в печатной и электронной версиях журнала в сети Интернет. При этом за авторами сохраняются их интеллектуальные права на рукопись статьи (в том числе "авторское право"). В связи с этим и с учетом Четвертой части (Раздел VII) Гражданского кодекса РФ авторами должно быть представлено в редакцию письмо в следующей форме:

### **Лицензионный договор о передаче права на публикацию (издательский лицензионный договор)**

Мы, нижеподписавшиеся, авторы рукописи ....., предоставляем редколлегии журнала и издателю ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

.....  
(название журнала)

безвозмездную простую (неисключительную) лицензию на публикацию рукописи статьи как в печатной, так и в электронной версиях журнала.

Мы подтверждаем, что данная публикация не нарушает интеллектуальных прав других лиц или организаций.

Подписи авторов: ..... (ф.и.о., ученая степень, дата)

Статья должна быть подписана всеми авторами. В случае нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией. Рукопись статьи направляется на адрес редакции журнала: 125424, Москва, Волоколамское ш., д. 77, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», Редакция журнала.

Дополнительная информация может быть получена в редакции при обращении по телефону: 8 (495) 491-43-17 или по E-mail: izdanie@ntckompas.ru.

Каждая статья рецензируется в соответствии с решением редколлегии журнала. Рецензенты выбираются из числа ученых и специалистов, компетентных в вопросах, рассматриваемых в статье, и имеющих собственные публикации в данном направлении. Решение о порядке публикации статьи принимается редколлегией с учетом мнения рецензентов. В случае разногласий среди членов редколлегии окончательное решение принимает главный редактор. При полном отклонении рукописи статьи от публикации редакция журнала направляет авторам мотивированный отказ. По этому факту редакция не вступает в полемику с авторами.

#### ***Комплектование статьи (обзора)***

Статья должна быть представлена в редакцию в следующем комплекте:

- сопроводительное письмо, подписанное руководством организации;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати и распространения в

Российской Федерации и других государствах. При отсутствии в организации экспертной комиссии вместо экспертного заключения может быть представлено соответствующее заявление на имя главного редактора журнала от имени руководства организации, где работают авторы. В экспертном заключении или заявлении в обязательном порядке должна быть отражена возможность открытой публикации и передачи публикуемых материалов за границу.

- лицензионный договор по приведенному образцу;
- рукопись статьи — объем статьи (без рисунков) не должен превышать 10 страниц формата А4 при 1,5 межстрочных интервалах, а объем статьи обзорного характера — 20 страниц. Рекомендуемая гарнитура — New Times Roman. Размер шрифта — 12;
- Материал статьи представляется в редакцию в печатном виде (на бумажном носителе) и в электронном варианте на CD/DVD-диске с текстом в формате Word.

#### ***Оформление статьи:***

- статья начинается с указания УДК;
- название статьи набирается строчными буквами (кроме начальной прописной) полужирным шрифтом, размер шрифта 14, для остального текста используется простой шрифт размером 12, причем рекомендуемая гарнитура шрифта — Times New Roman;



- после названия — список авторов, инициалы авторов предшествуют их фамилиям;
- с отступлением в 2 строки представляется аннотация статьи;
- далее приводится список ключевых слов для данной статьи (не более десяти);
- страницы текста нумеруются без пропусков и добавлений литературных обозначений (типа 1а, 2б и т. п.), причем в сквозную нумерацию должны быть включены все элементы статьи;
- внизу первой страницы текста помещается отдельный абзац (с полужирным шрифтом), содержащий контактную информацию об авторе (или авторах) в следующем виде: фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, почтовый адрес предприятия, телефон, E-mail;
- основной текст статьи должен начинаться с четкой постановкой цели и задач работы, сопровождаемой аргументами в пользу ее выполнения на фоне существующего состояния затронутой в статье проблемы. Дальнейший текст статьи также должен иметь смысловые рубрикаторы (разделы и подразделы) без их нумерации. Заканчиваться статья должна отдельным разделом «Заключение» с перечислением основных результатов, следующих из них выводов и, по возможности, предложений по развитию исследований и использованию их результатов.
- после основного текста — список использованных источников "Литература" (не менее 5 источников); Список использованной литературы должен соответствовать всем ссылкам на внешние источники в тексте статьи. Ссылки оформляются в квадратных скобках, например, [1—6], [7, 8]. Внутренние ссылки, т. е. ссылки на формулы, рисунки и таблицы статьи оформляются с использованием круглых скобок, например, формула (1), уравнение (4), (рис. 3), (табл. 2). Любые ссылки в подписях к рисункам и в самих рисунках не рекомендуются;
- далее размещается подробная англоязычная информация о статье: название статьи, фамилия и инициалы авторов (английская транслитерация), предприятие, аннотация, ключевые слова (Keywords).

### **Оформление рисунков:**

- рисунки и графики вставляются непосредственно в нужном месте в статье и в желаемом масштабе.
- рядом с осями графиков указываются отображаемые физические величины только в символьной (буквенной) форме, а через запятую — размерность величины по-русски (прямым шрифтом). Различные кривые на графиках рекомендуется нумеровать, даже если они характеризуются отдельным цветом или типом линии. Графики представляются только на

белом фоне. Вспомогательные сетки на площади графика не допускаются;

- подписи под соответствующими рисунками (полужирный курсивный) представляются в нужных местах текста. Каждая подпись должна быть по возможности лаконичной, но емкой по содержанию.

### **Оформление формул:**

- простые формулы вводить в текст в формате используемого текстового редактора, более сложные формулы — с использованием редактора формул MathType;
- стандартные математические обозначения (например,  $\max$ ,  $\log$ ,  $\sin$ ,  $\exp$  и т. д.) должны быть набраны прямо. То же относится к цифрам и числам;
- для символьного обозначения не векторных физических (технических) величин использовать только латинский и греческий алфавиты, при этом в тексте для греческих букв использовать прямой шрифт, для латинских букв — наклонный шрифт (курсив);
- векторы и матрицы обозначать полужирным прямым шрифтом;
- для нижних и верхних индексов применять арабские цифры, латинские или греческие буквы. Если индекс представляет собой сокращенную форму русского слова — характеристики, то допустимо использовать в его обозначении русские буквы (прямой шрифт), например  $U_{\text{вх}}$ ,  $I_{\text{вых}}$ ,  $v_{\text{гр}}$  и т. п.
- размерность физических величин обозначается всегда только по-русски прямым шрифтом.

### **Оформление таблицы:**

- содержание таблицы не должно дублировать данные, приводимые на графиках или в тексте;
- графы должны иметь название без сокращения отдельных слов.

Рисунки, формулы и таблицы должны иметь свою отдельную сквозную нумерацию. Если на конкретную формулу нет дополнительных (возвратных) ссылок в тексте или она в единственном числе, то нумерация ее не нужна. Единственные таблица и/или рисунок также не нумеруются.

При публикации в журнале каждая статья (в контактной информации) сопровождается сноской со знаком охраны авторского права ©, поставленным перед фамилией автора (фамилиями авторов) и годом издания.

Авторы (или автор) каждой статьи после выхода журнала в свет имеют право на получение от редакции электронной версии статьи в PDF-формате (редактор Adobe Acrobat).