



ВЕСТНИК

2023

№ 4 (99)

САРАТОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Научно-технический журнал



ВЕСТНИК

САРАТОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

2023

№ 4 (99)

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.

Выходит один раз в квартал

Декабрь 2023 года

Учредитель и Издатель:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Главный редактор
д.т.н., профессор А.А. Игнатъев

Заместитель главного редактора
д.т.н., профессор Ю.Б. Томашевский

Ответственный секретарь
к.т.н., доцент И.В. Злобина

Технический секретарь
к.т.н., доцент Е.Е. Миргородская

Редакционная коллегия:
Д.т.н., проф. А.Н. Васин (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)
Д.ф.-м.н., проф. С.Б. Вениг (СНИГУ имени Н.Г. Чернышевского)
Д.х.н., проф. А.В. Гороховский (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)
Д.ф.-м.н., проф. М.В. Жигалов (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)
Д.т.н., проф. О.В. Захаров (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)
Д.т.н., проф. А.В. Королёв (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)
Д.т.н., проф. В.А. Кушников (СНЦ РАН)
Д.т.н., проф. Т.Г. Насад (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)
Чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. А.Ф. Резчиков (ИПУ РАН)
Д.т.н., проф. И.В. Родионов (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)
Чл.-корр. РАО, д.т.н., проф. А.А. Сытник (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)
Д.т.н., проф. А.А. Фомин (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)
Д.т.н., проф. А.В. Яковлев (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка Т.В. Семеновой
Перевод на английский язык к.филол.н. А.Х. Аскаровой

Адрес Издателя и редакции:
Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77, к. 25/615
Телефон: 8 (845-2) 99-86-38
E-mail: vestnik@sstu.ru

Подписано в печать 18.12.2023 Дата выхода в свет 28.12.2023
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 11,25 Уч.-изд. л. 3,5
Тираж 500 экз. Заказ 70 Цена свободная
Отпечатано в типографии Издательства СГТУ имени Гагарина Ю.А.
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Полная электронная версия журнала
размещена в системе РИНЦ
в открытом доступе на платформе
eLIBRARY.RU

**Подписной индекс ПК664 электронной версии Каталога
и Каталога интернет-подписки АО «Почта России»**

Свидетельство о регистрации средства массовой информации **ПИ № ФС 77-65155** от 28 марта 2016 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций

© Саратовский государственный
технический университет
имени Гагарина Ю.А., 2023
ISSN 1999-8341

VESTNIK

**SARATOV
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY**

2023

№ 4 (99)

Scientific Journal

Since 2003

Published quarterly

December 2023

Constitutor and Editor

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Editor-in-chief

Professor A.A. Ignatiev

Editor-in-chief assistant

Professor Yu.B. Tomashevsky

Executive secretary

PhD, Associate Professor I.V. Zlobina

Technical secretary

PhD, Associate Professor E.E. Mirgorodskaya

Editorial board:

Dr. Sc., Professor A.N. Vasin (SSTU)

Dr. Sc., Professor S.B. Venig (SSU)

Dr. Sc., Professor A.V. Gorokhovskiy (SSTU)

Dr. Sc., Professor M.V. Zhigalov (SSTU)

Dr. Sc., Professor O.V. Zakharov (SSTU)

Dr. Sc., Professor A.V. Korolev (SSTU)

Dr. Sc., Professor V.A. Kushnikov (Scientific center of RAS)

Dr. Sc., Professor T.G. Nasad (SSTU)

Corresponding member of RAS, Dr. Sc., Professor

A.F. Rezhnikov (ISP RAS)

Dr. Sc., Professor I.V. Rodionov (SSTU)

Corresponding member of RAE,

Dr. Sc., Professor A.A. Sytnik (SSTU)

Dr. Sc., Professor A.A. Fomin (SSTU)

Dr. Sc., Professor A.V. Yakovlev (SSTU)

Editor L.A. Skvortsova

Computer-based page-proof T.V. Semenova

Rendering: PhD (Philology) A.H. Askarova

Editorial office: 25/615 77, Politechnicheskaya Street
Saratov, 410054 Russia

Phone: +7 (845-2) 99-86-38

E-mail: vestnik@sstu.ru

Print date: 18.12.2023. Date of publication 28.12.2023

Format 60×84 1/8 Offset-Print

Conventional printed sheet 11,25 Publication base sheet 3,5

Circulation: 500 printed copies Order 70

Publisher and Editorial Address:

77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russia

Registration Certificate of mass media *PI № FS 77-65155* of
28 March 2016 issued by the Federal Service for Supervision of
Communications, Information Technology, and Mass Media

eLIBRARY.ru

**Subscription index IIK664 in the electronic version of the Catalog
and the Catalog of the Internet subscription of JSC «Russian Post»**

ISSN 1999-8341

© Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

- Андреев А.А., Безруков А.И.**
ПРОБЛЕМЫ СИСТЕМНОГО АДМИНИСТРИРОВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИИ
С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ..... 5
- Горбунов В.В., Сигитов Е.А.**
КАЛИБРОВКА РАСТРОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ДЕФЕКТОСКОПОВ
ПО КОНТРОЛЬНЫМ ОБРАЗЦАМ С ТОНКИМИ ПРОРЕЗЯМИ..... 15
- Игнатъев М.А.**
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ
КАК ЭЛЕМЕНТ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ..... 22
- Молчанов Д.В.**
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРУЖНОГО ДАТЧИКА КОНЦЕНТРАЦИИ
ПРОМЕЖУТОЧНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДОГРЕВАТЕЛЕМ ГАЗА 30
- Терехов С.В.**
ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАФУНКЦИЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЯВЛЕНИЙ
И ПРОЦЕССОВ В СИНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ..... 38

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Бесчвертный Д.А., Васин А.Н.**
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛАМЕЛЕЙ
ДЛЯ ЩЕЛОЧНЫХ И КИСЛОТНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ 52
- Насад Т.Г., Каднов Ю.П.**
КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ
ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ 61

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

- Ганиев И.Н., Аминова Н.А., Бердиев А.Э., Алихонова С. Дж.**
КОРРОЗИОННО-ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЦИНКОВОГО СПЛАВА
ЦАМСв4-1-2,5, ЛЕГИРОВАННОГО БАРИЕМ, В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА NaCl 68
- Яковлев Н.А., Плакунова Е.В., Левкина Н.Л., Деревякин В.И., Нургазина А.С.**
ИЗУЧЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ МОДИФИКАЦИИ АМИНОСИЛАНом АГМ-9
ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО И ДИСПЕРСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ..... 80

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND TELECOMMUNICATIONS

Andreev A.A., Bezrukov A.I. SYSTEM ADMINISTRATION PROBLEMS AT DISTRIBUTED ENTERPRISES	5
Gorbunov V.V., Sigitov E.A. CALIBRATION OF AUTOMATED RASTER EDDY CURRENT FLAW DETECTORS USING CONTROL SAMPLES WITH THIN SLOTS	15
Ignatiev M.A. AUTOMATED EDDY CURRENT CONTROL SYSTEM AS AN ELEMENT OF A UNIFIED INFORMATION SPACE OF A MACHINE-BUILDING ENTERPRISE	22
Molchanov D.V. MODELING AN IMMERSION SENSOR OF INTERMEDIATE COOLANT FOR AUTOMATED CONTROL OF GAS HEATERS	30
Terekhov S.V. APPLICATION OF PARAFUNCTIONS TO DESCRIBE THE PHENOMENA AND PROCESSES OF A SYNERGETIC SYSTEM.....	38

MECHANICAL ENGINEERING

Beschvertny D.A., Vasin A.N. TECHNOLOGY CHARACTERISTICS OF LAMELLA PRODUCTION FOR ALKALINE AND ACID BATTERIES	52
Nasad T.G., Kadnov Y.P. SURFACE QUALITY OF MOLD PARTS IN ELECTRIC EROSION MACHINING	61

CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

Ganiev I.N., Aminova N.A., Berdiev A.E., Alikhonova S.J. CORROSION-ELECTROCHEMICAL BEHAVIOR OF CAMSv4-1-2,5 ZINC ALLOY DOPED WITH BARIUM IN NaCl ELECTROLYTE MEDIUM	68
Yakovlev N.A., Plakunova E.V., Levkina N.L., Derevyakin V.I., Nurtazina A.S. PROSPECTS FOR MODIFICATION OF EPOXY BINDER AND DISPERSED FILLERS USING AGM-9 AMINOSILANE.....	80

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 004.77

А.А. Андреев, А.И. Безруков

ПРОБЛЕМЫ СИСТЕМНОГО АДМИНИСТРИРОВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИИ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

Аннотация. Рассмотрены проблемы организации корпоративной вычислительной сети предприятия с географически распределенными бизнес-процессами. Дан обзор существующих направлений и программных инструментов, позволяющих решить перечисленные проблемы. Рассмотрены: открытая платформа Docker, инструменты Podman, Kubernetes, Containerd и LXD. Оценены достоинства и недостатки применения каждого из рассматриваемых инструментов на конкретном предприятии. Сделан и обоснован выбор LXD в качестве инструментария для корпоративной сети предприятия.

Ключевые слова: предприятие с географически распределенными бизнес-процессами, корпоративная сеть, контейнеризация, виртуализация, Docker, Podman, Kubernetes, Containerd, LXD

А.А. Andreev, A.I. Bezrukov

SYSTEM ADMINISTRATION PROBLEMS AT DISTRIBUTED ENTERPRISES

Abstract. The article is devoted to the problems of organizing a corporate computer network of an enterprise with geographically distributed business processes. An analytical re-

view of existing areas and software tools that allow solving these problems is given. The Docker open platform, the Podman, Kubernetes, Containerd, Containerd and LXD tools are considered. Advantages and disadvantages of using each of these tools at specific enterprises are assessed. The choice of LXD as a toolkit for a corporate enterprise network has been made and justified.

Keywords: *enterprise with geographically distributed business processes, corporate computer network, containerization, virtualization, storage orchestration, Docker, Podman, Kubernetes, Containerd, LXD*

Введение

Применение компьютерных технологий является необходимым условием конкурентоспособности предприятия. Особенно это важно на предприятиях с бизнес-процессами, требующими быстрого принятия решений, организации и координации взаимодействия многих сотрудников, принимающих ключевые решения, а также при географически распределенном характере бизнеса.

Рассмотрим проблемы таких предприятий на примере группы компаний, специализирующейся на поставках, обслуживании и ремонте промышленной трубопроводной арматуры.

Предприятие имеет солидную сбытовую сеть, включающую более 25 представительств в центральной части России. Ассортимент поставляемой продукции насчитывает более 60000 наименований [1]. Группа компаний включает 8 крупных территориальных площадок и более 30 удаленных филиалов, общая численность персонала – более 2000 человек.

Для организации столь сложного бизнеса в организации используется корпоративная сеть, структура и управление которой должно соответствовать специфике деятельности организации. Рассмотрим особенности функционирования корпоративной сети подобной компании.

Наличие нескольких несколько достаточно удаленных подразделений при необходимости координировать их деятельность и проводить единую политику компании порождает следующие требования и ограничения:

- корпоративная сеть компании не может быть выполнена в виде локальной вычислительной сети;

- достаточная удаленность от пользователей, их большое количество, а также разнообразие их требований к корпоративной сети не позволяют администраторам сети лично встречаться с каждым пользователем и решать его персональные проблемы на его рабочем месте;

– для обеспечения единства управления компанией и согласованности действий всех подразделений необходимо проводить единую политику управления сетью, включающую:

- организацию доступа и взаимодействия рабочих групп, в том числе расположенных на различных территориях;
- обеспечение информационной безопасности;
- обеспечение лицензионной чистоты используемых программных продуктов;
- синхронизацию работ по ремонту, обновлению и развитию сети, минимально мешающих основной деятельности фирмы.

С целью развития корпоративной сети и оптимизации инвестиций, направляемых на эти нужды, компания должна проводить постоянный мониторинг, анализ проблем и выбирать наиболее эффективные пути вложения средств в развитие сети. В статье приведен аналитический обзор подходов и программных инструментов, используемых для решения специфических задач системного администрирования корпоративной сети предприятия с распределенной технологической структурой.

Теоретические исследования

Перечислим проблемы, характерные для подобной сети. Первая проблема – это сложность взаимодействия с пользователем, чаще всего удаленного. Кроме того, что при удаленном взаимодействии достаточно трудно понимать и решать технические вопросы, возникающие в ходе рабочего процесса и эксплуатации технического средства, возникает проблема синхронизации. Например, рутинное обновление операционной системы или применение групповых политик требует согласования по времени действий многих сотрудников, нередко работающих в разных часовых поясах. Отсутствие такого согласования приводит к дополнительным простоям и сбоям в работе. Например, могут происходить самые банальные ситуации, когда части пользователей не было дистанционно установлено заявленное ПО только потому, что в момент установки их устройство по какой-то причине было выключено.

Проведение единой политики также наталкивается на определенные трудности: сложившиеся в коллективах отношения и практики иногда вступают в противоречие с общефирменной политикой.

Для преодоления перечисленных трудностей в работе корпоративной сети необходимо применять новые организационные и технические методы и программные инструменты.

В первую очередь приходится отказаться от индивидуальной работы с каждым пользователем. Задачи и проблемы пользователей нужно систематизировать и типич-

зировать. Решения типовых проблем надо оформлять так, чтобы иметь возможность дистанционно внедрить типовое решение у всех пользователей, для которых оно подходит.

Контроль и мониторинг исполнения общефирменной политики необходимо организовать дистанционно, при этом предоставив специалистам на местах возможность (и ответственность) организации доступа сотрудников к ресурсам сети, формированию рабочих групп и организации их безопасного взаимодействия.

Настоящая статья посвящена некоторым аспектам организации работы корпоративной сети большого предприятия с географически распределенными бизнес-процессами.

Рассматривая существующие решения и программные инструменты, можно выявить некоторую закономерность. Стремясь оптимизировать деятельность конкретных предприятий, разные разработчики по-разному оценивали важность перечисленных выше проблем.

В результате появилось множество программных продуктов, каждый из которых ориентирован на решение только некоторых проблем корпоративной сети предприятия. Поэтому для успешного выбора инструментария, учитывающего конкретные условия, предпочтения и ограничения, требуется провести классификацию существующих подходов и инструментов, позволяющую оценить полезность применения каждого из них в конкретных условиях.

Рассмотрим несколько подходов, позволяющих «развязать» разнообразные требования со стороны рабочих мест и существующую вычислительную среду.

Первый подход – это виртуализация [2]: способ логически отделить систему, решающую конкретные задачи от имеющейся программно-аппаратной среды. В зависимости от отделяемого объекта, виртуализация бывает аппаратной, рабочих столов и операционной системы. Аппаратная виртуализация – это создание независимых и изолированных виртуальных компьютеров, использующих аппаратные ресурсы вычислительной среды, в которой они реализованы; виртуализация рабочих столов, разделение логического рабочего стола и его физической инфраструктуры. А виртуализация операционной системы – запуск системы, требуемой пользователю, изолированно от текущей операционной среды.

Второй подход – контейнеризация. Она является ответвлением виртуализации и подразумевает создание виртуального контейнера: оболочки, подобной виртуальной машине, но без полноценной операционной системы, а лишь с ее необходимой частью [3]. В данном методе часто используется понятие примитивов. Это сервисы, помогающие в работе с контейнерами, их свертке/развертке, настройке и т. д.

Оба подхода постоянно используют bash-скрипты – небольшие программы, являющиеся инструкциями для установки или обеспечения работоспособности созданной системы. Основными архитектурными элементами при работе с виртуализацией и контейнеризацией являются образ и слой образа. Образ – это файл, который используется для развертывания системы и быстрой первичной настройки, в то время как слой образа – его отдельная часть, отвечающая за отдельный участок системы [4].

Рассмотрим некоторые из программных инструментов, реализующих эти подходы.

Самым распространенным из них является открытая платформа Docker. Платформа используется для разработки, доставки и эксплуатации приложений и позволяет разрабатывать код быстрее и более оптимизированным способом, быстрее его тестировать, а также сокращает время между написанием кода и его запуском. Благодаря этому инструменту можно относительно легко оптимизировать создаваемые bash-скрипты при разработке контейнеров [5].

Docker помогает быстро сворачивать и разворачивать легковесные контейнеры с минимумом приложений внутри, что делает его очень удобным для работы микросервисов.

В случае организации корпоративной сети крупной фирмы Docker помог бы частично решить проблемы с приложениями пользователей или же облегчить работу серверов, но полностью обеспечить функционирование необходимых задач проблематично, так как Docker позволяет использовать только небольшие контейнеры, в которые нельзя поместить полноценную операционную систему.

Следующий инструмент, который может быть использован в данных задачах, – это Podman [6]. В отличие от Docker он не требует дополнительных сервисов для работы и взаимодействует без прав root пользователя. Podman по-своему реализует хранение данных.

Во время запуска контейнера этот инструмент обеспечивает доступ ко всем слоям образа и создает свой исполняемый слой, на который файловая система хоста не реагирует. Если контейнер удалится, то эти данные будут также удалены.

Явным преимуществом Podman является создание полноценной операционной системы, что позволяет обеспечить независимость от операционной среды, в которой находится контейнер. Свойство удалять хранящуюся информацию о контейнере в любой момент времени позволяет обеспечить более надежную защиту информации.

Недостатком Podman является отсутствие root прав пользователя, что вызывает необходимость дополнительного разграничения прав пользователей, а также требует до-

Информационные технологии и телекоммуникации

полнительных мер для предотвращения несанкционированных действий посторонних пользователей и злоумышленников.

Kubernetes [7] – более «умный» инструмент по сравнению с Docker, так как она может собирать контейнеры в группы и управлять ими.

Это решение дает возможность более равномерно распределить нагрузку между контейнерами или их группами для повышения производительности и надежности корпоративной сети [8].

Рассмотрим дополнительные особенности Kubernetes:

- Автоматические развертывания и откаты, что позволяет обеспечить более высокую производительность корпоративной сети;
- Оркестрация хранилища – оптимизирует взаимодействие Kubernetes с группой контейнеров;
- Управление секретами и конфигурациями – позволяет проводить общую информационную политику фирмы;
- Двойной стек IPv4/IPv6 увеличивает адресное пространство внутри сети и обеспечивает совместимость с ранее разработанными программами;
- Обнаружение сервисов и балансировка нагрузки – позволяет оптимизировать общую нагрузку сети;
- Самовосстановление повышает надежность работы сети [9];

Отметим, что Kubernetes является достаточно тяжелой системой, что доставляет много проблем при ее использовании на предприятии. В ней усложнены процессы миграции контейнеров, что может повлечь простои в работе. Долгие и сложные процедуры установки и настройки системы также могут стать причинами дополнительных простоев. Аналогично ручное создание кластера является долгим и сложным процессом. Кроме того, у Kubernetes существует ряд несовместимостей с другими приложениями.

Компания Google предлагает продукт, который, по их мнению, лишен тяжеловесности Kubernetes и имеет минимальный функционал, обеспечивающий более простое использование – Containerd [10].

По сути, это демон с хост-системой, управляющий всем жизненным циклом контейнера. Он может взаимодействовать для отладки с API, а также с клиентом отладки и администрирования `ctr`.

Containerd также работает и с примитивами, такими как `bundles`, которые содержат метаданные и данные корневой файловой системы. Данный примитив является сутью системы Containerd, отвечающей за его координацию и запуск. `Bundles` является сервисом, обеспечивающим возможность извлекать и упаковывать метаданные из ранее созданных образов.

Утилита `runC`, работающая с `libcontainer`, запускает контейнеры в виде дочерних процессов, но требует для запуска корневую файловую систему. На самом деле эта особенность несколько усложняет разработку в силу необходимости постоянной работы текущей корневой системы, что не всегда эффективно и возможно для некоторых компаний.

Фактически `Containerd` является компромиссом между тяжелой многофункциональной системой и легкой, обеспечивающей только необходимые функции.

В отличие от `Docker` или `Kubernetes` в `Containerd`, кроме контейнеров приложений, используются системные контейнеры. Системные контейнеры имитируют полноценную операционную систему и позволяют запускать несколько процессов одновременно. К сожалению, отсутствие необходимого функционала и ряд несовместимостей с существующим ПО затрудняют использование данной системы для корпоративной сети большого предприятия с распределенными бизнес-процессами.

Последний инструмент, который стоит рассмотреть, – это способ контейнеризации `LXD` [11], состоящий из нескольких частей:

`LXC` – интерфейс в пространстве пользователя для сдерживания (защиты от изменений) ядра `Linux`, позволяет создавать контейнеры и управлять ими. Основан на `namespace` `sv groups` (группа процессов, для которой механизмами ядра системы организована изоляция и ограничение ресурсов в собственном пространстве имен).

`LXD` – контейнерный гипервизор, который включает одноименный демон, представляющий `Rest API`, для работы с контейнерами, а также клиент командной строки `LXC`. Благодаря `LXD` можно настраивать не только контейнеры, но и виртуальные машины.

`LCXFS` – особая файловая система, позволяющая контейнерам ощущать себя как более независимые системы, маскируя процесс.

`LXD` обеспечивает поддержку системных контейнеров и виртуальных машин.

При запуске виртуальной машины `LXD` использует аппаратное обеспечение хост-системы, но ядро ОС предоставляется уже виртуальной машиной. Поэтому виртуальные машины можно использовать для запуска, например, другой операционной системы [12].

В отличие от `Docker` или `Kubernetes`, предоставляющих только контейнеры приложений, в `LXD` используются системные контейнеры. Если контейнеры приложений позволяют упаковать только один процесс или одно приложение, то системные контейнеры имитируют полноценную операционную систему и позволяют запускать несколько процессов одновременно.

Таким образом, контейнеры приложений подходят для предоставления отдельных компонентов, тогда как системные контейнеры предоставляют полное решение библиотек, приложений, баз данных и т. д.

По мнению авторов, LXD – это самое подходящее решение из всех рассмотренных. Оно позволяет создавать контейнеры в виде заготовок для разного типа пользователей, помещать в них полноценную ОС и работать в ней вне зависимости от операционной системы хоста. Соответственно, реализуется разграничение прав пользователей, можно спокойно проводить обновления и установку необходимых программ, практически не отвлекая пользователей от работы.

Выводы

Разнообразие инструментов контейнеризации и виртуализации пользовательских приложений позволяет выбрать наиболее рациональные подходы и инструменты для решения задач системного администрирования корпоративной сети конкретного предприятия. Так, контейнеры приложений подходят для предоставления отдельных компонентов и создания относительно простых компьютеризированных рабочих мест. Если требуется организовать совместную работу нескольких приложений, использовать специальные библиотеки, базы данных и т. д., лучшим решением является создание системных контейнеров. При необходимости оптимизации взаимодействия с группой контейнеров требуется использовать «тяжелые» инструменты, такие как Kubernetes. Компромиссом между «весом» программы и полнотой ее функциональности является инструмент Containerd, предложенный корпорацией Google.

По мнению авторов, для организации корпоративной сети большого географически распределенного предприятия самым подходящим решением является система LXD. Использование системных контейнеров позволяет:

- включить в типовые контейнеры все ресурсы, необходимые для данного типа пользователя и организовать их взаимодействие;
- использовать в контейнерах собственные операционные системы и соответственно обеспечить разграничение прав пользователей;
- дистанционно проводить обновления и установку необходимых программ, практически не отвлекая пользователей от работы.

Данное решение применимо к разработке корпоративных сетей крупных предприятий с географически распределенными бизнес-процессами.

Список источников

1. Сайт компании Энергомашкомплект. эмк.рф. URL: <https://yandex.ru/search/?text=Энергомашкомплект.+эмк.рф+&clid=2413823-215&>
2. Детков Е.А., Коревых А.А. Виртуализация и ее особенности // Integral. 2019. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/virtualizatsiya-i-ego-osobennosti/viewer>
3. Основы современной контейнеризации. URL: <https://www.securitylab.ru/analytics/506905.php>
4. Контейнеры и виртуальные машины. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/virtualization/windowscontainers/about/containers-vs-vm>
5. Руководство по работе с Docker. URL: <https://docs.docker.com/desktop/>
6. Документация Podman. URL: <https://docs.podman.io/en/latest/Commands.html>.
7. Основы Kubernetes. URL: <https://habr.com/ru/articles/258443/>
8. Документация Kubernetes. URL: <https://kubernetes.io/ru/docs/home/>
9. Липатова С.Е., Белов Ю.С. Практики обеспечения кибербезопасности в Kubernetes // E-Scio. 2022. № 1 (64). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/praktiki-obespecheniya-kiberbezopasnosti-v-kubernetes>
10. Работа с containerd. URL: <https://kubernetes.io/ru/docs/concepts/containers/runtime-class/>
11. Документация LXD. URL: <https://linuxcontainers.org/lxd/docs/latest/>
12. Fast, lightweight and secure. Infrastructure LXD containers in VMmanager. URL: <https://www.ispsystem.com/news/lxd-preview-instr>.
13. Уорд Б. Внутреннее устройство Linux. Санкт-Петербург: Питер, 2016. 384 с.
14. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети / пер. с англ. А. Гребеньков, ред. Ю. Сергиенко. Санкт-Петербург: Питер, 2019. 960 с
15. Документация VMmanager 6 (Администратор). URL: <https://docs.ispsystem.ru/vmmanager-admin/klastery/lxd>

Сведения об авторах

Андреев Анатолий Алексеевич – магистрант кафедры «Информационно-коммуникационные системы и программная инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anatoly A. Andreev – Master's student, Department of Information and Communication Systems and Software Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Информационные технологии и телекоммуникации

Безруков Алексей Иосифович –
кандидат экономических наук,
доцент кафедры «Информационно-
коммуникационные системы и программная
инженерия» Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Aleksey I. Bezrukov –
PhD (Economics),
Associate Professor,
Department of Information
and Communication Systems
and Software Engineering, Yuri Gagarin
State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 02.11.2023, принята к опубликованию 12.12.2023

УДК 681.5

В.В. Горбунов, Е.А. Сигитов

**КАЛИБРОВКА РАСТРОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ДЕФЕКТОСКОПОВ
ПО КОНТРОЛЬНЫМ ОБРАЗЦАМ С ТОНКИМИ ПРОРЕЗЯМИ**

Аннотация. Рассматриваются вопросы калибровки автомата контроля роликов подшипников по контрольным образцам деталей с дефектами в виде трещин и их применения для метрологической аттестации вихретоковых приборов.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, автомат контроля роликов подшипников, контрольные образцы с дефектами, калибровка автомата

V.V. Gorbunov, E.A. Sigitov

**CALIBRATION OF AUTOMATED
RASTER EDDY CURRENT FLAW DETECTORS USING
CONTROL SAMPLES WITH THIN SLOTS**

Abstract. The article considers calibration issues of automated control of bearing rollers using reference specimens of parts with defects having the form of cracks and their application for metrological certification of eddy current devices.

Keywords: eddy current control, automated control of bearing rollers, reference specimens with defects, automatic machine calibration

Введение

Вихретоковый контроль, являющийся неразрушающим методом контроля качества, применяется в подшипниковой промышленности для выявления различных дефектов в поверхностном слое шлифованных деталях различного назначения, например, колец и роликов [1-3].

Автоматизация вихретокового контроля обеспечивает повышение его качества за счет снижения влияния человеческого фактора, позволяет осуществлять разбраковку деталей и не пропускать их на сборку подшипников, а также вносить коррекцию

в процесс шлифования, что в конечном итоге существенно повышает качество подшипников и их конкурентоспособность на рынке [3, 4]. При серийном производстве подшипников применяются автоматы вихретокового контроля, встраиваемые в автоматические линии по производству деталей. Автоматы имеют заданные метрологические характеристики, количественные значения которых определяются при калибровке.

Настройку и калибровку автоматов и других средств вихретокового контроля деталей подшипников проводят с помощью специальных метрологических средств, к которым относятся образцы деталей с искусственными дефектами в виде прямоугольных прорезей с соответствующими параметрами: глубина, ширина, длина при отношении сигнал-шум вихретоковых преобразователей не менее двух [5]. Например, в соответствии с техническими требованиями Европейского стандарта EN 12080 «Транспорт железнодорожный. Буксы. Подшипники качения», применяемыми на европейских предприятиях, в том числе локализованных в России, предусмотрен сплошной автоматизированный контроль поверхностного слоя деталей вихретоковым методом. В России на ряде предприятий (ОАО «ЕПК Саратов», ООО «Средневожский подшипниковый завод» (г. Самара) и других) применяют автоматизированное вихретоковое оборудование, которое позволяет достоверно выявлять критические дефекты, не допускаемые стандартом EN 12080. Наибольшая эффективность достигается при стандартизации технических требований к контролю качества деталей подшипников [6], необходимая, в частности, для повышения качества подшипниковой продукции, используемой в ОАО «РЖД», а также для поставок на европейский рынок. Из изложенного следует, что метрологическое обеспечение автоматизированного вихретокового контроля деталей требует особого внимания с точки зрения обеспечения качества подшипников.

Экспериментальные исследования контрольных образцов с искусственными дефектами

В соответствии со стандартом EN 12080 размеры искусственного дефекта в виде прорези на мерах, сигнал от которого считается предельно допустимым, должны иметь следующие значения: глубина $0,05 \pm 0,01$ мм, ширина $0,05 \pm 0,01$ мм, длина $3,0 \pm 0,1$ мм. В соответствии с этим для метрологического обеспечения вихретокового контроля в производстве подшипников необходимо применять меры с искусственными дефектами, соответствующие стандарту EN 12080. Для средств вихретокового контроля нормируют ряд метрологических характеристик, что является обязательным условием отнесения вихретоковых приборов к средствам измерений с последующим внесением данных в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

Современный растровый вихретоковый контроль деталей подшипников достиг чувствительности к дефектам на уровне магнитно-порошковой дефектоскопии, применяемой для выявления трещин и химического травления, используемого для выявления отклонений структуры металла. Растровый контроль характеризуется высокой информативностью, которая достигается построением и анализом сканограмм, на которых яркостью и цветом выделяются области с аномальными физико-механическими свойствами. Растровое сканирование с построением сканограмм позволяет оценивать реакцию дефектоскопа не только на дефект в целом, но и на отдельные участки его протяженности [7].

Для калибровки автоматов растрового вихретокового контроля роликов буксовых подшипников разработаны и изготовлены контрольные образцы с искусственными дефектами в виде тонких наклонных прорезей, глубина которых изменяется по длине прорези.

Соответствие контрольных образцов их назначению проверено сравнением результатов сканирования образцов и роликов с реальными дефектами – трещинами.

Результаты сканирования контрольного образца с продольной тонкой прорезью и ролика с трещиной представлены на рис. 1 и 2.

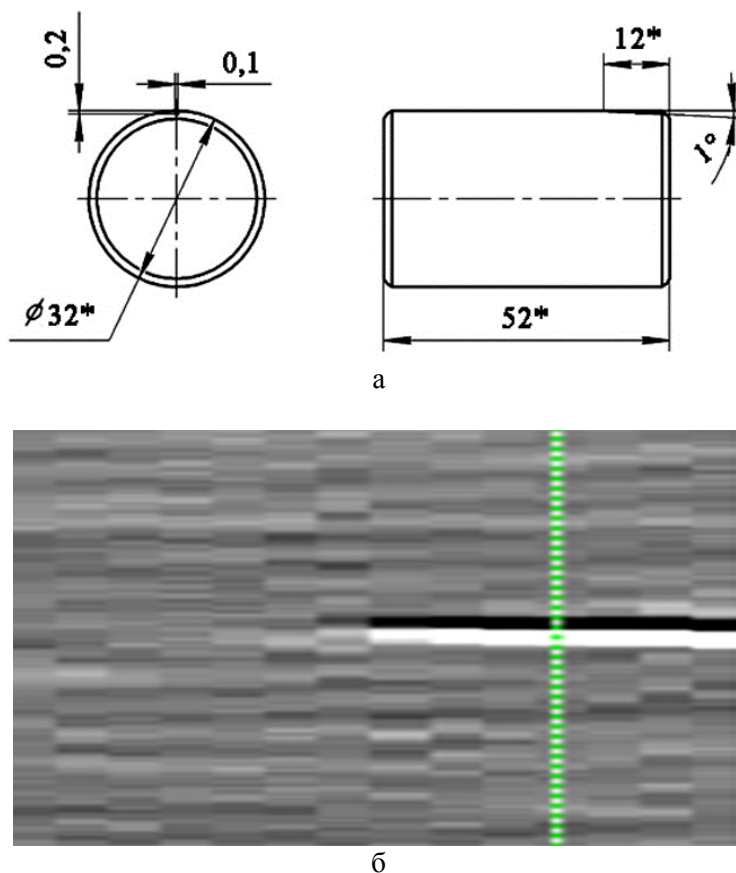
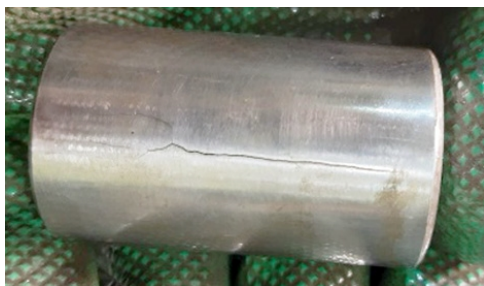
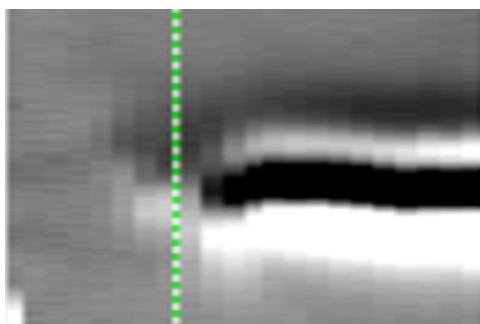


Рис. 1. Чертеж контрольного ролика (а) и фрагмент сканограммы (б)



а



б

Рис. 2. Фото ролика с трещиной, выявленной магнитно-порошковым методом (а), и фрагмент сканограммы поверхности ролика (б)

Можно сделать вывод, что сигналы от искусственных дефектов соизмеримы с сигналами от реальных трещин. Аналогичные результаты получены при сканировании показанных на рис. 3 роликов с другими видами прорезей.

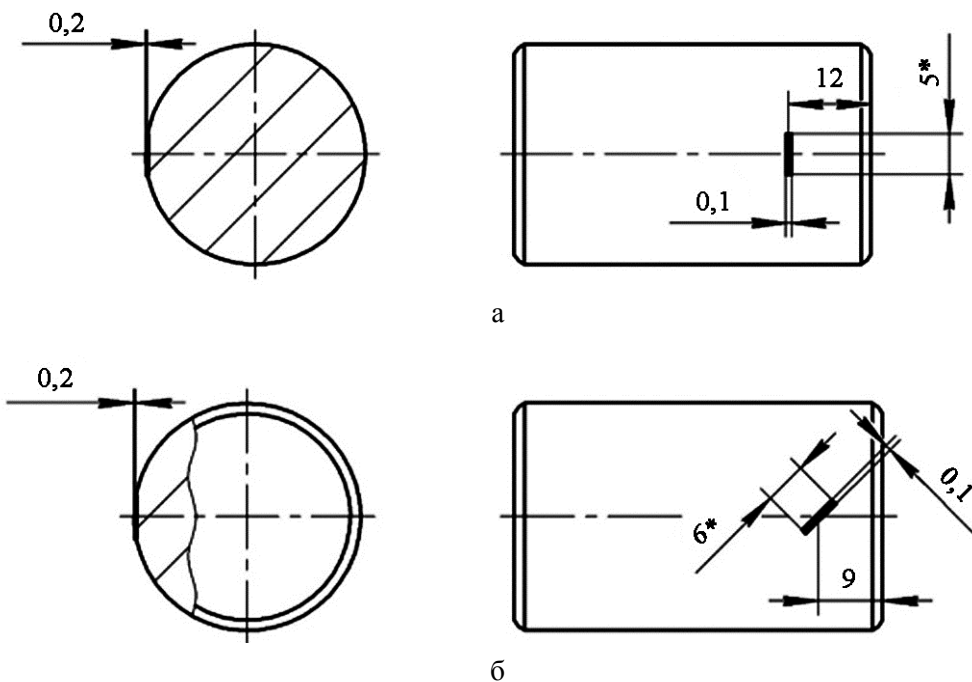


Рис. 3. Контрольные ролики с перпендикулярной к оси ролика (а) и наклонной (б) прорезями переменной глубины

Наиболее приемлем для калибровки автомата по чувствительности к дефектам контрольный образец с прорезью, наклонной к оси ролика, т. к. наклонные прорези выявляются хуже, чем осевые.

На рис. 4 показана сканограмма ролика. Длина окружности ролика составляет 100,5 мм, длина сканируемого участка цилиндрической поверхности по оси ролика – 13 мм.

Длина сканограммы соответствует длине окружности, высота сканограммы – длине сканируемого участка цилиндрической поверхности. Прямые измерения длины выявляемой части прорези на сканограмме с учетом пропорций сканограммы дают результат 6 мм, т. е. прорезь выявляется по всей длине.

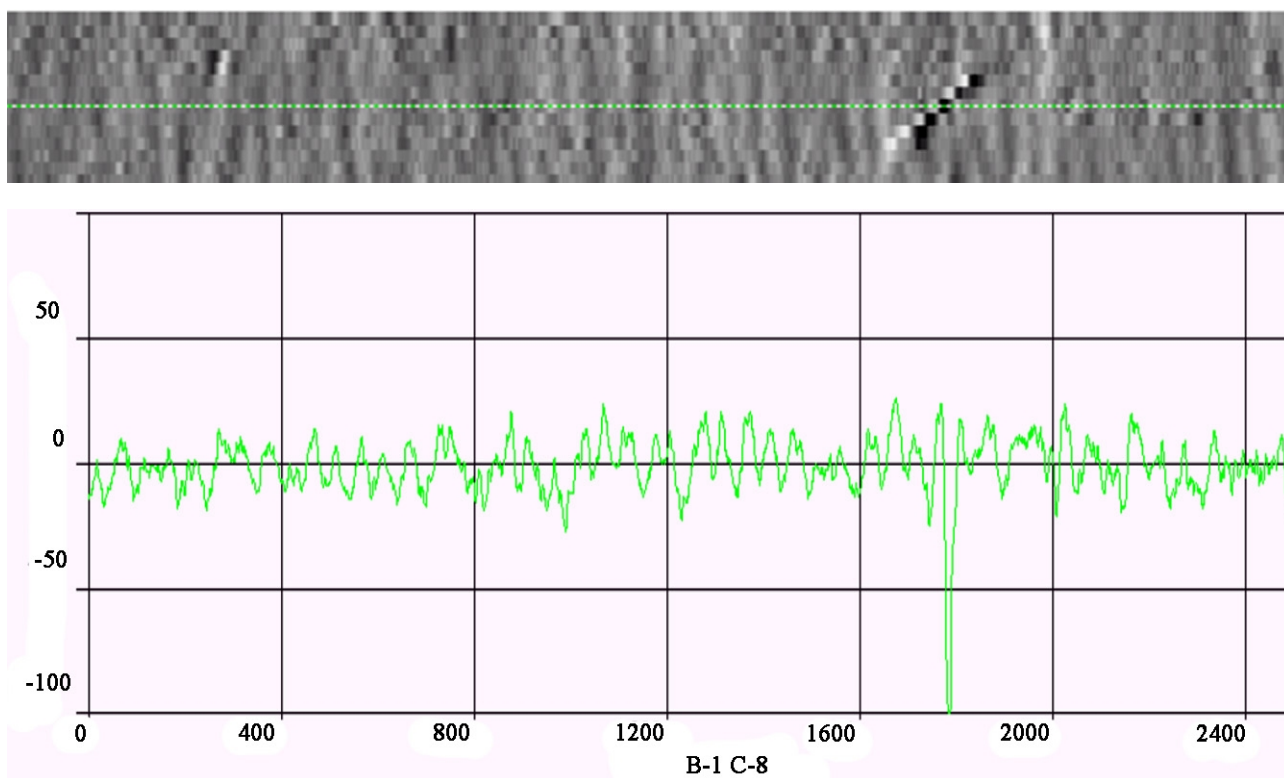


Рис. 4. Сканограмма ролика с прорезью, наклонной к оси

Как видно из графика, величина сигнала в середине дефекта для данного контрольного образца составляет 100 условных единиц.

Метрологическая прослеживаемость результатов измерений обеспечена тем, что автомат включен в Федеральный реестр средств измерения и проходит процедуру поверки с применением мер с искусственными дефектами, также включенными в реестр. Контрольный образец измеряется на автомате непосредственно после калибровки автомата по сертифицированным мерам [8].

Заключение

Аттестованный на поверенном автомате контрольный образец с наклонной к оси прорезью может применяться для регулярного использования при эксплуатации автоматов. При настройке и калибровке автомата должна использоваться информация о выявлении прорези по всей длине и информация о величине сигнала в середине длины прорези.

Применение автоматизированных вихретоковых методов контроля деталей подшипников, обеспечивающее повышение качество и эксплуатационной надежности продукции, способствует внедрению новых эффективных технологических процессов и дает производству экономические преимущества, необходимые для широкого применения подшипниковой продукции в ОАО «РЖД» и других отраслях, а также для поставок на европейский рынок.

Список источников

1. Федосеенко Ю.К., Шкатов П.Н., Ефимов А.Г. Вихретоковый контроль. Москва: Изд. дом «Спектр», 2014. 224 с.
2. Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля. Москва: Изд. дом «Спектр», 2014. 288 с.
3. Игнатъев С.А., Горбунов В.В., Игнатъев А.А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции. Саратов: СГТУ, 2023. 240 с.
4. Игнатъев А.А., Чистяков А.М., Горбунов В.В. Автоматизированная вихретоковая дефектоскопия деталей подшипников // СТИН. 2002. № 4. С. 17-19.
5. Бабаджанов Л.С., Бабаджанова М.Л. Меры и образцы в области неразрушающего контроля. Москва: Стандартиформ, 2007. 160 с.
6. Тяпаев С.В., Снитко Н.Г. Реализация сплошного неразрушающего контроля бездефектности поверхностного слоя деталей в производстве буксовых подшипников для подвижного железнодорожного состава // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 1. С. 35-40.
7. Горбунов В.В., Карпеев А.М., Игнатъев А.А. Автоматизированный вихретоковый контроль роликов буксовых подшипников // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 3 (94). С. 19-30.
8. Метрологическое обеспечение автоматизированного вихретокового контроля деталей подшипников / Л.С. Бабаджанов, М.Л. Бабаджанова, В.В. Горбунов, Т.А. Корюшкина, С.В. Тяпаев // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 1 (92). С. 12-18.

Сведения об авторах

Горбунов Владимир Владимирович –
кандидат технических наук, главный
конструктор ООО «Реновация»,
г. Санкт-Петербург

Vladimir V. Gorbunov –
PhD (Technical Sciences),
Chief Designer of Renovation LLC,
St. Petersburg

Сигитов Евгений Александрович –
кандидат технических наук, директор
АО «НПК прецизионного оборудования»,
г. Саратов

Evgeny A. Sigitov –
PhD (Technical Sciences),
Director of JSC NPK
Precision Engineering, Saratov

Статья поступила в редакцию 02.12.2023, принята к опубликованию 08.12.2023

М.А. Игнатьев

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ВИХРЕТОКОВОГО
КОНТРОЛЯ КАК ЭЛЕМЕНТ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО
ПРОСТРАНСТВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

Аннотация. Описывается структура единого информационного пространства машиностроительного предприятия. Рассматривается возможность интеграции вихретокового контроля поверхности деталей подшипников в производственную информационную систему.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, детали подшипников, единое информационное пространство, дефекты поверхности качения, мониторинг

M.A. Ignatiev

**AUTOMATED EDDY CURRENT CONTROL SYSTEM
AS AN ELEMENT OF A UNIFIED INFORMATION SPACE
OF A MACHINE-BUILDING ENTERPRISE**

Abstract. The structure of a unified information space of a machine-building enterprise is described. A possibility for integration of eddy current control of the surface of the bearing parts into the production information system is considered.

Keywords: eddy current control, bearing parts, unified information space, rolling surface defects, monitoring

Введение

В современном производстве одним из ключевых элементов оптимизации управленческих процессов являются информационные технологии [1]. В условиях быстрого развития цифровой экономики создание единого информационного пространства становится неотъемлемым компонентом повышения конкурентоспособности предприятия. Единое информационное пространство представляет собой комплексную систему, объединяющую различные информационные ресурсы и средства связи на предприятии, его основная цель состоит в обеспечении межфункциональной

интеграции различных подразделений и процессов, а также оптимизации операций по сбору, хранению, анализу и передаче информации внутри организации. В настоящий момент сетевая инфраструктура и технологии обработки больших данных стали важными инструментами для успешного функционирования предприятия. Единое информационное пространство позволяет рационализировать процессы работы, повысить оперативность принятия решений и снизить издержки на обработку информации. Также оно способствует улучшению коммуникаций и снижению вероятности ошибок в рабочих процессах [2-4].

Система вихретокового контроля деталей подшипников в едином информационном пространстве предприятия

В настоящее время на промышленных предприятиях большое внимание уделяется цифровизации производства, информационные системы отдельных элементов объединяются в единое информационное пространство, позволяющее осуществлять комплексный подход к контролю и управлению технологическими процессами [3, 4].

На рис. 1 представлен пример реализации единого информационного пространства на машиностроительном предприятии.

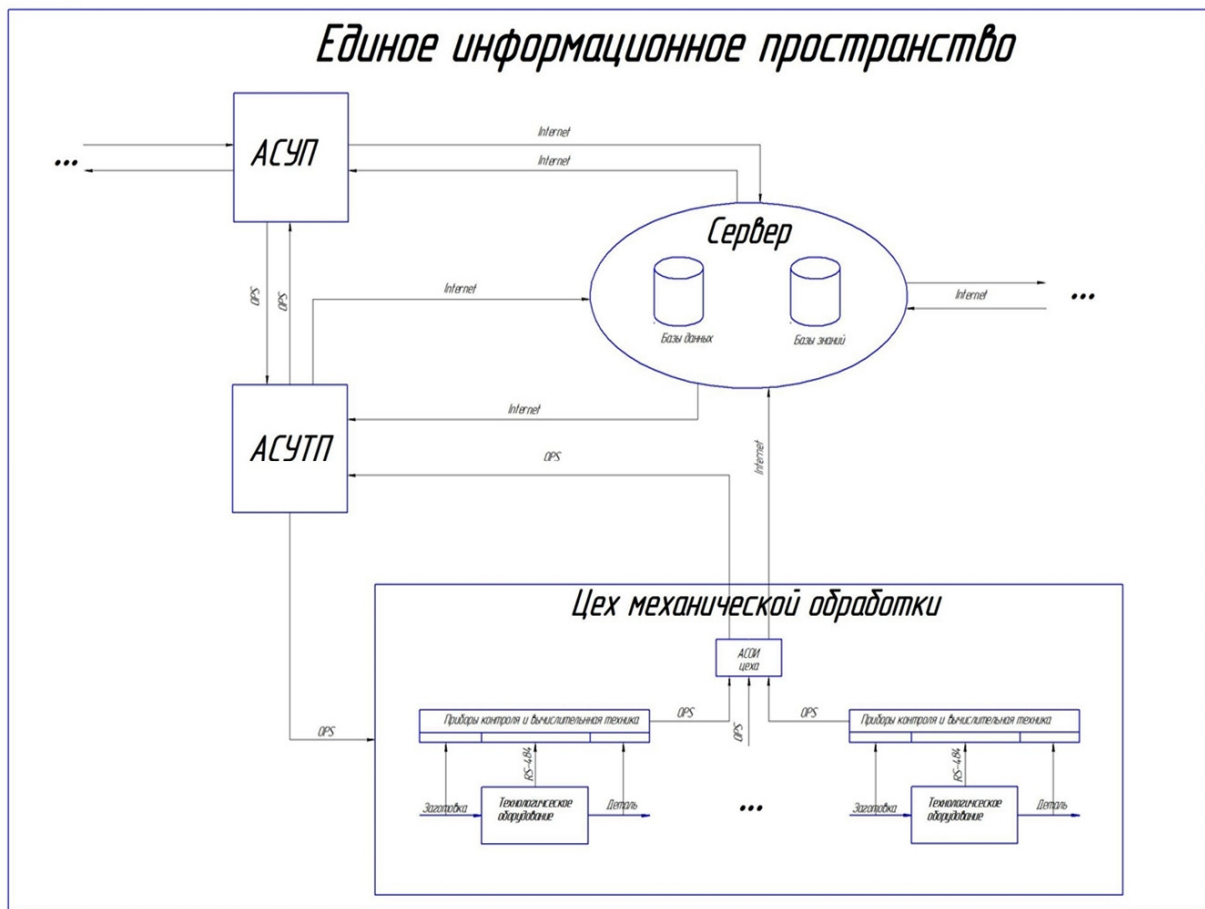


Рис. 1. Схема единого информационного пространства машиностроительного предприятия

Информационные технологии и телекоммуникации

В качестве одного из основных элементов подобной системы может выступать автоматизированная система обработки информации (АСОИ) цеха, где данные с приборов контроля изделий и технологического оборудования агрегируются и обрабатываются по заранее определенным алгоритмам, затем информация передается на сервер предприятия и в автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУТП), там информация анализируется и переходит в автоматизированную систему управления предприятием (АСУП), откуда в обратном направлении поступает управляющее воздействие, АСУТП, в свою очередь, управляет цехом, в качестве управляющего сигнала может выступать замена, ремонт оборудования, корректировка технологического процесса и т. п. Также все основные элементы связаны прямой и обратной связью с сервером предприятия, где хранятся базы данных и знаний. В качестве интерфейсов связи могут использоваться Ethernet, RS-485, SFP, а также внутренняя сеть Internet в зависимости от особенностей оборудования и типа передаваемой информации.

Таким образом, для оптимального управления различными уровнями производства необходимо обеспечить своевременный и достоверный сбор данных непосредственно при осуществлении технологического процесса, а также осуществлять непрерывный контроль оборудования и выпускаемых изделий. Для решения этих задач на предприятиях в настоящий момент активно внедряются системы мониторинга технологических процессов (СМТП) [5-7]. Особенно это важно при производстве высокоточных изделий машино- и приборостроения, к которым относятся детали подшипников, используемые в транспортной, авиационной, сельскохозяйственной и других отраслях промышленности.

Основными элементами СМТП на подшипниковом предприятии, как правило, являются две подсистемы: обеспечивающая контроль за технологическим оборудованием (может быть реализована, например, при помощи аппаратно-программных комплексов, которые позволяют получать информацию о динамическом состоянии станков в режиме реального времени [8]) и контролирующая качество выпускаемых изделий [7].

Как правило, годность деталей подшипников на производстве определяется по двум критериям: соответствие заданным геометрическим размерам, отсутствие дефектов поверхностного слоя детали. Контроль за соблюдением первого критерия достигается при помощи различных измерительных средств, таких как координатно-измерительные машины, микрометры и др. Для обнаружения дефектов поверхности применяются различные специальные методы. Идентификация типа найденного дефекта позволяет также определить причину его образования, что, в свою очередь, дает возможность скорректировать технологический процесс [5-7].

Для выявления брака поверхности на подшипниковых предприятиях могут использоваться ряд специальных методов неразрушающего контроля: визуальный осмотр, капилляр-

ный метод, травление, виброконтроль, ультразвуковой метод, вихретоковый контроль, магнитопорошковый метод. Одним из наиболее производительных способов неразрушающего контроля и обнаружения дефектов поверхности является вихретоковый метод, который позволяет производить контроль около 15 деталей (в зависимости от размеров). При помощи вихретокового метода контроля можно распознавать такие виды дефектов поверхности как: трещины, включения, забоины, прижоги, натиры и ряд других [5-7].

Вихретоковый контроль основан на физическом законе электромагнитной индукции. Катушка индуктивности вихретокового преобразователя (ВТП), создает электромагнитное поле, под действием которого в электропроводящем объекте контроля наводятся вихревые токи, созданные вихревые токи, в свою очередь, порождают собственное электромагнитное поле, которое оказывает влияние на ВТП.

Практические исследования показывают, что в области неоднородности поверхности изменяются ее электромагнитные характеристики, поэтому вихревые токи имеют разные распределения и интенсивности в бездефектной и дефектной областях поверхностного слоя [9-11].

Существуют два электротехнических метода оценивания взаимодействия вторичного магнитного поля и ВТП: по изменению полного сопротивления катушки, генерирующей первичное поле; по изменению напряжения дополнительной (измерительной катушки). В общем случае данные методы могут быть связаны через закон Ома, но благодаря возможности подбора взаимного расположения генерирующей и измерительной катушек второй метод считается более точным [9-11].

На рис. 2 показаны результаты практических исследований изменений активного и реактивного сопротивления генерирующей катушки при изменении свойств материала или параметров контроля, где траектории 1 и 2 – увеличение и уменьшение электропроводности материала (может быть связано с наличием примесей в материале), 3 – изменение расстояния от ВТП до объекта контроля (или дефект, например, срез), 4 – изменение относительной проницаемости ферромагнитного материала (может быть связано с качеством термообработки поверхности), 5 и 6 – поверхностные и подповерхностные разрывы материалы (трещины, волосовины). Изменение других электромагнитных свойств поверхности объекта контроля также влияет на вихревые токи, и соответственно, на полное сопротивление катушки индуктивности ВТП [9-11].

Таким образом, основываясь на законах физики, электротехники и практических исследованиях, можно сделать вывод, что вихретоковый метод контроля позволяет не только обнаруживать дефект на поверхности детали, но и определять тип этого дефекта путем сравнения характеристик вихретокового сигнала с эталонными признаками различных неоднородностей. Также величина изменения сопротивления (или напряжения)

катушки ВТП коррелирует со степенью деформации поверхности контролируемого изделия, что позволяет определять глубину проникновения и другие геометрические характеристики дефекта [7, 12].

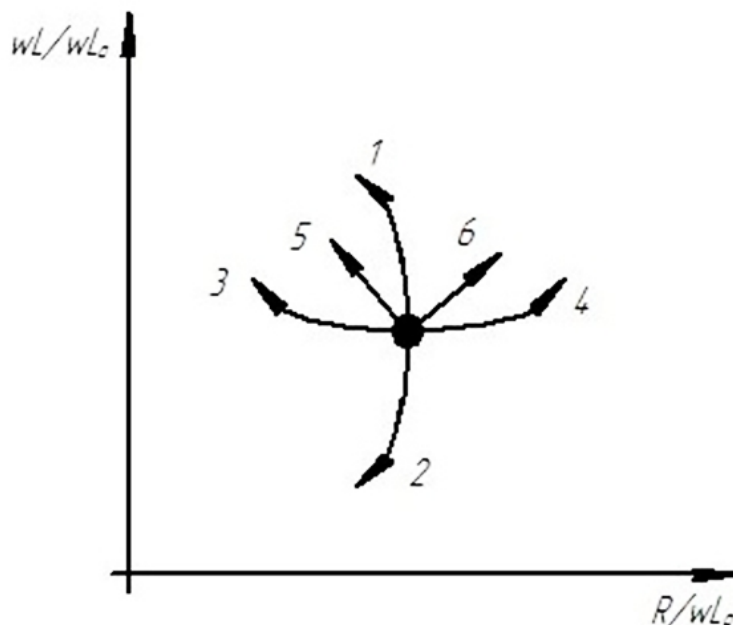


Рис. 2. Траектории изменения активного и реактивного сопротивления катушки индуктивности ВТП в зависимости от изменения параметров контроля и материала изделия

Для осуществления вихретокового контроля создаются специальные измерительные приборы и автоматы. Существует ряд зарубежных фирм, таких как Zetec (США), Rohmann GmbH (Германия), CMS (Франция), Raunag (Южная Корея), IDEA (Китай) и другие, которые специализируются на производстве вихретоковых приборов различного назначения. Среди российских компаний следует отметить такие предприятия, как НПП «Промприбор», НПК «Луч», ООО «Главдиагностика», «НПП Подшипник-СТОМА» и другие [7, 9-11].

С точки зрения интеграции системы вихретокового контроля в единое информационное пространство предприятия одним из наиболее перспективных приборов является ПВК-К2М (внесен в Государственный реестр средств измерений, № 26079-03), т. к. основным вычислительным элементом данного аппарата является персональный компьютер, что также позволяет использовать программное обеспечение различной сложности. Еще одним преимуществом ПВК-К2М является наличие трехкоординатного манипулятора, это дает возможность использовать один тип приборов для контроля качества поверхности деталей со сложной геометрической конфигурацией и разными размерами [6, 7, 12].

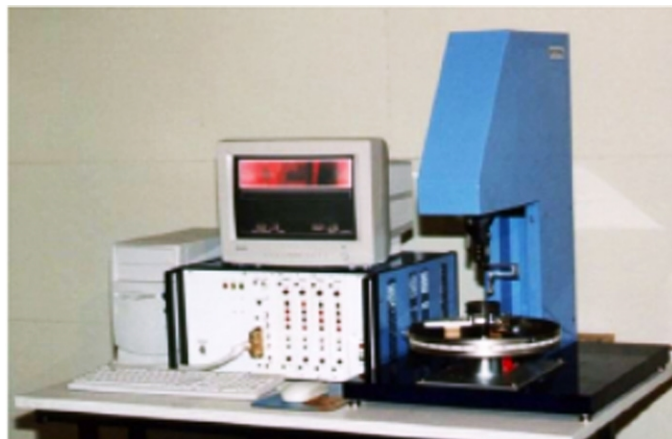


Рис. 3. Прибор вихретокового контроля ПВК-К2М

Результатом сканирования детали прибором ПВК-К2М является файл, содержащий большое количество цифровых значений (около 30000), которые характеризуют состояние поверхности в каждой точке контроля. Также данный прибор позволяет получать выходной сигнал отдельно по амплитудной и фазовой составляющим.

Для распознавания дефектов по сигналу ВТП разрабатываются документо-классификаторы, позволяющие оператору сравнивать получаемый сигнал и эталонный вид сигнала с дефектом. Для снижения влияния человеческого фактора и повышения эффективности определения неоднородностей, а также для создания единой информационной системы появилась потребность в разработке программного обеспечения для автоматизированной идентификации типа дефекта, это стало возможно с развитием цифровой техники и методов анализа данных.

Разработка алгоритма распознавания дефектов по цифровому сигналу ВТП предполагает определение характерных признаков вихретокового образа, который содержит тот или иной дефект, и создание модели классификации анализируемого сигнала [7, 12].

Использование баз данных и знаний в составе единого информационного пространства подшипникового предприятия позволяет эффективно хранить вихретоковые образы, признаки дефектов, модели принятия решений, собирать и использовать статистику для оптимизации технологических и производственных процессов.

Заключение

Таким образом, для оптимального и эффективного управления производством на машино- и приборостроительных предприятиях активно используются единые информационные пространства для оптимального и оперативного управления технологическим процессом. Это накладывает повышенные требования к обеспечению неразрушающего контроля. Вихретоковый контроль является одним из наиболее перспективных с точки зрения автоматизации и интеграции в информационную систему предприятия.

Список источников

1. Индустриев М.А., Игнатьев М.А. Автоматизация управленческих решений как новый фактор повышения эффективности менеджмента организации // Гуманитарный научный журнал. 2020. № 1. С. 68-76.
2. Гордиенко Е.П. Интеграция информационных систем в рамках единого информационного пространства предприятия // Транспорт: наука, образование, производство. Воронеж. 2020. С. 62-65.
3. Самойлова Е.М. Единое информационное пространство как ядро CALS-технологии // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сборник научных трудов XIII Международной научно-практической конференции. Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2018. С. 168-170.
4. Самойлова Е.М. Системный интегрированный подход к управлению качеством продукции на основе интеллектуализации мониторинга в едином информационном пространстве // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2017. Т. 19, № 2. С. 179-195.
5. Игнатьев А.А., Горбунов В.В., Игнатьев С.А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции. Саратов: СГТУ, 2009. 160 с.
6. Игнатьев А.А., Добряков В.А., Игнатьев С.А. Автоматизированный контроль в системе управления качеством изготовления деталей подшипников // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 1 (84). С. 14-25.
7. Игнатьев А.А., Шумарова О.С., Игнатьев С.А. Распознавание дефектов поверхностей качения колец подшипников при автоматизированном вихретоковом контроле с применением вейвлет-преобразований. Саратов: СГТУ, 2017. 108 с.
8. Игнатьев А.А., Коновалов В.В., Игнатьев С.А. Идентификация в динамике станков с использованием стохастических методов. Саратов: СГТУ, 2014. 92 с.
9. Герасимов В.Г., Ключев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля. Москва: Спектр, 2010. 256 с.
10. Федосенко Ю.К., Шкатов П.Н., Ефимов А.Г. Вихретоковый контроль. Москва: Спектр, 2014. 224 с.
11. Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля. Москва: Спектр, 2014. 288 с.

12. Игнатъев А.А., Игнатъев М.А. Методы идентификации дефектов шлифованных деталей подшипников при автоматизированном вихретоковом контроле с применением интеллектуальных технологий // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 1 (92). С. 19-35.

Сведения об авторе

Игнатъев Максим Алексеевич –
аспирант кафедры «Техническая механика
и мехатроника» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Maxim A. Ignatiev –
Postgraduate student, Department
of Technical Mechanics and
Mechatronics, Yuri Gagarin State
Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 29.11.2023, принята к опубликованию 12.12.2023

Д.В. Молчанов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРУЖНОГО ДАТЧИКА КОНЦЕНТРАЦИИ
ПРОМЕЖУТОЧНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДОГРЕВАТЕЛЕМ ГАЗА**

Аннотация. Данная статья посвящена математическому описанию физических факторов, влияющих на создание погружного датчика концентрации промежуточного теплоносителя, который способен отслеживать зависимость теплопередачи от концентрации вещества. Результаты исследования могут быть полезными для разработки новых методов измерения концентрации вещества в различных средах.

Ключевые слова: подогреватель газа, теплоноситель, концентрация, плотность, частота, температура, амплитуда

D.V. Molchanov

**MODELING AN IMMERSION SENSOR
OF INTERMEDIATE COOLANT
FOR AUTOMATED CONTROL OF GAS HEATERS**

Abstract. This article is devoted to mathematical description of the physical factors affecting creation of an immersion sensor of intermediate coolant concentration, which can be applied to monitor dependence of heat transfer on the concentration of a substance. The results of the study may can be used in the development of new methods for measuring substance concentration in various media.

Keywords: gas heater, coolant, concentration, density, frequency, temperature, amplitude

Введение

Моделирование погружного датчика концентрации промежуточного теплоносителя необходимо для того, чтобы понять его поведение в различных условиях и обеспечить точность измерений. Математическая модель позволяет учесть различные параметры, влияющие на работу датчика, такие как температура, давление, частота и амплитуда. Это позволит

оптимизировать процесс контроля и управления технологическими процессами, а также повысить эффективность работы оборудования. Математическая модель позволяет проводить анализ работы датчика в реальном времени, что помогает оперативно выявлять возможные проблемы или отклонения в работе оборудования.

Датчики концентрации промежуточного теплоносителя могут быть установлены в подогревателях газа для контроля и оптимизации процесса подогрева. Путем измерения концентрации теплоносителя в подогревателях можно обеспечить оптимальные условия подогрева газа, что позволит повысить эффективность работы оборудования и снизить энергопотребление. Установка датчиков концентрации в подогревателях газа с использованием математической модели позволяет контролировать и управлять процессом подогрева с высокой точностью и надежностью. Коэффициент теплопередачи зависит от концентрации промежуточного теплоносителя в подогревателях газа. При изменении концентрации теплоносителя, меняется его теплопроводность и вязкость, что влияет на эффективность теплообмена между теплоносителем и газом.

Для изучения свойств промежуточного теплоносителя, в том числе определения концентрации, существуют несколько вариантов, основанных на разных физических законах. Например, с помощью рефракции можно изучать оптические свойства теплоносителя, такие как его преломляющая способность и показатель преломления с помощью рефрактометра [1]. Также можно использовать закон Архимеда для измерения плотности теплоносителя и его взаимодействия с другими веществами с помощью ареометра [2, 3]. Данные устройства имеют ряд своих преимуществ, но применение их в подогревателях газа не рекомендуется из-за сложной конструкции и большой вероятности ошибочных показаний, связанных с теплотехническим процессом, проходящим внутри подогревателя газа.

Целью статьи является математическое моделирование датчика концентрации теплоносителя для определения влияния концентрации вещества на теплопередачу внутри подогревателя газа для корректировки системы автоматического управления подогревом.

Концентрация вещества

Концентрация вещества, она же молярная концентрация, вычисляется по формуле [4]

$$\omega_B = \frac{m_B}{m} * 100 \%, \quad (1)$$

где m_B – масса растворенного вещества; m – масса раствора.

Масса раствора вычисляется по формуле [4]

$$m = \rho * V, \quad (2)$$

где ρ – плотность раствора, г/мл; V – объем раствора, мл.

Если выражать массу раствора через его плотность и объем, формула примет вид [4]

$$\omega_B = \frac{m_B}{\rho * V} * 100 \%. \quad (3)$$

В итоге для того чтобы определить концентрацию вещества, необходимо узнать плотность вещества, так как объем нам известен.

Определение плотности вещества

Для того чтобы определить плотность вещества, было принято решение применить погружной датчик измерения плотности на основе вибрационного метода.

Вибрационный метод основан на изменении амплитуды вынужденных колебаний тела, погруженного в контролируемую среду, в зависимости от вязкости этой среды.

Вибрационный плотномер – прибор, предназначенный для преобразования значения плотности контролируемой среды в аналоговый электрический сигнал для передачи его в систему телеметрии или автоматики и отображения значения плотности на цифровом табло.

Основным элементом частотных преобразователей является колебательный контур или частотно-зависимая цепь с параметрами, определяемыми контролируемой величиной. Существуют измерители с электромагнитными и механическими резонаторами, причем последние более перспективны для точного измерения различных параметров. Это объясняется тем, что добротность механических колебательных систем значительно превосходит аналогичный параметр электромагнитных контуров. Так, если добротность последних составляет 10-200, то добротность механических резонаторов находится в пределах от нескольких сотен до нескольких десятков и даже сотен тысяч. В общем случае частотно-зависимые элементы можно использовать в режиме их свободных или вынужденных колебаний, однако подавляющее число преобразователей имеют автоколебательный режим работы.

Принцип построения частотного преобразователя на базе механического резонатора заключается в том, что контролируемый параметр, воздействуя на жесткость или массу системы, изменяет частоту ее колебаний. В качестве приемников и возбуждателей колебаний используют различные электрические или пневматические преобразователи. Из числа электрических преобразователей, получивших наибольшее распространение, можно назвать электростатические, пьезоэлектрические, магнитострикционные, тензометрические, электромагнитные и магнитоэлектрические. Поскольку большинство этих преобразователей обратимы, часто и возбуждатель, и приемник колебаний выполняются в виде одинаковых преобразователей [5].

В настоящее время вибрационно-частотные преобразователи с механическими резонаторами получили распространение для измерения механических величин, параметров упругих элементов, давления и разности давлений, температуры, вязкости жидкостей.

Все частотные преобразователи классифицируют по механизму действия и типу физической системы, преобразующей контролируемую величину в частотный сигнал. По механизму действия вибрационные плотномеры относятся к резонаторным преобразователям, а по типу физической системы – к механическим.

По числу степеней свободы все колебательные системы подразделяются на системы с сосредоточенными и распределенными параметрами, первые из которых представляют собой соединение элементов, сосредоточивающих в себе один из основных параметров: упругость и инерционность, причем изменение одного из них может происходить независимо от другого. Такие системы имеют одну степень свободы и одну резонансную частоту при фиксированных значениях параметров элементов. Для системы с распределенными параметрами характерно то, что каждый ее элемент в равной степени обладает упругостью и инерционностью. Оба эти параметра распределены по всей системе так, что изменение одного из них вызывает изменение другого. Такие системы имеют много степеней свободы и, соответственно, много резонансов. Добротность механической системы с распределенными параметрами обычно на 1-2 порядка выше добротности системы с сосредоточенными параметрами в сопоставимых размерах, что позволяет считать преобразователи с распределенными параметрами колебательных систем наиболее перспективными, обеспечивающими более высокую точность измерения.

Преобразователи с автоколебательным режимом работы резонаторов в большинстве случаев просты по устройству и характеризуются высокой точностью, поэтому именно автоколебательные системы наиболее предпочтительны для вибрационных плотномеров. Такие устройства напоминают схему электронного автогенератора с той лишь разницей, что связь между выходом и входом генератора существует только во время колебаний механического резонатора, таким образом, последний является не только колебательным контуром, но и элементом обратной связи для строго определенной частоты [2].

Разработка принципиальной схемы измерительного устройства погружного плотномера

Принципиальная схема погружного вибрационного плотномера показана на рис. 1. Чувствительный элемент состоит из лопатки 19, укрепленной на конце упругого стержня 20, второй конец которого установлен в отверстие днища 21 корпуса 5. В корпусе установлены также системы возбуждения 3 и съема 2 колебаний, обеспечивающие колебания стержня в двух плоскостях. Система возбуждения и съема включены в цепь усилителей по схеме автогенератора. Выходы усилителей подключены к входам смесителя частот,

выход которого через низкочастотный фильтр подключен к частотомеру. Стержень выполнен с нечетным числом слоев, например тремя, причем крайние слои изготовлены из материала с температурным коэффициентом линейного расширения, отличным от температурного коэффициента линейного расширения материала центрального слоя. Сечение стержня симметрично оси O1 O1 и относительно оси O2 O2, лежащих в плоскостях колебаний стержня [5].

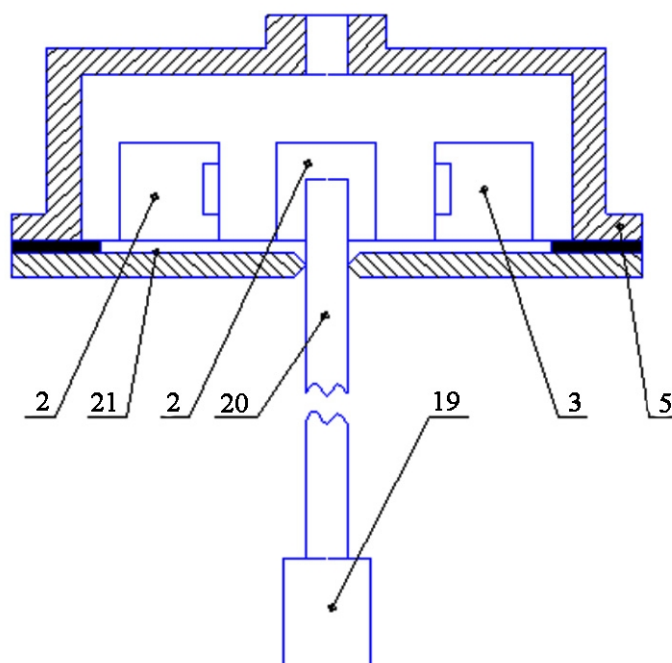


Рис. 1. Принципиальная схема погружного вибрационного плотномера

Плотномер работает следующим образом. Стержень 20 вместе с лопаткой 19 приводится в режим автоколебаний с частотами f_1 относительно оси O1 O1, и f_2 относительно оси O2 O2, для чего потери колебательной энергии стержня восполняются через цепи элементов 2 и 3. Сумма и разность частот f_1 и f_2 , образуются на выходе смесителя, а в низкочастотном фильтре выделяется разность частот $f_1 - f_2$, которая не зависит от температуры стержня, а определяется только присоединенной массой жидкости к стержню, однозначно связываемой ее с плотностью.

Исследования характеристик плотномера

Как описывалось ранее, характеристики вибрационного погружного плотномера зависят от частоты и амплитуды цилиндрического резонатора в жидкости.

Частота вычисляется по формуле

$$f = \frac{a_1}{l^2} * \sqrt{\frac{D}{m_0 + m_{np}}} * \sqrt{1 + \frac{l^2}{4\pi^2 a_1^2 D} (\pi^2 N_z + 4k_l^2 N_s)}. \quad (4)$$

Амплитуда вычисляется по формуле

$$A = \frac{k_l G}{\pi^2 l^2 \left[\frac{\varphi D}{2l^4 \pi} (\pi^2 + 4k_l^2)^2 + \omega r_M \right]} \quad (5)$$

Изменения температуры контролируемой среды приводят к наиболее существенным погрешностям измерения плотности вибрационными плотномерами. Так, например, у преобразователей, резонаторы которых изготовлены из нержавеющей стали X18H10T, чувствительность к температуре может даже превышать чувствительность к основному контролируемому параметру – плотности. Поэтому температурная коррекция показаний вибрационных плотномеров является обязательным условием их работы. Температурная погрешность (температурная поправка к показаниям) зависит от режима работы плотномера и определяется следующими равенствами:

$$\Delta_{p(\theta)} = - \left[p(\theta)(a_E + 2a_l) + \frac{1}{a_0}(a_E - a_l) \right] (\theta - \theta_0), \quad (6)$$

где $p(\theta)$ – действительное значение плотности при данной температуре θ ; a_E – коэффициент термоупругости; a_l – коэффициент линейного расширения.

Наиболее распространенным способом устранения температурной погрешности измерения, который широко используется в отечественных и зарубежных вибрационных плотномерах, является способ термокомпенсации, основанный на вычитании из общего выходного сигнала преобразователя некоторой его части, приходящейся на температурную составляющую.

В простейшем случае такое вычитание производится в аналоговой форме с использованием сигнала цепи содержащей терморезистор в качестве чувствительного элемента. При этом выходной сигнал резонатора, воспринимающего плотность контролируемой среды, должен быть также преобразован в амплитудную форму. В качестве термопреобразователей применяют терморезисторы (металлические или полупроводниковые), приводимые в тепловой контакт с контролируемой средой.

Погружные первичные измерительные преобразователи будут монтироваться в подогревателе газа, где резонатор будет окружен стенками. В этом случае весьма важным является вопрос о влиянии степени удаленности стенок подогревателя на параметры колеблющегося резонатора.

Относительная толщина «присоединенного слоя» зависит от геометрических параметров подогревателя, в котором находится резонатор [5].

Экспериментальное значение «присоединенной массы» жидкости можно определить по относительной толщине «присоединенного слоя» (по коэффициенту K_p)

$$m_{пр} = \rho a K_p, \quad (7)$$

где ρ – плотность контролируемой жидкости; a – радиус срединной поверхности цилиндра.

На основе проведенного анализа построена функциональная схема концентратора промежуточного теплоносителя, представленная на рис. 2.

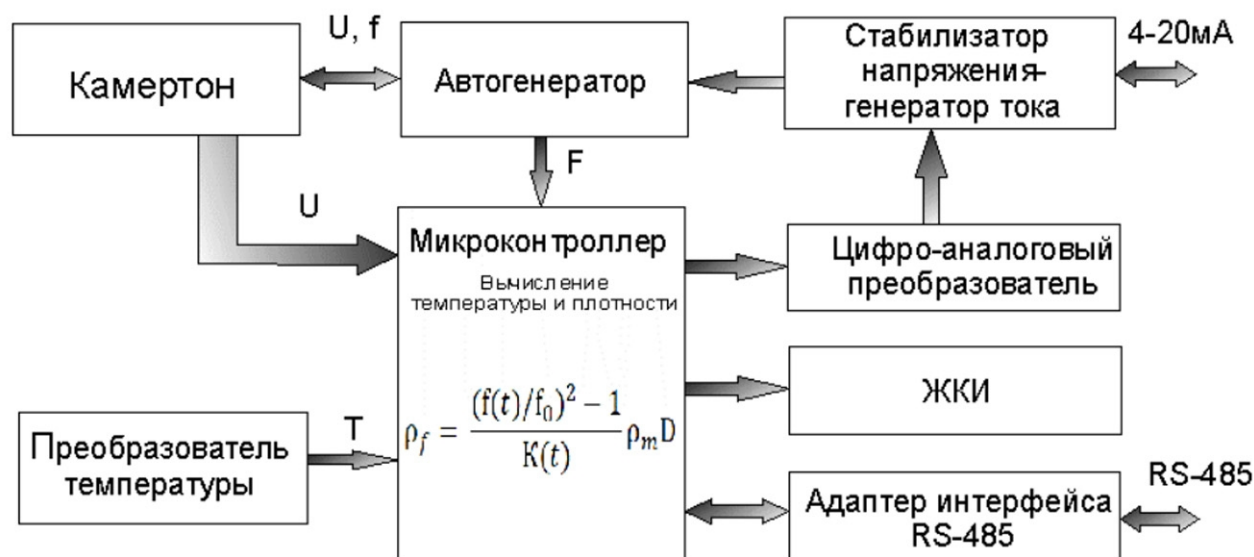


Рис. 2. Функциональная схема погружного датчика концентрации [6]

Заключение

Таким образом, используя описанные факторы, влияющие на математическую модель датчика, была создана электронная блок-схема концентратора промежуточного теплоносителя, которая позволит оценить зависимость передачи тепла от жаровых труб к U-образному теплообменнику в зависимости от концентрации промежуточного теплоносителя, что приведет к повышению КПД подогревателя газа за счет корректировки системы управления подогревом.

Список источников

1. Молчанов Д.В. Внедрение интеллектуального погружного рефрактометра в систему автоматического управления подогревателя газа // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2023. № 1 (96). С. 21-30.
2. Молчанов Д.В. Применение интеллектуального погружного ареометра на основе торсионного трубчатого датчика // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2023. С. 81-86.

3. Молчанов Д.В. Структурный анализ и принцип работы интеллектуального погружного ареометра и возможность его интеграции в систему автоматического управления подогревателем газа // Матрица научного познания: научный электронный журнал. 2023. № 1-1. С. 70-74.

4. Общая химия: методические указания к выполнению контрольных заданий / В.В. Васильев., А.В. Кольчугин, В.Р. Ополовников, Г.М. Прияткин. Иваново: Ивановский государственный политехнический университет, 2014. 56 с.

5. Вибрационный плотномер: учебные материалы. URL: <https://works.doklad.ru/view/C1-x-kdp3R4/all.html> (дата обращения 10.10.2023).

6. Зацерклянный О.В. Вибрационные плотномеры газов и жидкостей для продукции газоконденсатных скважин. URL: <https://sensandsys.ru/files/VibratingDensimeters2011.pdf> (дата обращения 15.11.2023).

Сведения об авторе

Молчанов Дмитрий Вадимович – аспирант кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Dmitry V. Molchanov – Postgraduate student, Department of Technical Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 11.11.2023, принята к опубликованию 04.12.2023

С.В. Терехов

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАФУНКЦИЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЯВЛЕНИЙ И ПРОЦЕССОВ В СИНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Аннотация. Продемонстрировано применение гиперкомплексного исчисления для получения физических законов, а также для описания стационарных состояний синергетической системы. В термодинамическом гиперпространстве получены соотношения, определяющие энтропию неравновесного состояния, ее производство, наличие особых точек. Предложен критерий различия между слабо- и сильнонеравновесными состояниями. Указано на существование в гиперпространстве нескольких типов особых точек, приближение синергетической системы к которым переводит ее в стационарное состояние.

Ключевые слова: синергетическая система, гиперкомплексное исчисление, энтропия, стационарное состояние

S.V. Terekhov

APPLICATION OF PARAFFUNCTIONS TO DESCRIBE THE PHENOMENA AND PROCESSES OF A SYNERGETIC SYSTEM

Abstract. Application of a hypercomplex calculus to identify the physical laws and describe the stationary states of a synergetic system is demonstrated. In a thermodynamic hyperspace, the relations which determine the entropy of a nonequilibrium state, its production, and presence of specific points have been determined. A criterion for distinction between weakly and strongly nonequilibrium systems is proposed. Existence of several types of specific points in the hyperspace is indicated; moving a synergetic system to these points brings the system to a stationary state.

Keywords: synergetic system, hypercomplex calculus, entropy, stationary state

Введение. Исследования поведения открытых систем проводятся в рамках равновесной термодинамики, теории необратимых процессов, синергетики, химической кинетики и др. [1-5]. В современных теориях предпринимаются попытки моделирования малых и больших отклонений открытой системы от положения термодинамического равновесия,

возникновения стационарных состояний и колебаний, образования волн, а также диссипативных и иерархических структур на субстанциональном уровне. В этой связи целью данной работы является применение гиперкомплексного исчисления для описания явлений и необратимых процессов в сложной системе.

Представление конденсированной среды в виде термодинамической системы позволяет при пренебрежении энергетического вклада поверхности объекта и других внешних воздействий записать выражение для дифференциала энтропии S в виде [6, с. 115]:

$$T dS = dU + P dV - \sum_{i=1}^k \mu_i dN_i, \quad (1)$$

где T – абсолютная температура, U – внутренняя энергия, P – давление, V – объем системы, μ_i – химический потенциал частиц сорта i ($i = 1, 2, \dots, k$), k – число компонентов, N_i – число частиц сорта i . Система называется изолированной от окружающей среды, если она не обменивается с ней энергией ($dU = 0$), частицами ($dN_i = 0$), сохраняет ($dV = 0$, $dS = 0$) или изменяет объем ($dV \neq 0$, $dS > 0$). Закрытая система отдает и принимает только энергию ($dU \neq 0$), а открытая система дополнительно обменивается с соседними областями еще и частицами ($dN_i \neq 0$). Если при этом изменяется объем системы ($dV \neq 0$), то будем говорить, что система обменивается с окружением энтропией [7, с. 33-35] (или негэнтропией, т. е. информацией [3, 8]). Такую систему назовем синергетической.

Основными чертами самоорганизации атомов в синергетических системах являются:

- возникновение в неравновесных и неустойчивых объектах коллективных движений частиц и образование диссипативных структур при протекании необратимых процессов (ячейки Бенара, кольца Тейлора, наноструктурированный материал, реакция Белоусова-Жаботинского и т. п. [7-11]);

- фрактальная геометрия объединений самоподобных или самоаффинных элементов и многоуровневое (иерархическое) строение вещества [12-15];

- геометрическая схожесть зависимостей определенных характеристик вещества от управляющих параметров (см., например, многоступенчатые графики изменения объемной доли кристаллической фазы в аморфном сплаве $Al_{86}Ni_6Co_2Gd_6$ [16, с. 735] и зависимости фрактальной размерности рельефа поверхности аустенитной нержавеющей стали от числа циклов нагружения [17, с. 390]);

- математическое моделирование кинетических процессов [6] (законы диффузии Фика, теплопроводности Фурье, сохранения массы или электрического заряда и т. п.) в виде

$$\partial \xi / \partial t + \text{div} J_{\xi} = 0, \quad (2)$$

где ξ – характеристика вещества (концентрация, температура, масса и т. д.), J_ξ – ее поток, оператор дивергенции $\text{div } J = \partial J_x / \partial x + \partial J_y / \partial y + \partial J_z / \partial z$.

Самосборка частиц в сплавах порождает иерархические структуры, формирующие многоуровневую организацию вещества с фрактальной геометрией. Они строятся из одинаковых элементов. Если преобразования подобия (параллельный перенос, поворот, осевые симметрии) осуществляются с неизменным масштабным коэффициентом, позволяющим совместить элемент нижнего уровня с объектом вышерасположенного уровня, то образующееся фрактальное множество является самоподобным. При использовании нескольких коэффициентов подобия возникают самоаффинные фракталы. Например, для описания расщепления ствола дендрита с диаметром d на две ветви с диаметрами d_1 и d_2 используют соотношение Леонардо да Винчи [15, с. 20]

$$d_1^2 + d_2^2 = d^2. \quad (3)$$

При $d_2 = d_1^2$ решением (3) является золотое сечение $\varphi = (d_1 / d)^2 \approx 0,61803$.

Протекание в системе противоположных кинетических процессов при ограниченности ресурсов среды для их реализации приводит к прекращению эволюции системы и ее переходу в стационарное состояние. В этом случае поведение системы моделируется логистическим уравнением [18, с. 253-258] (законом Ферхюльста [15, с. 72-75]). В стационарном состоянии диссипативный канал определенных структур может исчерпать возможность рассеяния энергии за счет протекания необратимых процессов вида (2) или динамических внешних воздействий. При этом управляющий параметр достигает порогового бифуркационного значения, что порождает образование новых диссипативных субструктур, построенных из других элементов системы. Эволюция системы связана с новыми антагонистическими кинетическими процессами и приводит к формированию многоступенчатых зависимостей [16, 17] одних параметров от других. Превышение управляющим параметром некоторого значения при достижении нового стационарного состояния вызывает, в конце концов, хаотизацию системы.

Протекание необратимых кинетических и динамических (см., например, [19]) процессов, реализующих переход синергетической системы в стационарное состояние, указывает на решающую роль градиентов физических величин [20, с. 7]. В связи с этим возникает задача получения уравнений вида (2) с использованием гиперфункций и выяснения роли градиентов в формировании стационарного состояния синергетической системы.

Гиперфункциональный анализ кватернионного пространства. Гиперкомплексное исчисление. Общее решение произвольного квадратного уравнения $ax^2 + bx + c = 0$ можно записать в виде комплексного числа [21]

$$x_{1,2} = A \pm \gamma B, \quad (4)$$

где $A = -b/(2a)$, $B = \sqrt{|D|}/(2a)$, $D = b^2 - 4ac$ – дискриминант уравнения, γ – комплексная единица (цвет комплексного числа (4)), причем

$$\gamma^2 = \begin{cases} -1, & D < 0 \text{ – комплексное число} \\ 0, & D = 0 \text{ – дуальное число} \\ +1, & D > 0 \text{ – двойное число} \end{cases} \quad (5)$$

Развитие теории чисел вида (4) привело Гамильтона к открытию гиперкомплексных чисел [21]

$$z = u + \gamma U, \quad (6)$$

Здесь u – скалярная, а U – векторная части кватерниона (6) соответственно. Произведение векторных частей кватернионов осуществляется по правилу

$$\gamma U \gamma W = \gamma^2 (U \cdot W - \gamma [U \times W]), \quad (7)$$

где $U \cdot W = U_1 W_1 + U_2 W_2 + U_3 W_3$ и $[U \times W] = i(U_2 W_3 - U_3 W_2) + j(U_3 W_1 - U_1 W_3) + k(U_1 W_2 - U_2 W_1)$ – скалярное и векторное произведения частей гиперкомплексных чисел соответственно.

Гиперпространство-время. Анализ применимости гиперфункций вида (6) к получению физических законов показал, что к ним приводит использование двойных кватернионов, которые в дальнейшем будем называть кватернионами Гамильтона – Гиббса (бикватернионами, парафункциями) [22]. Рассмотрим гиперпространство с безразмерными пространственно-временными осями: $\tau = ct/L$ и $r = R/L$, где c – предельная скорость распространения сигнала, t – время, L – характерный размер исследуемой области, R – радиус-вектор. Положение выбранной точки в гиперпространстве-времени зададим кватернионом Гамильтона – Гиббса

$$R = \tau + \gamma r, \quad (8)$$

а безразмерную скорость движения b – бикватернионом

$$b = dR/d\tau = 1 + \gamma v/c. \quad (9)$$

Отметим, что произведение (7) на комплексно-сопряженную величину равно квадрату времяподобного интервала между событиями.

Операторы движения. В классической теории функций комплексного переменного независимость комплексной функции от зеркального аргумента (комплексно-сопряженной величины $z^+ = x - iy$ ($i^2 = -1$)) определяется условиями Коши – Римана (см., напр., [23]).

Их можно записать в виде отсутствия градиента Ли $\nabla = \partial/\partial x + i\partial/\partial y$ ($i^2 = -1$) при его действии на функцию $f(x, y) = u(x, y) + iv(x, y)$ на плоскости, т. е. $\nabla f = 0$ [24].

Введем оператор градиента в гиперпространстве и назовем его «тетра», он определяет локальные изменения в выбранной точке и ее малой окрестности

$$\diamond = \partial/\partial\tau + \gamma\nabla. \quad (10)$$

Оператор (9) является аналогом оператора Гамильтона (градиента) [25, с. 151; 26, с. 52] в евклидовом пространстве

$$\text{grad} = \nabla = i\partial/\partial x + j\partial/\partial y + k\partial/\partial z, \quad (11)$$

где i, j, k – единичные векторы пространственных осей. Найдем произведение бикватернионов (9) и (10), получим

$$D_\tau = v^* \diamond = (1 + \gamma v/c) \diamond = (\partial/\partial\tau + v \cdot \nabla)/c + \gamma(\nabla + v\partial/c\partial\tau - [v \times \nabla]/c) = d/d\tau + \gamma d/dr, \quad (12)$$

где операторы $d/d\tau = \partial/\partial\tau + v \cdot \nabla/c$ и $d/dr = \nabla + v\partial/c\partial\tau - [v \times \nabla]/c$ – субстанциональные (полные) производные, которые задают изменения в системе при переходе от точки к точке со скоростью v . Если скорость $v = 0$, то оператор $D_\tau = \diamond$. Механическое движение системы в целом со скоростью V задается оператором $D/D\tau = d/d\tau + V \cdot d/dr$.

Условия гипераналитичности. Подействуем оператором (10) на парафункцию $W = w + \gamma W$ и приравняем результат нулю, получим обобщение условий Коши – Римана или условия гипераналитичности парафункции W :

$$\diamond W = 0 : \begin{cases} \partial w/\partial\tau + \text{div} W = 0 \\ \partial W/\partial\tau + \nabla w - \text{rot} W = 0 \end{cases} \quad (13)$$

здесь оператор ротора $\text{rot} W = [\nabla \times W]$. Для подвижной точки вместо оператора (10) на парафункцию действуют оператором (11). Стационарность скалярной величины w ($\partial w/\partial\tau = 0$ в окрестности особой точки) указывает на соленоидальность поля W ($W = \text{rot} A$, так как $\text{div} W = \text{div}(\text{rot} A) \equiv 0$ [25, с.151]), стационарность которого наблюдается при равенстве $\text{rot} W$ градиенту величины w . Устойчивость стационарного состояния определяется значениями управляющих параметров, задаваемых начальными и граничными условиями задачи. Отметим, что первое уравнение (12) задает кинетику, а второе уравнение – динамику перестройки системы в выбранной точке.

Если для вещества векторная функция $W = -K\nabla w$ задает поток скалярной величины w , то первое уравнение системы (13) совпадает с (2). Второе уравнение (13) определяет изменение потока W при перераспределении в пространстве w . Постоянство и положительность коэффициента K приводят с течением времени к неограниченному росту градиента w . В этом случае уравнения типа (2) не могут адекватно описывать экспериментальные

данные. Для поля со скалярным потенциалом w и векторным потенциалом W первое уравнение (13) совпадает с калибровкой Лоренца [8, с. 101]. Второе уравнение (13) задает сумму напряженностей электрического $E = -\partial W / \partial \tau - \nabla w$ и магнитного $H = \text{rot } W$ полей.

Волны в гиперпространстве. Применим операцию rot ко второму уравнению системы (10), учтем перестановочность оператора rot с частной производной по времени и введем замену переменной $I = \text{rot } W$, получим

$$\partial I / \partial \tau = \text{rot } I. \quad (14)$$

Из уравнения (14) видно, что отсутствие завихренности ($\text{rot } I = 0$) соленоидального поля I порождает стационарность завихренности векторного поля W .

Вычислив частную производную по времени от первого уравнения (13), применив ко второму уравнению оператор div , находим разность между вторым и первым результатами, с учетом равенства $\text{div}(\nabla w) = \Delta w$ получим уравнение гармонического скалярного поля

$$\square w = 0, \quad (15)$$

где оператор Даламбера [26, с. 100] определяется равенством $\Upsilon = \Delta - \partial^2 / \partial \tau^2$, а оператор Лапласа [26, с. 18] – $\Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$. Уравнение (14) описывает распространение продольной волны величины w со скоростью c [26, с. 100].

Применив операцию (11) к первому уравнению (13), вычислив частную производную по времени от второго уравнения (13), находим разность между первым и вторым результатами, с учетом равенства (14) и соотношения $\text{grad div } W - \text{rot rot } W = \Delta W$ получим уравнение

$$\Upsilon W + 2 \text{rot rot } W = 0. \quad (16)$$

При выполнении равенства $\text{grad div } W + 2 \text{rot rot } W = 0$ в системе распространяются поперечные волны согласно уравнению [22, с. 141]

$$-\text{rot rot } W = \partial^2 W / \partial \tau^2. \quad (17)$$

Внутреннее трение (собственные парафункции оператора (7)). Рассмотрим задачу на собственные парафункции оператора (7)

$$\diamond W = \lambda W, \quad (18)$$

где λ – действительное число. Уравнение (18) в компонентах имеет вид

$$\diamond W = \lambda W : \begin{cases} \partial w / \partial \tau + \text{div } W = \lambda w \\ \partial W / \partial \tau + \nabla w - \text{rot } W = \lambda W \end{cases}. \quad (19)$$

Выполнив операции, примененные к уравнению (10), получим

$$\partial I / \partial \tau = \text{rot } I + \lambda I, \quad (14a)$$

$$\Upsilon w + 2\lambda \partial w / \partial \tau - \lambda^2 w = 0, \quad (15a)$$

$$\Upsilon W + 2\lambda \partial W / \partial \tau - \lambda^2 W + 2 \text{rot rot } W = 0. \quad (16a)$$

Найдем решение, например, уравнения (15a), для чего представим функцию w в виде

$$w(\tau, r) = f(\tau)g(r). \quad (20)$$

Подстановка (20) в уравнение (14a), а затем разделение переменных приводят к системе уравнений

$$\begin{cases} \ddot{f} - 2\lambda \dot{f} + \lambda^2 f = \mp \Omega^2 f \\ \Delta g = \pm \Omega^2 g \end{cases}, \quad (21)$$

здесь, \dot{f}, \ddot{f} – первая и вторая производные функции f по времени соответственно, Ω – действительное число.

Система уравнений (21) в зависимости от значений параметров описывает разные состояния выбранной области. В частности, при $\lambda < 0$ первое уравнение (21) описывает затухающие колебания [27, с. 223], т. е. указывает на наличие в системе внутреннего трения. Если при этом рассматривать второе уравнение (21) со знаком минус в правой части, то в системе наблюдается пространственное периодическое распределение. Это указывает на формирование в системе диссипативных структур.

Импульс частицы. Инертность материальной точки будем характеризовать безразмерным кватернионом Гамильтона – Гиббса $M = \rho + \gamma J_\rho$, где ρ – плотность массы, J_ρ – поток массы. Если эта парафункция гипераналитическая, то первое уравнение (13) определяет закон сохранения массы. Импульс частицы P в размерных единицах с учетом (9) равен

$$P = (mc + \gamma J_m)(c + \gamma v) = \varepsilon / c + J_m \cdot v + \gamma(p + cJ_m - [J_m \times v]) = E / c + \gamma P, \quad (22)$$

здесь $mc + \gamma J_m = McV_0$, V_0 – характерный объем, $E / c = \varepsilon / c + J_m \cdot v$ – энергия материальной точки, $\varepsilon = mc^2$, $P = p + cJ_m - [J_m \times v]$ – ее импульс. При отсутствии потока массы ($J_m = 0$) квадрат модуля импульса равен

$$|P|^2 = PP^+ = \varepsilon^2 / c^2 - p^2 = m^2 c^2 (1 - v^2 / c^2) = m_0^2 c^2, \quad (23)$$

где $m_0 = m\sqrt{1 - v^2 / c^2}$ – масса покоя. Умножив (23) на c^2 , получим классическое равенство релятивистской теории [28, с. 298]

$$\varepsilon^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4. \quad (24)$$

Динамика материальной точки. Ускорение w материальной точки равно

$$w = d^2 R / d \tau^2 = db / d \tau = \gamma a / a_L = \gamma W, \quad (25)$$

где $a_L = c^2 / L$ – характерное ускорение данной задачи. Сила, действующая на частицу, определяется равенством Ньютона

$$F = J_m \cdot a + \gamma(ma - [J_m \times a]) = f + \gamma F. \quad (26)$$

С другой стороны сила

$$F = dP / d \tau = dE / d \tau + \gamma dP / d \tau, \quad (27)$$

следовательно, диссипация энергии и сила в пространстве равны

$$dE / d \tau = J_m \cdot a, \quad F = dP / d \tau = ma - [J_m \times a]. \quad (28)$$

При $J_m = 0$ отсутствует рассеяние энергии и закон динамики приобретает вид второго закона Ньютона.

Приведенные примеры демонстрируют применимость парафункций для описания физических явлений и процессов в синергетической системе. Поэтому рассмотрим гиперкомплексный анализ многомерного термодинамического пространства.

Термодинамическое гиперпространство синергетической системы. Энтропия равновесного состояния. Выберем в качестве стандартного состояния синергетическую систему с объемом V_0 при температуре T_0 и давлении P_0 . Введем безразмерные координаты для k -компонентной системы в многомерном термодинамическом пространстве:

$$q_i = N_i, \quad i = 1, 2, \dots, k; \quad q_{k+1} = U / \theta_0; \quad q_{k+2} = V / V_0, \quad (29)$$

где $\theta_0 = k_B T_0$, k_B – постоянная Больцмана. Термодинамические поля (тепловое, механическое и химическое) определяют безразмерные потенциалы

$$\varphi_i = -\mu_i / \theta, \quad i = 1, 2, \dots, k; \quad \varphi_{k+1} = \theta_0 / \theta; \quad \varphi_{k+2} = PV_0 / \theta, \quad (30)$$

здесь $\theta = k_B T$. Тогда безразмерная энтропия S_{eq} равновесной системы равна

$$S_{eq} = \sum_{i=1}^{k+2} q_i \varphi_i. \quad (31)$$

Дифференциал произведения $S_{eq} \cdot \theta$ совпадает с равенством (1) в силу выполнения соотношения Гиббса – Дюгема [29, с. 146].

Парафункции синергетической системы. Неравновесное состояние синергетической системы в гиперпространстве зададим с помощью бикватернионов

$$Q_i = q_i + \gamma J_i, \quad \Phi_i = \varphi_i + \gamma \Phi_i, \quad i = 1, 2, \dots, k + 2. \quad (32)$$

Гиперфункции Q_i определяют положение системы в гиперпространстве, а парафункции Φ_i – потенциалы термодинамических полей. Их произведение равно энтропии S неравновесной системы

$$S = \sum_{i=1}^{k+2} Q_i \Phi_i = S_{eq} + \sum_{i=1}^{k+2} [J_i \cdot \Phi_i + \gamma(q_i \Phi_i + \varphi_i J_i - [J_i \times \Phi_i])] = S_n + \gamma I_n, \quad (33)$$

где $S_n = S_{eq} + \sum_{i=1}^{k+2} J_i \cdot \Phi_i$ – скалярная часть, $I_n = \sum_{i=1}^{k+2} [q_i \Phi_i + \varphi_i J_i - [J_i \times \Phi_i]]$ – поток энтропии. Таким образом, переход системы в термодинамически равновесное состояние происходит при обращении в нуль суммы в (33).

Термодинамические силы. В неравновесном состоянии синергетическая система подвержена воздействию термодинамических сил (напряженностей полей)

$$X_i = \diamond \Phi_i = \partial \varphi_i / \partial \tau + \operatorname{div} \Phi_i + \gamma \{ \partial \Phi_i / \partial \tau + \nabla \varphi_i - \operatorname{rot} \Phi_i \} = x_i + \gamma X_i. \quad (34)$$

Будем считать, что выполняются нормировки типа условия Лоренца

$$x_i = \partial \varphi_i / \partial \tau + \operatorname{div} \Phi_i = 0, \quad (35)$$

т. е. термодинамические силы характеризуются только векторной частью.

Малое смещение из положения равновесия. Если смещение системы из положения термодинамического равновесия носит упругий характер, то силы (34) связаны с бикватернионами Q_i соотношением Онзагера [30]

$$X_i = \sum_{j=1}^{k+2} K_{ij} Q_j \quad (36)$$

(K_{ij} – коэффициенты пропорциональности), откуда следует выполнение равенств

$$\sum_{j=1}^{k+2} K_{ij} q_j = 0, \quad X_i = \sum_{j=1}^{k+2} K_{ij} J_j. \quad (37)$$

Если определитель матрицы $K = (K_{ij})$ отличен от нуля, то существует обратная матрица $L = (L_{ij})$, устанавливающая связь между потоками и термодинамическими силами [20, с. 14]: $J_i = \sum_{j=1}^{k+2} L_{ij} X_j$. Равенство (36) можно рассматривать как критерий, устанавливающий различие между слабо- и сильнонеравновесными состояниями синергетической системы.

Производство энтропии в неравновесном состоянии. Определим производство энтропии σ в неравновесной синергетической системе как сумму произведений величин Q_i на (34)

$$\sigma = \sum_{i=1}^{k+2} Q_i X_i = \sum_{i=1}^{k+2} [J_i \cdot X_i + \gamma(q_i X_i - [J_i \times X_i])] = \sigma_n + \gamma Z_n, \quad (38)$$

при этом скалярная часть равенства (38) имеет классический вид [20, с. 9; 31, с. 309]

$$\sigma_n = \sum_{i=1}^{k+2} J_i \cdot X_i. \quad (39)$$

Отметим, что «скрытое» производство энтропии (векторная часть (38)) Z_n обращается в нуль при выполнении равенства

$$[J_i \times X_i] = q_i X_i, \quad (40)$$

которое справедливо только при определенном угле между векторами J_i и X_i : $\sin \alpha_i = q_i / |J_i|$. Из векторного анализа [25] следует, что скалярное произведение вектора J_i (X_i) на (40) равно нулю, т. е. (39) также принимает тривиальное значение, следовательно, синергетическая система стремится к равновесию или стационарному состоянию.

Формирование локально-равновесных областей. Локально-равновесное состояние [32, с. 40] синергетической системы определим, как состояние, в котором обнуляются термодинамические силы, т. е. выполняются равенства термодинамической статики $X_i = \diamond \Phi_i = 0$ (см. соотношения (13)):

$$\diamond \Phi_i = 0 : \begin{cases} \partial \varphi_i / \partial \tau + \operatorname{div} \Phi_i = 0 \\ \partial \Phi_i / \partial \tau + \nabla \varphi_i - \operatorname{rot} \Phi_i = 0 \end{cases}. \quad (41)$$

Стационарное состояние термодинамических полей задается равенствами

$$\diamond \Phi_i = 0 : \begin{cases} \partial \varphi_i / \partial \tau = 0, \quad \operatorname{div} \Phi_i = 0 \\ \partial \Phi_i / \partial \tau = 0, \quad \nabla \varphi_i = \operatorname{rot} \Phi_i \end{cases}. \quad (42)$$

Система уравнений (42) определяет множество особых точек, в окрестности которых векторные термодинамические потенциалы Φ_i порождают соленоидальные поля ($\operatorname{div} \Phi_i = 0 \Leftrightarrow \Phi_i = \operatorname{rot} A_i$), а локальная область синергетической системы находится в квазиравновесном состоянии. Таким образом, неразличимость локально-равновесного и стационарного состояний системы в этом случае связана с тривиальными значениями термодинамических сил. Другой тип особых точек определяется выполнением условий

(39) и (40), которые задают перпендикулярность ненулевых векторов J_i и X_i . Пребывание некоторой части синергетической системы в окрестности особой точки способствует переходу этой локальной области в квазиравновесное состояние. Следовательно, система разбивается на совокупность локально-равновесных областей [31, с. 242; 32, с. 40]. Особые точки формируют в гиперпространстве структуру типа дельты речного бассейна с дендритным строением (см. соотношение да Винчи (3)). Стремление синергетической системы двигаться по «речному» дну определяется достижением ее параметрами управляющих значений.

Действие оператора «тетра» на произведение парафункций. В гиперкомплексном пространстве отсутствует свойство перестановочности (коммутативности) сомножителей, что приводит к изменению правила дифференцирования произведения парафункций f и g [33]

$$\diamond(fg) = (\diamond f)g + f(\diamond g) + h, \quad (43)$$

где бикватернион h (его вид см. в [33]) задает отклонение от коммутативности.

Эволюция энтропии в неравновесном состоянии. Неравновесность состояния синергетической системы проявляется не только в изменении потенциалов термодинамических полей, но и при производстве энтропии. Если бикватернионы Q_i удовлетворяют условиям (13), выполняются калибровки (35) и справедливы равенства

$$\text{д } h = 0 : \begin{cases} \sum_{i=1}^{k+2} J_i \cdot \text{rot } \Phi_i = 0 \\ \sum_{i=1}^{k+2} \{(\Phi_i \cdot \nabla) J_i + [J_i \times \nabla \varphi] + [\Phi_i \times \text{rot } J_i] - \Phi_i \text{ div } J_i\} = 0 \end{cases}, \quad (44)$$

то эволюция энтропии задается системой уравнений

$$\diamond S = \sigma : \begin{cases} \partial S_n / \partial \tau + \text{div } I_n = \sigma_n \\ \partial I_n / \partial \tau + \nabla S_n - \text{rot } I_n = Z_n \end{cases}. \quad (45)$$

Стационарное состояние синергетической системы. В стационарном состоянии производство энтропии в системе отсутствует, при этом, согласно уравнениям системы (13), в окрестности произвольно выбранной точки справедливы равенства

$$\diamond S = 0 : \begin{cases} \partial S_n / \partial \tau = 0, \quad \text{div } I_n = 0 \Leftrightarrow I_n = \text{rot } A \\ \partial I_n / \partial \tau = 0, \quad \nabla S_n = \text{rot } I_n \Leftrightarrow \Delta S_n = 0 \end{cases}. \quad (46)$$

Если переход от точки к точке локальной области осуществляется со скоростью v/c , а среда несжимаема ($\text{div } v = 0$), то легко показать, что в (46) можно перейти от локального описания стационарного состояния к субстанциональному

$$\begin{cases} d S_n / d t = v \cdot \text{rot } I_n \\ d I_n / d t = \text{rot}[I_n \times v] + (I_n \cdot \nabla) v \end{cases}. \quad (47)$$

Следовательно, стационарное состояние локальной области на субстанциональном уровне описывается соотношениями

$$\begin{cases} dS_n/dt = 0, & v \perp \text{rot } I_n \\ dI_n/dt = 0, & \text{rot}[I_n \times v] = -(I_n \cdot \nabla)v \end{cases} \quad (48)$$

Наличие особых точек в гиперпространстве синергетической системы приводит к формированию стационарных состояний не только вблизи положения термодинамического равновесия, но и вдали от него.

Заключение. Знание внутреннего строения, функционирования и развития синергетических систем может способствовать интенсивному развитию естественно-научных и гуманитарных наук. Поэтому моделирование явлений и процессов в таких системах представляет актуальную проблему. В частности, данная работа посвящена применению гиперкомплексного исчисления в виде парафункций не только для вывода известных физических законов и уравнений, но и для получения новых теоретических соотношений, истинность которых требует экспериментальной проверки. В работе установлены новые обобщенные выражения для энтропии и ее производства в неравновесном состоянии; введен критерий различия между малыми и большими отклонениями (линейная связь между термодинамическими силами и термодинамическими координатами) системы от положения термодинамического равновесия; исследованы случаи возникновения стационарных состояний как на локальном, так и на субстанциональном уровнях организации вещества и поля. Так как синергетические системы являются базой технических, биологических, социальных и других объектов, дальнейшее развитие теории синергетических систем представляет существенный интерес для науки в целом.

Список источников

1. Моделирование неравновесных открытых систем методами равновесной термодинамики / Б.М. Каганович, А.В. Кейко, С.П. Филиппов, В.А. Шаманский // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2008. № 1 (31). Т. 2. С. 27-39.
2. Товбин Ю.К. Второе начало термодинамики, термодинамика Гиббса и времена релаксации термодинамических параметров // Журнал физической химии. 2021. Т. 95. № 4. С. 483-507.
3. Колесниченко А.В. Информационно-термодинамическая концепция формирования процессов самоорганизации в открытых системах под воздействием внешней среды /// Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2015. № 19. 42 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-19>.

4. Вапняр В.В. Актуальные проблемы термодинамики и синергетики открытых систем в современном естествознании // Современные наукоемкие технологии. 2008. № 4. С. 104-106. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=23772> (дата обращения: 05.12.2023).

5. Горбань А.Н. Обход равновесия: уравнения химической кинетики и их термодинамический анализ. Новосибирск: Наука, 1984. 226 с.

6. Базаров И.П. Термодинамика. Санкт-Петербург: Лань. 2010. 384 с.

7. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. Москва: Мир, 1979. 512 с.

8. Николис Дж. Динамика иерархических систем: эволюционное представление. Москва: Мир, 1989. 488 с.

9. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. Москва: Мир, 1979. 277 с.

10. Хакен Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся устройствах и системах. Москва: Мир, 1985. 419 с.

11. Терехов С.В. Введение в синергетику. Донецк: Цифровая типография, 2010. 187 с.

12. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. Москва: Ин-т компьютерных исследований, 2002. 656 с.

13. Федер Е. Фракталы. Москва: Мир, 1991. 248 с.

14. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 528 с.

15. Терехов С.В. Фракталы и физика подобия. Донецк: Цифровая типография, 2011. 255 с.

16. Terekhov S.V. Single- and Multistage Crystallization of Amorphous Alloys // Physics of Metals and Metallography. 2020. Vol. 121, № 7. P. 664-669.

17. Кузнецов П.В., Петракова И.В., Шрайбер Ю. Фрактальная размерность как характеристика усталости поликристаллов металлов // Физическая мезомеханика, 2004. № 7. Спец. вып. Ч. 1. С. 389-392.

18. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Москва: Прогресс, 1986. 432 с.

19. Шахназаров Т.А. Динамическая природа конденсированного состояния в реальных процессах // Журнал технической физики. 2009. Т. 79. № 12. С. 52-59.

20. Базаров И.П., Геворкян Э.В., Николаев П.Н. Неравновесная термодинамика и физическая кинетика. Москва: Изд-во МГУ, 1989. 240 с.

21. Кантор И.Л., Солодовников А.С. Гиперкомплексные числа. Москва: Наука, 1973. 144 с.

22. Терехов С.В. Поиски научной истины. Т. 2. Избранные научные труды. 2000-2014 годы. Донецк: Цифровая типография, 2020. 318 с.
23. Титчмарш Е. Теория функций. Москва: Наука, 1980. 463 с.
24. Босс В. Лекции по математике. Т. 9: ТФКП. Москва: Изд-во ЛКИ, 2007. 216 с.
25. Борисенко А.И., Тарапов И.Е. Векторный анализ и начала тензорного исчисления. Харьков: Вища школа, 1978. 216 с.
26. Морс Ф.М. Г. Фешбах Методы теоретической физики. Москва: Иностранная литература, 1958. Т. 1. 930 с.
27. Жирнов Н.И. Классическая механика. Москва: Просвещение, 1980. 303 с.
28. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Москва: Мир, 1976. 439 с.
29. Кубо Р. Термодинамика. Москва: Мир, 1970. 304 с.
30. Onsager L. Reciprocal Relations in Irreversible Processes // I. Phys. Rev. 1931. V. 37. P. 405-426; II. 1931. V. 38. P. 2265-2279.
31. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. Москва: Мир, 2002. 461 с.
32. Гладышев Г.П. Термодинамика и макрокинетика природных иерархических процессов. Москва: Наука, 1988. 287 с.
33. Терехов С.В. Физико-геометрические характеристики гиперпространства. III. Целлярный и субстанциональный операторы. Дефект кватернионной производной // Физика и техника высоких давлений. 2016. Т. 26. № 1-2. С. 106-117.

Сведения об авторе

Терехов Сергей Владимирович –
доктор физико-математических наук,
доцент, ведущий научный сотрудник
Донецкого физико-технического
института имени А.А. Галкина, г. Донецк,
Донецкая Народная Республика

Sergei V. Terekhov –
Dr.Sc. (Physics and Mathematics),
Associate Professor, Leading Research
Fellow, Galkin Donetsk Institute for
Physics and Technology,
Donetsk People's Republic

Статья поступила в редакцию 20.11.2023, принята к опубликованию 04.12.2023

УДК. 621. 315

Д.А. Бесчвертный, А.Н. Васин

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛАМЕЛЕЙ ДЛЯ ЩЕЛОЧНЫХ И КИСЛОТНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Аннотация. В статье показана технология изготовления токоведущих основ электродов (ламель) электрических аккумуляторов, широко используемая в настоящее время на предприятиях, ее недостатки и вариант ее совершенствования.

Ключевые слова: технология изготовления, ламели, электроды, аккумуляторы

D.A. Beschvertny, A.N. Vasin

TECHNOLOGY CHARACTERISTICS OF LAMELLA PRODUCTION FOR ALKALINE AND ACID BATTERIES

Abstract. The article describes the technology applied in manufacturing current-carrying electrode architectures (lamellae) of electric accumulators which are widely used at enterprises, disadvantages of the technology, and ways of its improvement.

Keywords: manufacturing technology, lamellae, electrodes, batteries

Введение

Щелочные аккумуляторы – это один из самых распространенных видов энергетических накопителей постоянного тока. Щелочные аккумуляторы, используемые наиболее широко в различного вида установках, машинах, агрегатах и другой технике, как правило, состоят из следующих конструктивных элементов [1]:

- положительных пластин, состоящих из плоских ламелей или трубок с навитой спиралью перфорированной ленты;
- отрицательных пластин, состоящих из плоских ламелей, в которых активным материалом является либо окись кадмия (в кадмиево-никелевых аккумуляторах), либо окись железа (в железоникелевых аккумуляторах);

- электролита – раствора едкого калия или едкого натра либо в чистом виде, либо с добавкой в них небольших количеств гидроокиси лития;
- сепараторов – дырчатых пластин из полимерных материалов, устанавливаемых между пластинами разного знака заряда для фиксации их положения в аккумуляторе;
- токоведущих частей – борнов, межэлементных соединений и других деталей крепления;
- стального сосуда, покрытого изнутри и снаружи слоем никеля толщиной 10-15 мкм.

Ламель представляет собой пакет или плоскую коробочку, изготовленные из перфорированной и никелированной стальной ленты заполненной активной массой. Отверстия в ламелях нужны для того, чтобы электролит мог поступать к активной массе. Толщина ламелей для отрицательных и положительных пластин различна – для положительных пластин она больше. Длина же ламелей зависит от конструктивных особенностей пластин, для которых они предназначены [1, 2].

Цель данной статьи – показать типовые недостатки технологии изготовления токоведущих основ электродов (ламелей) электрических аккумуляторов, применяемых в настоящее время при производстве аккумуляторных батарей и возможные варианты совершенствования такой технологии.

Технология изготовления электродов электрических аккумуляторов

Токоведущие основы электродов электрических аккумуляторов изготавливают из перфорированных металлических лент.

Характер перфорации токоведущей основы электрода оказывает непосредственное влияние на работу аккумулятора. От него зависит механическая прочность и омическое сопротивление электрода; площадь контакта активной массы с токоведущей основой, влияющей на токораспределение и т. д.

Но существующие методы перфорации и перфорационные инструменты не всегда обеспечивают необходимое качество токоведущих основ и, кроме того, имеют невысокую производительность.

К токоведущим основам электродов предъявляются достаточно высокие требования. Они должны иметь:

- 1) малое омическое сопротивление;
- 2) характер перфорации, способствующий равномерному распределению тока по всей массе активного материала электрода;
- 3) высокую коррозионную стойкость, особенно это относится к основам положительных электродов;

- 4) высокий процент открытия перфорации, а для некоторых электродов величина окон перфорации не должна допускать вымывания активной массы;
- 5) хорошее сцепление с активной массой;
- 6) Достаточную прочность;
- 7) Малый вес.

Кроме этого, они должны быть простыми в изготовлении.

В зависимости от конструктивных видов токоведущих основ электродов и назначения существуют различные методы их производства. На рис. 1 представлена схема классификации наиболее распространенных методов производства токоведущих основ электродов.



Рис. 1. Схема классификации методов производства токоведущих основ электродов

Метод производства неразрывно связан с инструментом и, в конечном счете, определяется его видом и, не в последнюю очередь, это относится к инструментам, которыми перфорируют металлические ленты [3].

На рис. 2 показана классификация основных типов инструментов, применяемых для перфорации лент.

Методом литья изготавливаются токоведущие основы только для свинцово-кислотных аккумуляторов. Они выполняются в виде монолитных пластин или решеток,

отлитых из чистого свинца. В отдельных типах стационарных аккумуляторов применяют отрицательные электроды коробчатой конструкции, у которых токоведущая основа состоит из литой решетки, собранной из двух половин и ограниченной с обеих сторон листами перфорированного свинца толщиной 0,25 мм.

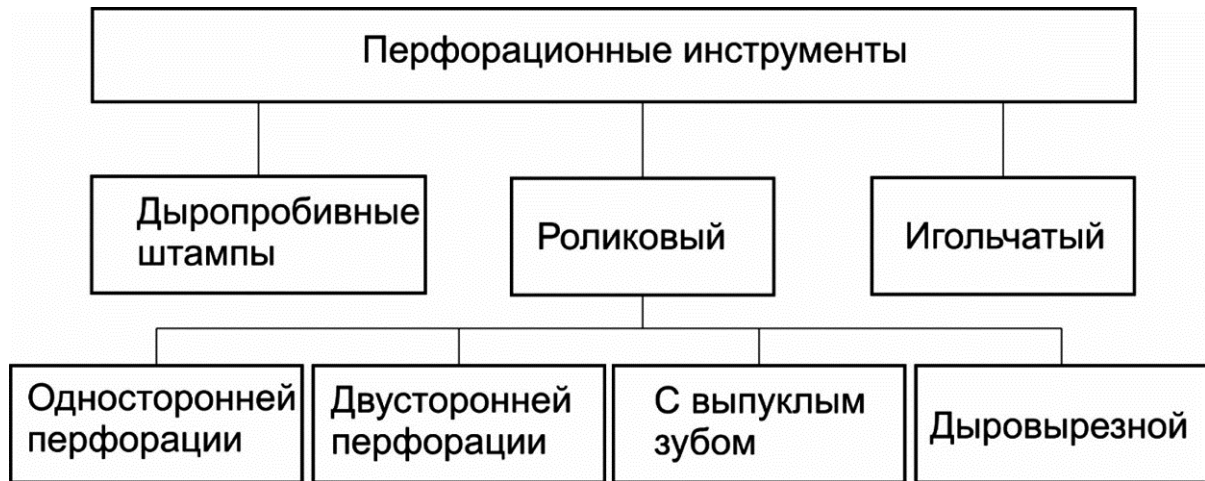


Рис. 2. Классификация основных типов инструментов для перфорации лент

В конструкции некоторых электродов щелочных аккумуляторов токоведущие основы изготавливаются из тканых или плетеных сеток, выпускаемых промышленностью. Заготовка из сетки вырубается с помощью штампа. Для предохранения от перекоса её натягивают на заранее подготовленную рамку по форме электрода и приваривают к ней по краям.

Положительные электроды изготавливают напрессовыванием, намазкой или иным способом нанесения активной массы на токоотвод. Токоотводы изготавливают из сеток (тканых или просечных), решеток, сплошных или пористых пластин и т. п. Активная масса электродов с твердым окислителем представляет собой смесь активного вещества, электропроводной добавки и связующего вещества. В качестве электропроводных добавок используются, чаще всего, углеродные материалы – сажа, графит, углеродные волокна и т. п. Связующим веществом в большинстве случаев служат фторированные полимеры. Содержание каждой добавки в активной массе колеблется от 3 до 15 % (по массе). Положительные электроды элементов с жидким окислителем изготавливают из углеродных материалов.

В качестве основы электрода используют никелевую ленту толщиной 0,05 мм. Для перфорации ленты используют стан перфорационный универсальный.

Данный станок предназначен для получения подложек электродов аккумуляторов из непрерывной металлической ленты. Применение специальных инструментов в зави-

Машиностроение

симости от технологических требований, устанавливаемых на станке, позволяет получать подложки с различным формообразованием отверстий: с односторонней игольчатой перфорацией, с двухсторонней игольчатой перфорацией, с перфорацией подложек в виде вырезанных прямоугольных окон и т. п.

Никелевую ленту на бобине устанавливают на сматывающий подвижный диск, разматывают несколько витков ленты на сматывающей бобине, заправляют ленту в каретку двухсторонней перфорации и заправляют ленту между колющими роликами (для облегчения первоначального съема ленты с зубьев). В зависимости от высоты зуба инструмента, колющие ролики предварительно должны быть разведены при наладке на 0,2...2 мм. Затем заправляют ленту в прокатные валки и приемную бобину, при этом прокатные валки необходимо свести между собой до обеспечения заданного зазора – 0,35...0,4 мм.

Не допускается надрывы, заусенцы и видимые нарушения сплошности поверхности ленты, при необходимости такие участки ленты удаляются. Рекомендуемая скорость протягивания ленты на перфорационном стане для этой операции 9 м/мин. Схема протяжки ленты представлена на рис. 3.

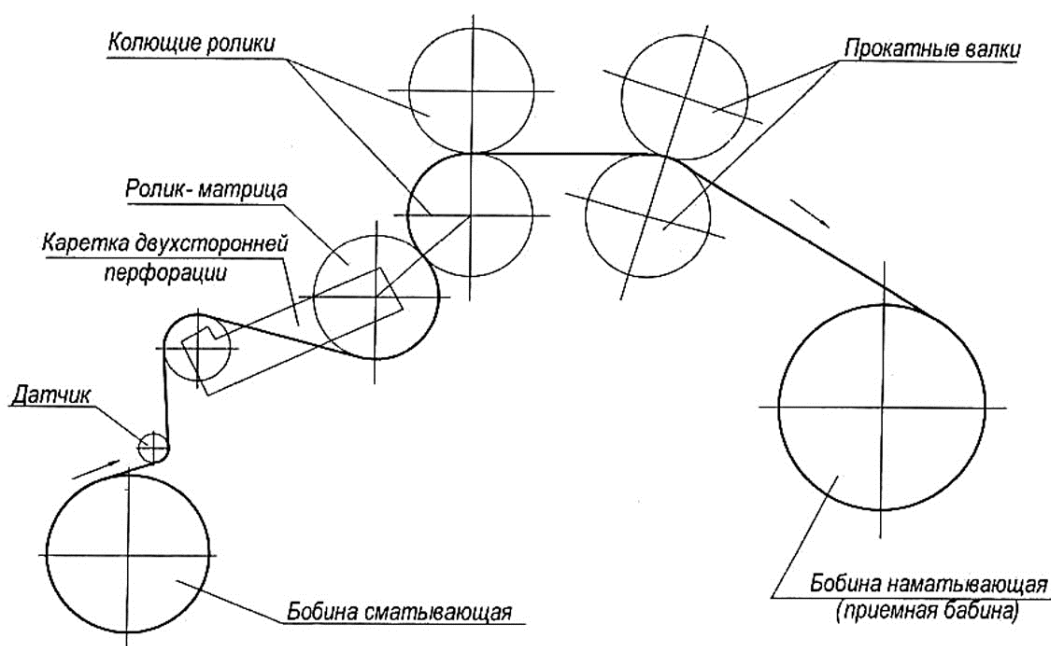


Рис. 3. Схема протяжки ленты на перфорационном стане

Прокатные валки обеспечивают равномерные и повторяющиеся отверстия на никелевой ленте с размерами заданными чертежом, а прокатные валки обеспечивают необходимую толщину ленты. Общий вид одной из разновидностей решетки представлен на рис. 4.

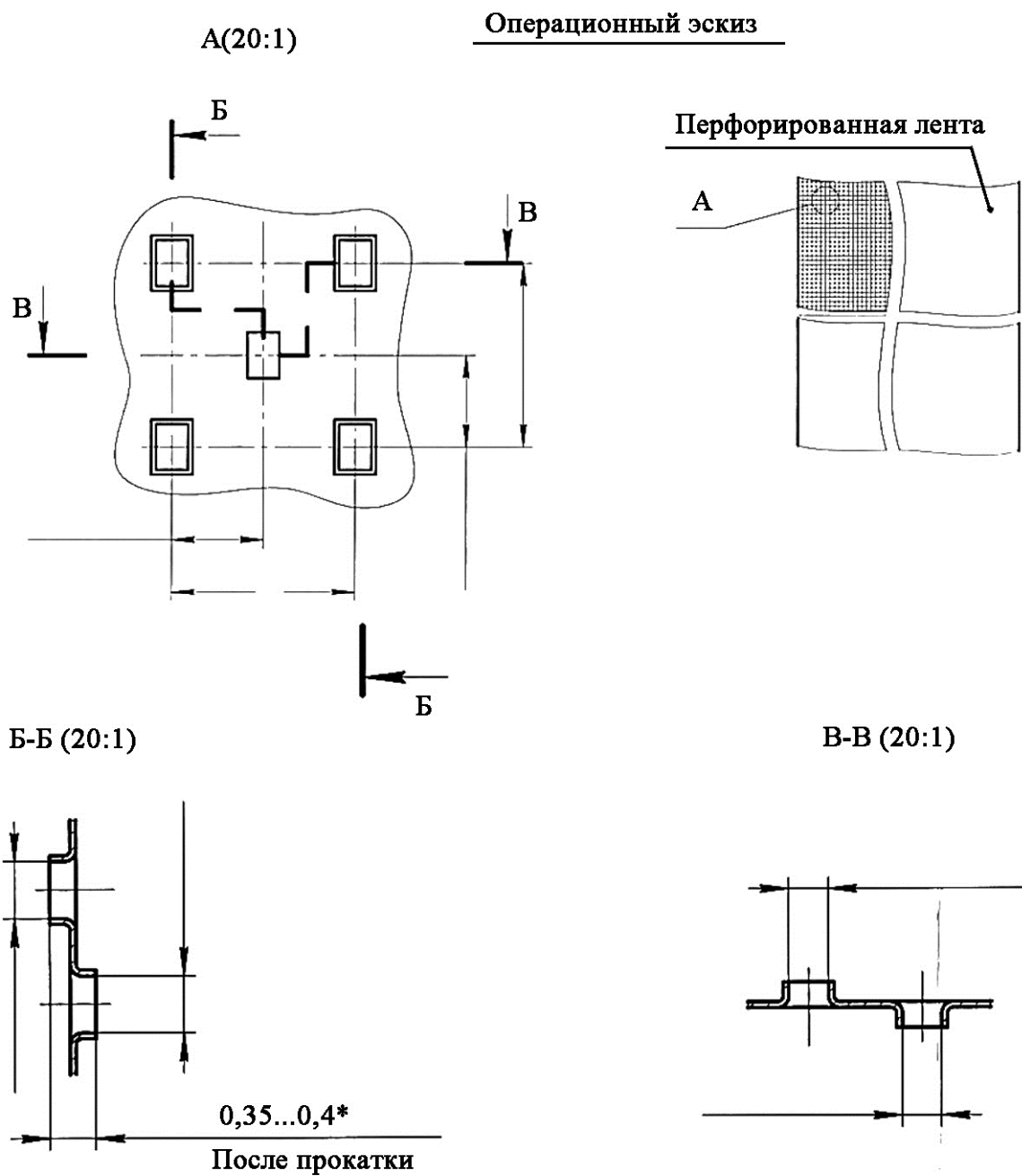


Рис. 4. Вид решетки после протягивания ленты на прокатывающем стане

Затем из перфорированной ленты на штампе вырубается решетка, для отведения энергии с электрода к ней необходимо приварить токоотвод. Роль токоотвода выполняет никелевая пластина, которая изготавливается из ленты.

Токоотвод приваривается точечной сваркой. Для этого на пневматическом прессе обжимают участок решетки согласно чертежу. Затем решетку и токоотвод фиксируют в приспособлении для точного позиционирования относительно друг друга. Общий вид сварки решетки и токоотвода показан на рис. 5.

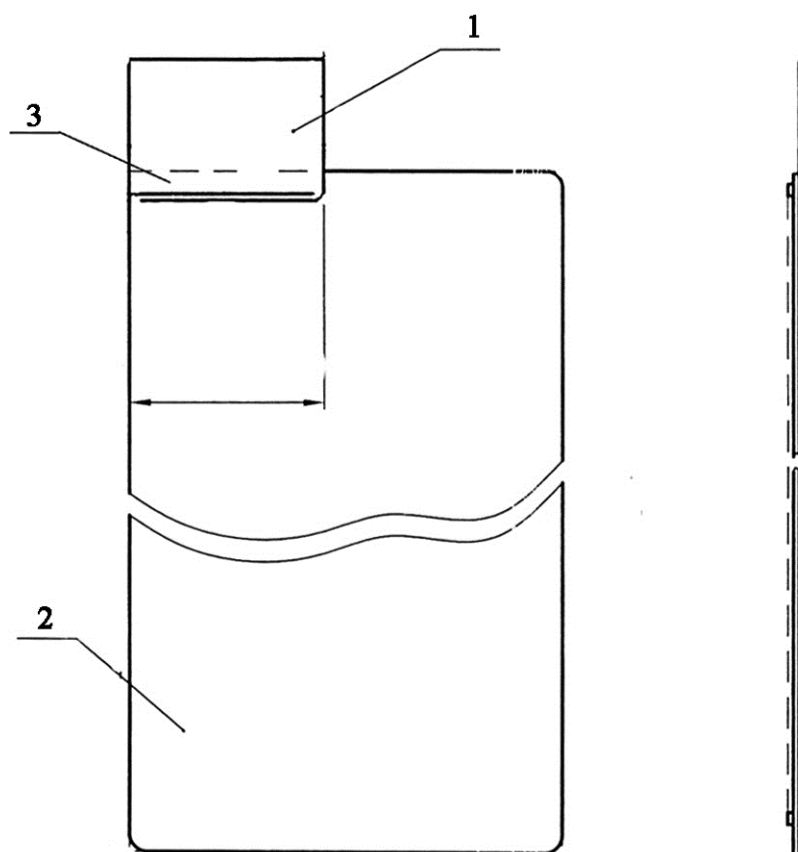


Рис. 5. Решетка с токоотводом: 1 – токоотвод; 2 – решетка;
3 – место сварки решетки и токоотвода

Недостатком этой технологии является сборность конструкции из двух элементов, дополнительная операция сборки (методом сварки) и снижение прочностных свойств сборной конструкции по сравнению с конструкцией цельной. С позиции экономической целесообразности – выполнение дополнительных операций – вырубка по отдельности решетки и токоотвода, а также последующая операция сварки, такая технология изготовления решетки является не рациональной.

Помимо этого при сварке токоотвода с решеткой может произойти искрообразование и на свариваемой поверхности могут остаться частички меди с электрода которые оставляют, так называемые, наплывы (накаты, включения) меди, выступающие над поверхностью пластины. Несмотря на то, что в соответствии с действующим технологическим процессом производится зачистка поверхностей сварного шва от следов меди, часть электродов с загрязнённым швом или частицами металлической меди, оставшихся в трещинах спечённого никелевого слоя, попадает на сборку аккумуляторов. Одного электрода с медными включениями достаточно, чтобы повредить весь полублок.

С целью повышения качества изготовления электродов предлагается усовершенствовать как его конструкцию, так и технологию его изготовления. Для этого предлагает-

ся решетку вместе с токоотводом выполнять цельной конструкции с соответствующей корректировкой технологии изготовления.

После фигурной вырубке пластины, необходимо выполнить ее обмазку карбо- нильным никелевым порошком, отжиг в печи в водородной среде и последующую прес- совку токоотвода до размера, обеспечивающего установку пластины в ячейку рис. 6.

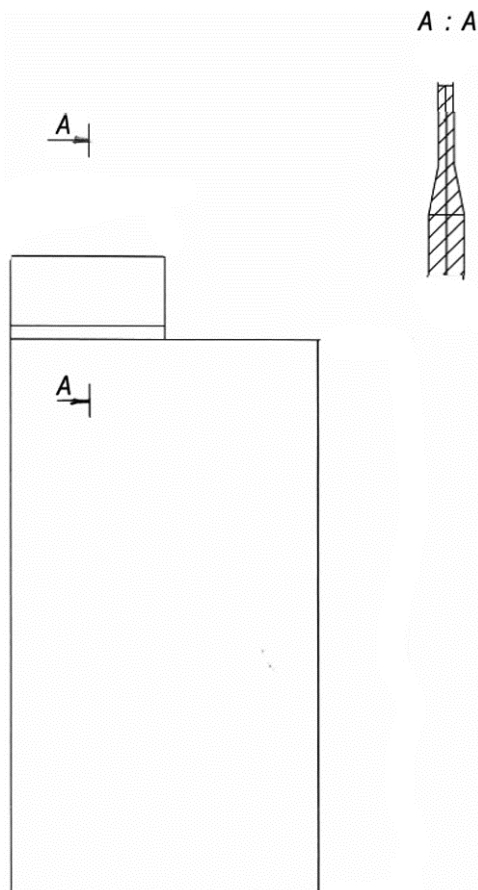


Рис. 6. Обжим токоотвода

Эта технология позволит повысить токоотдачу аккумуляторной сборки за счет увеличения площади поверхности активной массы в месте прессования кромки пластины. Таким образом, из технологического процесса будут исключены дополнительные операция резки ленты на токоотводы, прессование кромки пластины, сварки токоотводов с пластинами, зачистка сварного шва, что приведет к снижению как технологических расходов, уменьшению потребляемой электроэнергии и сокращению производственного цикла изготовления аккумуляторной батареи в целом.

Для отработки новой технологии изготовления ламелей предполагается провести ряд экспериментальных исследований с последующим внесением корректив в заводскую технологию производства аккумуляторных батарей.

Заключение

В статье показаны технологические особенности изготовления токоведущих элементов аккумуляторов, используемые в настоящее время и представлены предложения по совершенствованию этой технологии, которые позволят получить как технический, так и экономический эффект от ее использования.

Список источников

1. <https://msd.com.ua/proizvodstvo-elektricheskix-akkumulyatorov/osnovnye-chasti-akkumulyatorov/> 12.07.2023.
2. <https://akbinfo.ru/shhelochnye/shhelochnye-akkumuljatory.html> 12.07.2023.
3. Новый метод перфорации металлических лент роликовым инструментом [Текст] / А.Ф. Токарев, Г.Г. Иноземцев. – Саратов: Приволж. кн. изд-во, 1971. – 127 с.: ил.; 20 см.

Сведения об авторах

Бесчвертный Дмитрий Александрович – магистрант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Dmitry A. Beschvertny – Master's student, Department of Mechanical Engineering Technology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Васин Алексей Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexey N. Vasin – Dr. Sci. Tech., Professor Department of Mechanical Engineering Technology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 19.11.2023, принята к опубликованию 04.12.2023

Т.Г. Насад, Ю.П. Каднов

КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

Аннотация. Приведены исследования факторов, влияющих на качество поверхности деталей при электроэрозионной обработке. Исследовано распределение поверхностной микротвердости по глубине обрабатываемого материала. Выявлены зависимости микротвердости обрабатываемой поверхности и глубины залегания структуры с измененными физико-механическими свойствами.

Ключевые слова: качество поверхности, пресс-форма, электроэрозионная обработка, микротвердость, структурные превращения, температура

T.G. Nasad, Y.P. Kadnov

SURFACE QUALITY OF MOLD PARTS IN ELECTRIC EROSION MACHINING

Abstract. A research into the factors affecting the surface quality of parts during electric erosion machining is presented. Distribution of the surface microhardness over the depth of the treated material is investigated. Dependence of microhardness of the treated surface and depth of the structure on the altered physical and mechanical properties have been revealed.

Keywords: surface quality, mold, wire erosion treatment, microhardness, structural transformation, temperature

Введение

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) достаточно энергоемкий процесс, сопровождающийся высокими температурами и оказывающий влияние на поверхность формообразования [3-5, 10]. В результате воздействия тепловых импульсов на поверхность детали, происходят структурные изменения и формируется микрогеометрия поверхностного слоя [6-9].

Машиностроение

Тепловое воздействие на поверхность выше температуры A_{c3} приводит к структурному превращению перлита в аустенит с дальнейшим образованием мартенсита [11]. Если температура превышает значение A_{c1} , но ниже A_{c3} то образуется вторичный цементит.

Феррито-перлитная или цементито-перлитная структура образуется из-за нагрева поверхности детали ниже A_{c1} с последующим охлаждением. Значения критических точек представлены в таблице 1.

Приведенные структуры имеют следующие значения твердости: Мартенсит – 660НВ

Мартенсит + остаточный аустенит – 500НВ

Феррит + перлит – 350НВ

Феррит + цементит – 350НВ

Критические точки фазовых превращений сталей X12M и 40X13

Таблица 1

Марка материала	Критическая точка		
	A_{c1}	A_{c3}	Mn
X12M	810	860	225
40X13	821	870	270

Алгоритм определения микротвердости поверхности [3], включает следующие этапы:

1. Определение границы зоны расплавленного материала $u_{пл}$.
2. Расчет температур по глубине материала.
3. Прогнозирование вариантов образовавшейся структуры материала в зависимости от температур.

Формирование качества поверхности при ЭЭО

При нагреве в процессе ЭЭО поверхностного слоя, качество поверхности детали будет зависеть от внутренних напряжений, образующихся в результате интенсивного нагрева и структурных превращений.

На рис. 1 показан характер изменения температуры при ЭЭО. Участок I характеризует действие теплового источника в течении периода t . Интенсивный нагрев поверхностных слоев инструмента-электрода соответствует температуре плавления. Участок II длится $(3...5) t_u$ [11,12].

Следующий III участок характеризуется ликвидацией газовой полости $T_{гп}$. Далее следует быстрый процесс охлаждения поверхности лунки, IV участок кривой, где рабочая жидкость частично испаряется [12].

Участок V характеризует этап интенсивной теплоотдачи, который завершается конвективным теплообменом поверхности лунки с рабочей жидкостью на участке VI.

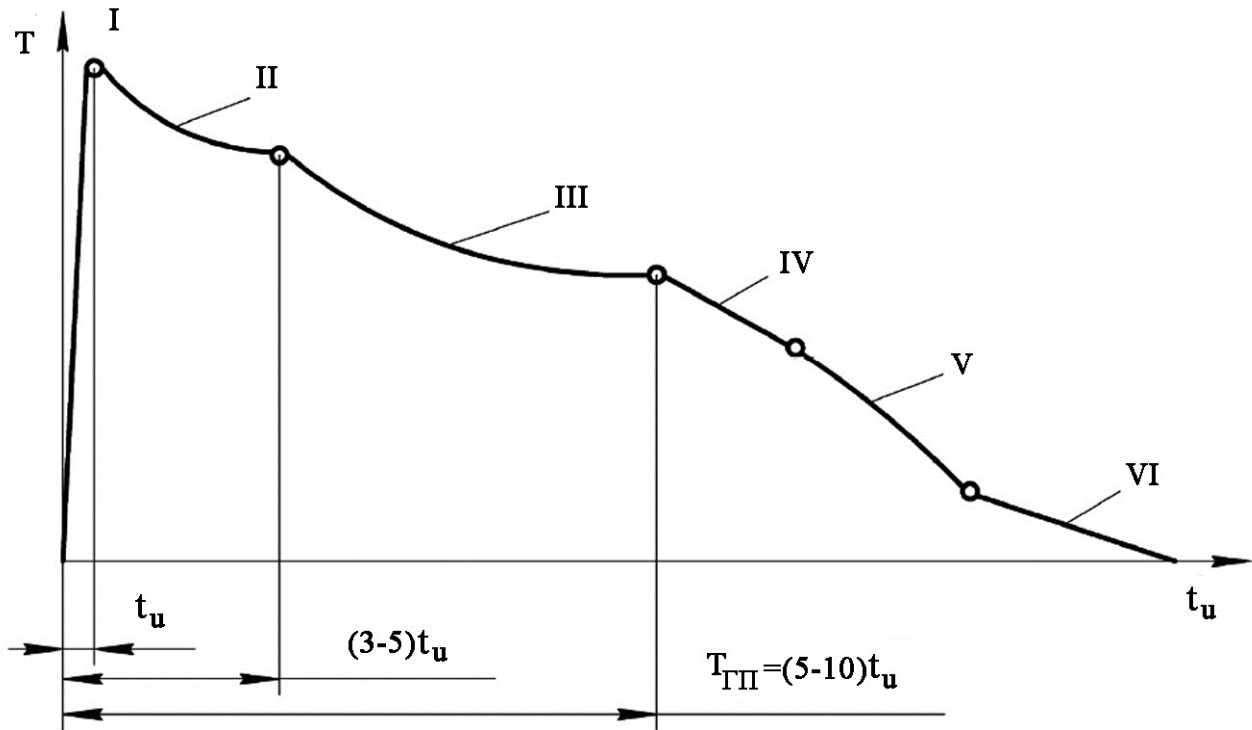


Рис. 1. Участки лунки с различной температурой

Разработана математическая модель ЭЭО заготовки из стали 38X2H2MA [12]. Зависимости температуры в зоне действия единичного импульса на границе радиуса действия плазмы и в центре разряда показаны на рис. 2. Исследования [1-3, 11, 12] показали, что температура от действия единичного импульса равного 200 мкс имеет максимальные значения.

Геометрия кратера, генерируемая в детали с использованием зависимо от времени действия источника теплоты, имеет форму чаши-кратера, то есть ширина больше чем глубина.

Глубина и ширина чаши во временном промежутке $t = 100...200$ мкс увеличиваются. При времени $t = 200$ мкс температурное воздействие в кратере достигает максимума, затем понижается.

Обычно при разработке теплофизической модели принимают ряд допущений [7], что величины теплофизических свойств обрабатываемых материалов постоянные, в частности при любой температуре для твердого и расплавленного веществ, тепловой источник принимают стационарным, действующим в течение импульса, не учитываю-

щим специфику конкретной схемы обработки. В результате возникают погрешности, превышающие 20-25 %.

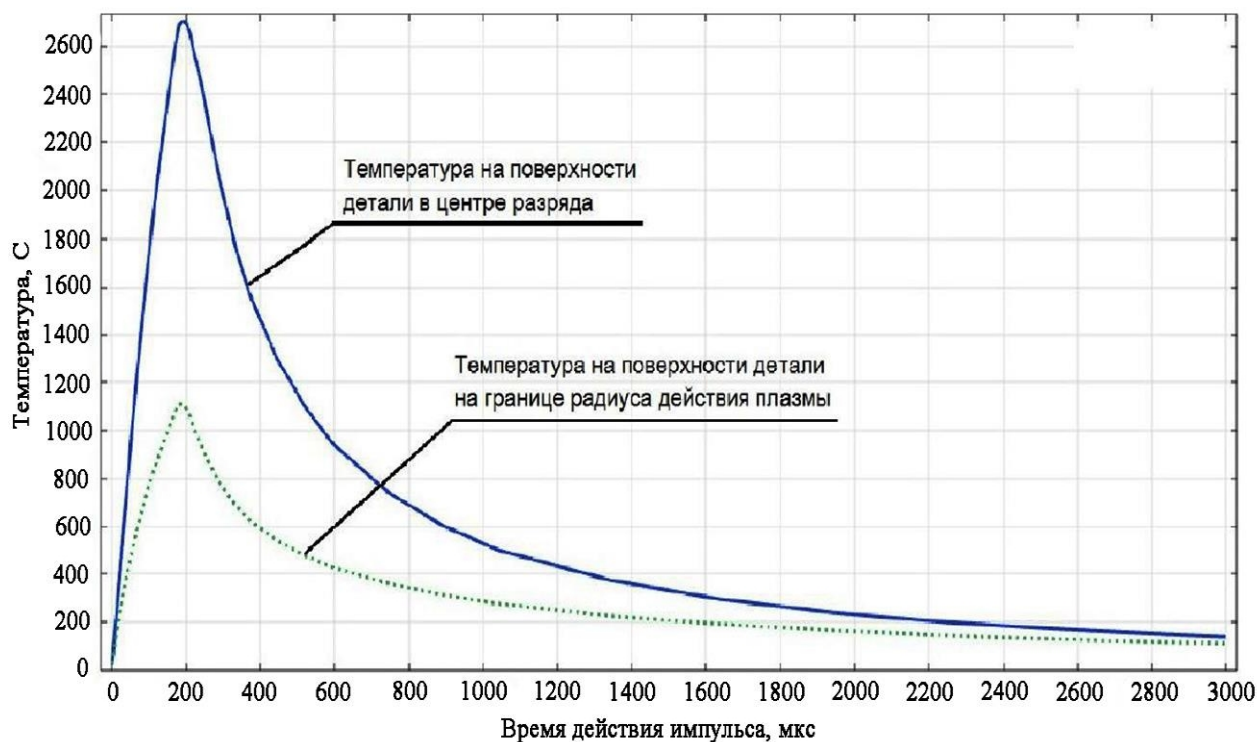


Рис. 2. График изменения температуры детали при воздействии единичного импульса

Важным фактором при формировании качества поверхности детали является микрогеометрия инструмента. Исследовалось влияние шероховатости рабочей части инструмента на шероховатость и производительность ЭЗО поверхности детали из стали 38Х2Н2МА.

Режимы обработки наплавленной поверхности детали медным электродом, обеспечивающие заданные параметры качества приведены в таблица 2.

Таблица 2

Режимы ЭЗО

Номер режима	$T_{оп}$, мкс	I_p , А	U, В	Заданная глубина обработки, мм
1	1	0,5	50	5
2	100	3	50	5
3	750	20	50	5

Структура поверхности наплавленной детали показана на рис. 3 [12].

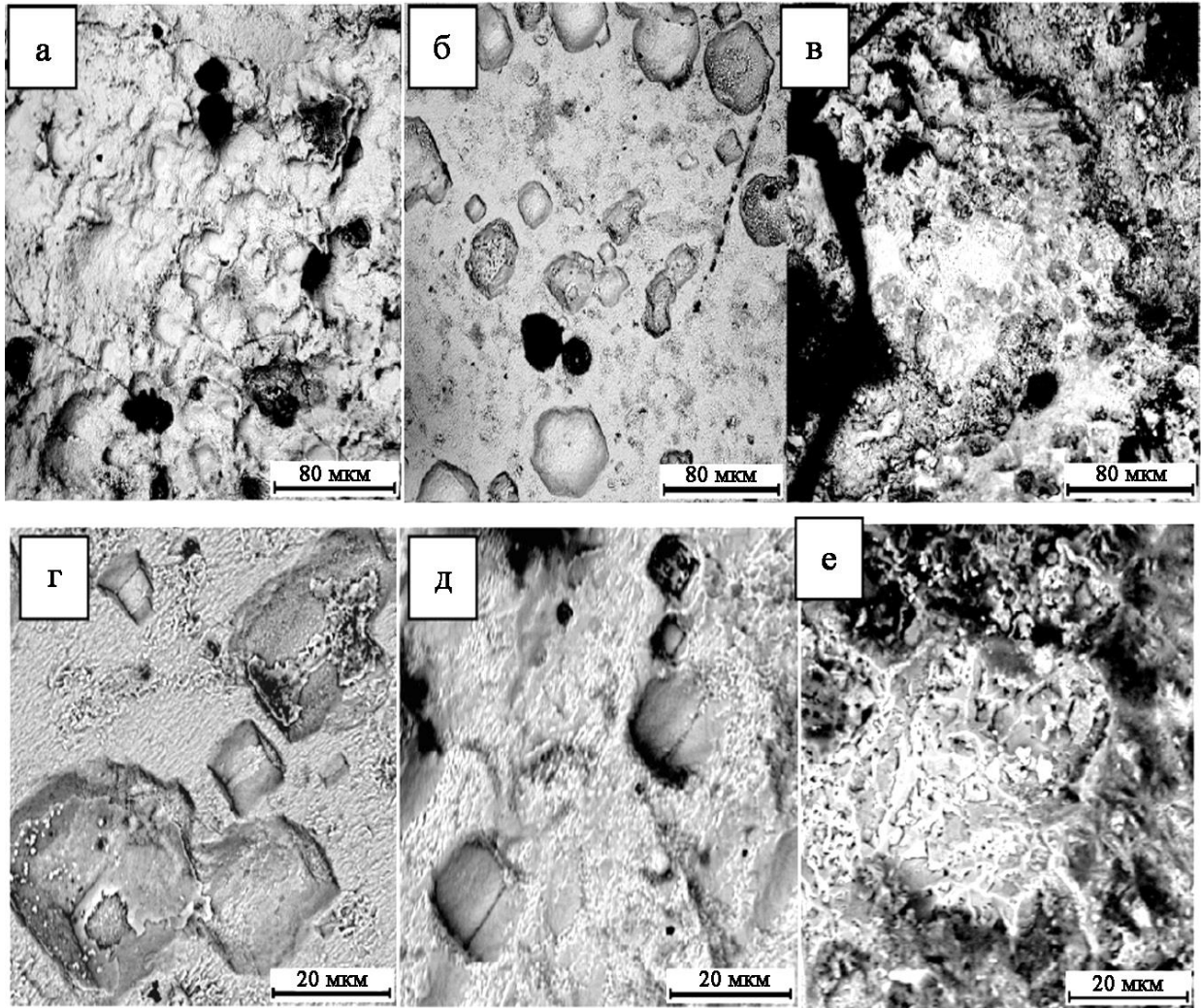


Рис. 3. Структура поверхности наплавленной детали.
а, г – чистовой режим, б, д – получистовой режим; в, е – черновой режим

В связи с тем, что конфигурация лунок на разных стадиях после обработки на чистовом режиме достаточно отличается друг от друга, необходимо провести дополнительные исследования по формированию шероховатости поверхности детали и разработать модель управления показателями качества.

Выводы

Исследования качества поверхности после ЭЭО требуют более детального подхода к повышению точности результатов и корректировке управляющего воздействия при формировании структуры и шероховатости поверхности. Для этого разработан алгоритм, учитывающий специфику ЭЭО и позволяющий минимизировать погрешности модели за счет схематизации тел и тепловых источников, корректировки значений коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры и решения задачи баланса теплоты при ЭЭО.

Список источников

1. Абляз Т.Р., Симонов М.Ю., Шлыков Е.С. Analysis of the surface of deposited copper after electroerosion treatment // *Metal Science and Heat Treatment*. 2018. Vol. 59. № 11-12. С. 779-785.
2. Абляз Т.Р., Симонов М.Ю., Шлыков Е.С. Анализ поверхности наплавленной меди после электроэрозионной обработки. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2017. № 12 (750). С. 37-43.
3. Surface Analysis of Bimetal After EDM Machining Using Electrodes with Different Physical and Mechanical Properties / Т.Р. Абляз, М.Ю. Симонов, Е.С. Шлыков, К.Р. Муратов // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016. Vol. 7. Iss. 5. С. 974-981.
4. Библиотечка электротехнолога. Вып. 2. Электроэрозионная обработка металлов: учеб. пособие / Е.М. Левинсон [и др.]. Л.: Машиностроение, 1971. 256 с.
5. Валетов В.А., Медунецкий В.В. Обеспечение качества поверхностей деталей на электроэрозионном оборудовании // *Научно технический вестник МГТУ*. 2012. С. 113-116.
6. Золотых Б.Н. Об открытии и развитии электроэрозионной обработки материалов // *Электронная обработка материалов*. 2003. № 3. С. 4-9.
7. Нгуен Т.З., Волгин В.М. Анализ влияния переменности теплофизических свойств обрабатываемого материала на форму и размеры лунки при электроэрозионной обработке // *Известия ТулГУ. Техн. науки*. 2018. Вып. 7. С. 18-27.
8. Насад Т.Г., Шеров К.Т., Насад И.П. Теплофизические аспекты гибридных технологий // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2020. № 1 (84). С. 47-52.
9. Цимбал А.Л. Лазерная закалка сталей. Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2010. 55 с.
10. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. Москва: Машиностроение, 1980. 184 с.
11. Шлыков Е.С., Абляз Т.Р. Изучение изменений в поверхностном слое электродов в процессе электроэрозионной обработки конструкционных материалов с содержанием хрома // *Электрофизические методы обработки в современной промышленности: сборник тезисов*. Пермь, 2017. С. 183-185.
12. Шлыков Е.С. Повышение эффективности электроэрозионной обработки изделий из сталей с высокотемпературной износостойкостью: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. Пермь: ФГБОУ ВО ПНИПУ, 2018. 127 с.

Сведения об авторах

Насад Татьяна Геннадиевна –
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Технология
машиностроения» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Tatyana G. Nasad –
Dr Sci. Tech., Professor,
Head: Department of Mechanical
Engineering Technology,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Каднов Юрий Павлович –
аспирант кафедры «Технология
машиностроения» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Yuri P. Kadnov –
Postgraduate student, Department
of Mechanical Engineering Technology,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Статья поступила в редакцию 07.10.2023, принята к опубликованию .12.12.2023

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

И.Н. Ганиев, Н.А. Аминова, А.Э. Бердиев, С.Дж. Алихонова

КОРРОЗИОННО-ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЦИНКОВОГО СПЛАВА ЦАМСв4-1-2,5, ЛЕГИРОВАННОГО БАРИЕМ, В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА NaCl

Аннотация. Потенциостатическим методом со скоростью развёртки потенциала $2\text{мВ}\cdot\text{с}^{-1}$ исследовано коррозионно-электрохимическое поведение цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5, легированного барием, в среде электролита NaCl. Показано, что добавка бария снижает скорость анодной коррозии исходного сплава ЦАМСв4-1-2,5 почти на 15-20 %. Увеличение концентрации хлорид-ионов способствует росту скорости анодной коррозии независимо от содержания бария в сплаве ЦАМСв4-1-2,5. При этом потенциалы коррозии и питтингообразования смещаются в положительную область значения.

Ключевые слова: цинковый сплав ЦАМСв4-1-2,5, барий, потенциостатический метод, анодное поведение, среда NaCl, скорость коррозии, потенциалы коррозии, питтингообразования, репассивации

I.N. Ganiev, N.A. Aminova, A.E. Berdiev, S.J. Alikhonova

CORROSION-ELECTROCHEMICAL BEHAVIOR OF CAMSv4-1-2,5 ZINC ALLOY DOPED WITH BARIUM IN NaCl ELECTROLYTE MEDIUM

Abstract. Corrosion-electrochemical behavior of barium-doped CAMSv4-1-2,5 zinc alloy in NaCl electrolyte has been investigated using the potentiostatic technique at the potential sweep rate of $2\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$. It is shown that addition of barium reduces the rate of anodic corrosion of the parent TsAMSV4-1-2,5 alloy by almost 15-20 %. An increase in the concentration of chloride ions enables an increase in the rate of anodic corrosion, regardless of the barium con-

tent in the TsAMSv4-1-2,5 alloy. In this case, the corrosion and pitting potentials shift towards the positive value.

Keywords: CAMSv4-1-2,5 zinc alloy, barium, potentiostatic method, anodic behavior, NaCl medium, corrosion rate, corrosion potential, pitting potential, repassivation potential

Введение

Сочетание физических, механических и химических свойств цинка определяет его широкое применение практически во всех областях техники, особенно в виде его сплавов с другими металлами. Цинк и его сплавы применяются практически во всех отраслях промышленности и эксплуатируются в условиях воздействия природных и искусственных сред, агрессивность которых определяется целым рядом факторов. В атмосфере и в газовых средах решающую роль играют влажность, температура, содержание кислорода и других окислительных компонентов.

Агрессивность коррозионной среды определяется его химическим составом, концентрацией, температурой, электропроводностью и скоростью потока. Цинк и его сплавы высокую коррозионную стойкость проявляют в интервале $\text{pH} = 6\div 12$. Это область при котором на поверхность цинка образуется стабильный гидроксид $\text{Zn}(\text{OH})_2$. При других значениях pH среды скорость коррозии цинка резко возрастает в результате нестойкости пассивирующей плёнки $\text{Zn}(\text{OH})_2$, растворения её и цинка с образованием ионов Zn^{2+} и ZnO_2^{2-} [1, 2].

Следует отметить, что границы областей pH , характеризующих механизм процесса разрушения цинка, зависит от многочисленных факторов типа температуры, состава среды, скорости потока и т. д. В природных средах, содержащих анионы, например Cl^- , SO_4^{2-} и др., пассивирующая роль плёнки $\text{Zn}(\text{OH})_2$ и др. проявляется слабо и в более узком интервале pH [3-5].

Достаточно высокая стойкость цинка в атмосферных условиях связана с образованием на его поверхности основных карбонатных плёнок $\text{ZnCO}_3 \cdot 3\text{Zn}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, которые создают барьер для диффузии воды с O_2 и CO_2 к поверхности реагирования металла [6, 7].

В воде процесс коррозии цинка и его сплавов идет преимущественно с электровосстановлением кислорода по суммарным реакциям: в кислой среде $\text{O}_2 + \text{H}^+ + 4\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$, в нейтральной и щелочной средах $\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- = 4\text{OH}^-$. В средах, где отсутствует кислород, процесс коррозии цинка протекает с восстановлением ионов водорода [8].

Известно, что благодаря целому ряду сочетаний свойств барий нашёл применение в промышленности, металлургии, электронике и т. д. При легировании барием в результате изменения структуры улучшаются механические свойства и повышается жаростойкость сплавов. В связи с тем, что механизм электрохимической коррозии сплавов цинка

в нейтральной среде электролита NaCl носит анодный характер, необходимо выявить параметры, определяющие данный процесс.

Материалы и методики исследования

Цель настоящей работы состоит в исследовании влияния добавки бария на коррозионно-электрохимическое поведение цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5 на основе низкосортного цинка ЦЗ в среде электролита NaCl. Известно использование аналога данного сплава ЦАМСв4-1-2,5 в приборостроении, полиграфической промышленности, авиации, автомобилестроении, судостроении, а также для литья анодов-протекторов, производства подшипников и гальванических элементов, как покрытия стальных листов [9].

Исследование проводилось потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме со скоростью развёртки потенциала 2 мВ/с. Электроды потенциодинамически анодно поляризовали от установившегося значения стационарного потенциала до резкого возрастания тока (до постоянного значения тока 1 А), затем в обратном направлении до значения потенциала – 1,5 В, при котором происходит восстановление оксидной пленки. Затем образцы снова поляризовали в положительном направлении до потенциала питтингообразования. Из полученных потенциодинамических кривых определяли основные электрохимические характеристики сплавов: потенциал коррозии $E_{кор.}$ и ток коррозии $i_{кор.}$, потенциалы питтингообразования $E_{п.о.}$ и репассивации $E_{реп.}$ (рис. 1) [10, 11].

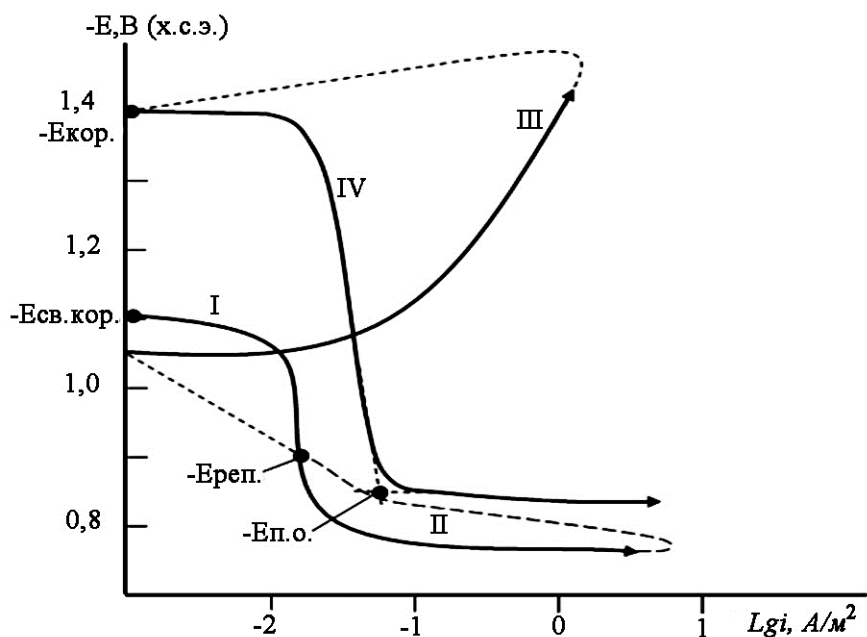


Рис. 1. Полная потенциодинамическая поляризационная (2 мВ/с) кривая цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5, в среде электролита 3 %-го NaCl. E – потенциал (В), i – плотность тока ($A \cdot m^{-2}$)

Величину $E_{\text{реп}}$ определяли графически как потенциал, при котором наблюдается первый перегиб на обратном ходе анодной кривой, или как потенциал, при котором происходит пересечение прямого и обратного хода анодной поляризационной кривой. Скорость коррозии определялась по формуле: $K = i_{\text{кор}} \cdot k$, где k – электрохимический эквивалент, численное значение которого для цинка составляет 1,22 г/А·ч. Воспроизводимость измерения электрохимических потенциалов равнялась ± 2 мВ, а плотность тока коррозии составляла $(0,001-0,005) \cdot 10^{-2}$ А/м². Подробная методика потенциостатического исследования сплавов приведена в работах [12, 13].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для проведения исследований первоначально был синтезирован базовый сплав ЦАМСв4-1-2,5 из лигатур на основе алюминия с барием. Сплавы для исследования были получены в шахтной печи электрического сопротивления СШОЛ в интервале температур 650-700° С из цинка марки Ц3 (ГОСТ 3640-94), алюминия марки А7 (ГОСТ 11069-2001), бария металлического марки БаМ1 (ТУ 48-4-465-85). Содержание бария в сплавах составляло 0,05; 0,1; 0,5; 1,0 мас.%. Взвешивание шихты производилось на аналитических весах АРВ-200 с точностью $0,1 \cdot 10^{-6}$ кг. Шихтовка сплавов проводилась с учётом угара металлов.

После разогрева печи до 700° С расплавляли алюминий и цинк, затем вводили барий в виде лигатуры с алюминием с содержанием бария 10 мас.%. После выдержки до 30 мин расплав тщательно перемешивали и удаляли шлак. Из каждой плавки отливали в графитовую изложницу стержни диаметром 8 мм и длиной 140 мм [9, 10].

Перед погружением образца в рабочий раствор его торцевую часть зачищали наждачной бумагой, полировали, обезжировали, травили в 10 %-м растворе NaOH, тщательно промывали спиртом и затем погружали в электролит NaCl для исследования. Исследование коррозионно-электрохимического поведения цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5, легированного барием проводилось в растворе хлорида натрия с концентрацией 0,03; 0,3 и 3,0 %, с помощью потенциостата ПИ-50.1.1 с выходом на программатор ПР-8 и самописцем ЛКД-4. Температура раствора в ячейке поддерживалась постоянная (20° С) с помощью термостата МЛШ-8.

Электродом сравнения служил хлорид-серебряный, вспомогательным – платиновый электрод.

Результаты исследования представлены в табл. 1, 2 и на рис. 1, 2. Потенциал свободной коррозии цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5 с различным содержанием бария независимо от концентрации электролита NaCl и времен смещается в положительную область в начальном этапе. Потенциал свободной коррозии у всех исследованных сплавов к 20-30 минутам приобретает постоянное значение.

Наибольший сдвиг потенциала наблюдается у сплава, содержащего 0,05 мас.% бария. Так, после 30 минут выдержки в растворе электролита 3 %-го NaCl величина потенциала свободной коррозии сплава, содержащего 0,05 мас.% бария равняется – 1,044 В. Подобная тенденция имеет место во всех трёх средах электролита NaCl (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Временная зависимость потенциала свободной коррозии ($-E_{св.кор.}$, В)
цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5 от содержания бария в средах 0,03 %-го
(числитель) и 3 %-го (знаменатель) электролита NaCl

Время выдержки, мин	Содержание бария в сплаве, мас. %				
	0,0	0,005	0,05	0,1	0,5
0	1,165	<u>1,108</u> 1,140	<u>1,092</u> 1,130	<u>1,082</u> 1,118	<u>1,065</u> 1,102
<u>0,15</u>	1,150	<u>1,098</u> 1,033	<u>1,080</u> 1,120	<u>1,070</u> 1,109	<u>1,057</u> 1,093
<u>0,2</u>	1,137	<u>1,089</u> 1,126	<u>1,071</u> 1,111	<u>1,062</u> 1,100	<u>1,050</u> 1,085
0,3	1,126	<u>1,079</u> 1,118	<u>1,064</u> 1,103	<u>1,055</u> 1,093	<u>1,044</u> 1,077
0,4	1,115	<u>1,071</u> 1,110	<u>1,057</u> 1,095	<u>1,047</u> 1,086	<u>1,039</u> 1,070
2	1,096	<u>1,050</u> 1,089	<u>1,040</u> 1,075	<u>1,030</u> 1,066	<u>1,024</u> 1,050
3	1,090	<u>1,044</u> 1,083	<u>1,035</u> 1,069	<u>1,025</u> 1,060	<u>1,019</u> 1,045
4	1,085	<u>1,044</u> 1,077	<u>1,035</u> 1,064	<u>1,025</u> 1,055	<u>1,019</u> 1,040
5	1,080	<u>1,034</u> 1,072	<u>1,026</u> 1,060	<u>1,015</u> 1,050	<u>1,009</u> 1,035
10	1,076	<u>1,030</u> 1,067	<u>1,022</u> 1,056	<u>1,011</u> 1,045	<u>1,004</u> 1,031
20	1,073	<u>1,026</u> 1,063	<u>1,018</u> 1,053	<u>1,007</u> 1,041	<u>1,000</u> 1,027
30	1,070	<u>1,023</u> 1,059	<u>1,015</u> 1,050	<u>1,004</u> 1,037	<u>0,996</u> 1,024
40	1,068	<u>1,021</u> 1,056	<u>1,013</u> 1,047	<u>1,002</u> 1,034	<u>0,993</u> 1,022
50	1,066	<u>1,020</u> 1,055	<u>1,011</u> 1,045	<u>1,000</u> 1,032	<u>0,991</u> 1,021
60	1,064	<u>1,020</u> 1,055	<u>1,010</u> 1,044	<u>1,000</u> 1,032	<u>0,990</u> 1,020

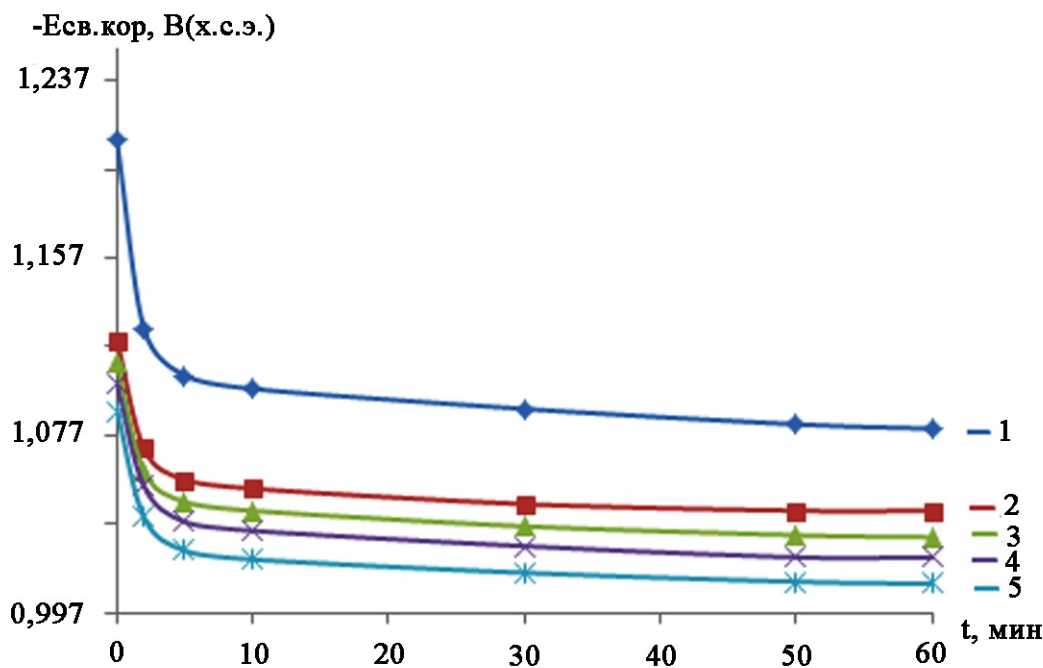


Рис. 2. Временная зависимость потенциала свободной коррозии ($-E_{\text{св.кор.}}$, В) сплава ЦАМСв4-1-2,5(1), содержащего барий, мас. %: 0,05(2); 0,1(3); 0,5(4); 1,0(5), в среде 0,3 %-го NaCl

Электрохимические характеристики исследованных сплавов в вышеуказанных условиях при подаче внешнего источника тока изменяются следующим образом: в целом потенциал коррозии смещается в область положительных значений. Сплав, содержащий 0,5 мас. % бария, характеризуется самым положительным значением потенциала свободной коррозии (табл. 1).

В табл. 2 приведены коррозионно-электрохимические характеристики цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5, легированного барием, в среде электролита NaCl. Видно, что потенциалы питтингообразования и репассивации при легировании барием также растут. Смещение электрохимических потенциалов в положительную область сопровождается уменьшением плотности тока коррозии (табл. 2).

С увеличением концентрации хлорид-иона все электрохимические потенциалы смещаются в отрицательную область, что свидетельствует о снижении коррозионной стойкости цинкового сплава с ростом агрессивности коррозионной среды. Данная зависимость подтверждается расчётом скорости коррозии (K) посредством плотности тока коррозии ($i_{\text{кор.}}$) из катодной ветви потенциодинамических кривых [15].

Как видно из табл. 2, добавки бария до 0,5 мас. % во всех исследованных средах плавно снижают скорость коррозии исходного сплавов, в частности в среде 0,03 %-го NaCl от $92,73 \cdot 10^{-3}$ до $79,30 \cdot 10^{-3}$ г/м²·ч. На рис. 2 представлены анодные ветви поляризационных кривые цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5, легированного барием, в среде элек-

тролита хлористого натрия. Как видно, анодные кривые, относящиеся к сплавам, содержащим барий, располагаются в области положительных потенциалов, т. е. левее кривой базового сплава ЦАМСв4-1-2,5, что свидетельствуют об их анодной устойчивости. Из полученных анодных кривых были определены величины потенциалов коррозии, питтингообразования и пассивации, которые обобщены в табл. 2.

В разбавленных хлорид-ионами растворах сплавы, легированные барием, более пассивны и показывают высокую устойчивость к коррозионным разрушениям, о чём свидетельствует сдвиг $E_{кор}$ и $E_{п.о.}$ в область положительных потенциалов по мере разбавления раствора (табл. 2).

Таблица 2

**Коррозионно-электрохимические характеристики
цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5, легированного барием, в среде электролита NaCl**

Электролит NaCl, мас. %	Содержание бария в сплаве, мас. %	Электрохимические потенциалы, В (х.с.э.)				Скорость коррозии	
		$-E_{св.кор.}$	$-E_{кор.}$	$-E_{п.о.}$	$-E_{реп.}$	$i_{кор.} \cdot 10^2$ А/м ²	$K \cdot 10^3$ г/м ² ·ч
0,03	–	1,064	1,325	0,800	0,870	0,076	92,72
	0,05	1,020	1,278	0,750	0,839	0,071	86,62
	0,1	1,010	1,265	0,739	0,827	0,069	84,18
	0,5	1,000	1,250	0,722	0,815	0,067	81,74
	1,0	0,990	1,237	0,704	0,806	0,065	79,30
0,3	–	1,080	1,341	0,835	0,890	0,090	109,8
	0,05	1,043	1,289	0,802	0,864	0,085	103,7
	0,1	1,031	1,274	0,790	0,854	0,083	101,2
	0,5	1,022	1,258	0,781	0,850	0,081	98,82
	1,0	1,010	1,247	0,769	0,843	0,079	96,38
3,0	–	1,103	1,400	0,850	0,900	0,102	124,4
	0,05	1,055	1,356	0,811	0,863	0,094	114,6
	0,1	1,044	1,342	0,800	0,856	0,092	112,2
	0,5	1,032	1,328	0,790	0,847	0,090	109,8
	1,0	1,020	1,311	0,779	0,839	0,088	107,3

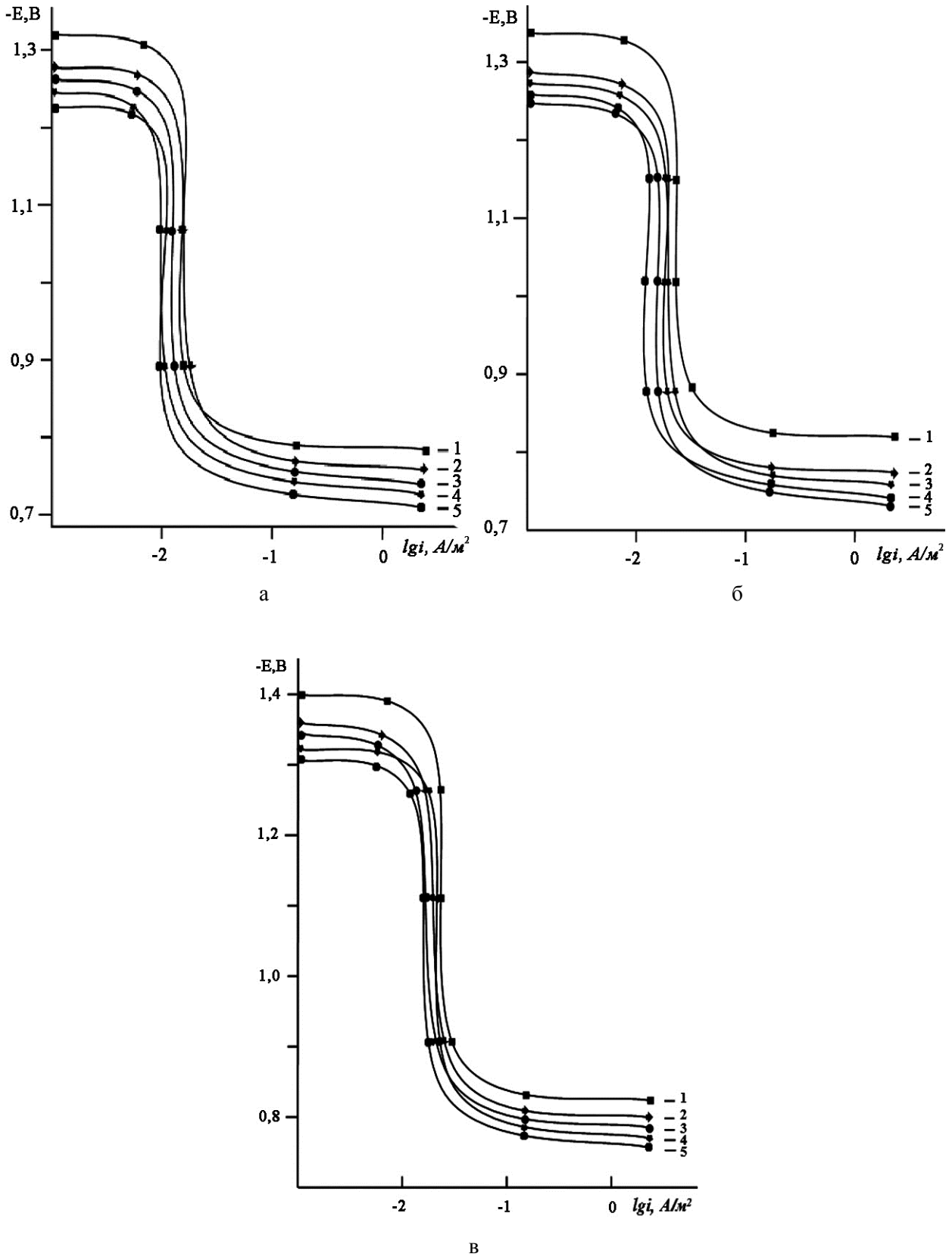


Рис. 2. Потенциодинамические анодные поляризационные кривые (2 мВ/с) сплава ЦАМСв4-1-2,5 (1), содержащего барий, мас. %: 0,005(2); 0,05(3); 0,1(4); 0,5(5) в среде электролита 0,03 %(а), 0,3 %(б) и 3 %-го NaCl (в)

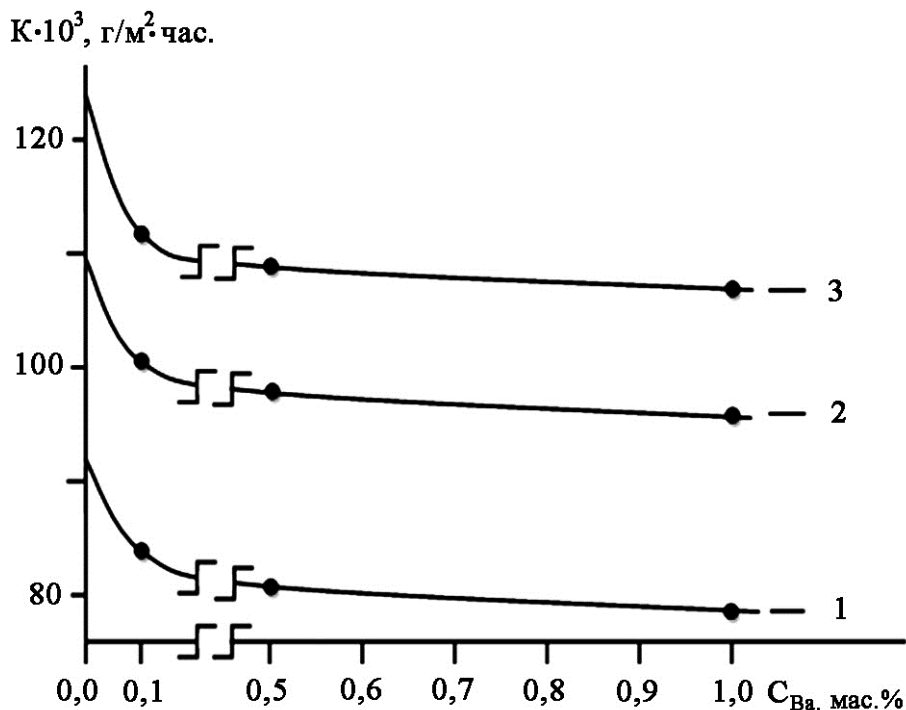


Рис. 4. Зависимость скорости коррозии цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5 от концентрации бария, в среде электролита 0,03 %(1); 0,3 %(2) и 3,0 %-го NaCl (3)

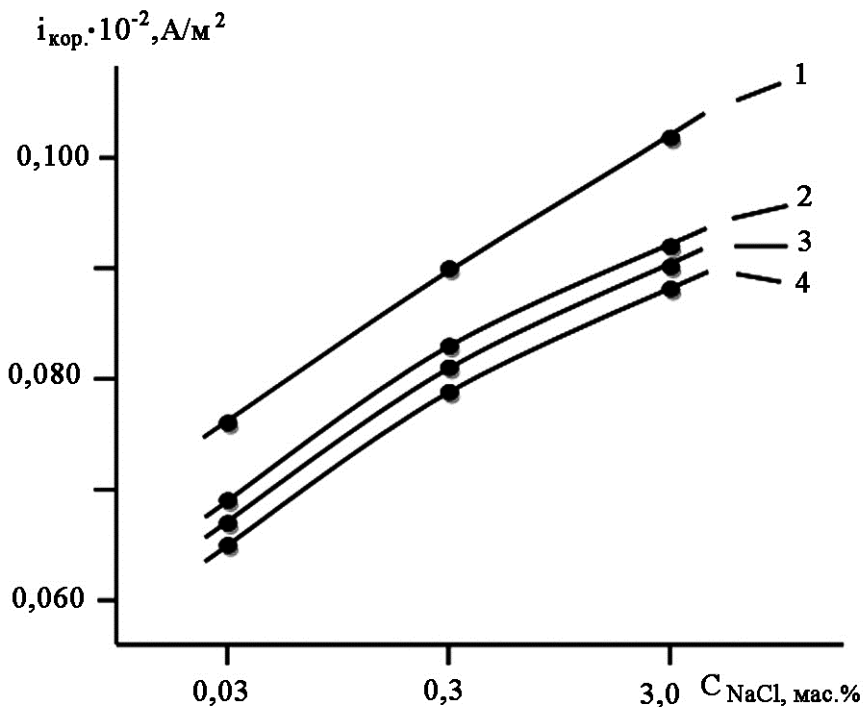


Рис. 5. Зависимость плотности тока коррозии цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5 (1), содержащего барий, мас. %: 0,05 (2); 0,5 (3); 1,0 (4); от концентрации NaCl

Рост концентрации бария в сплаве ЦАМСв 4-1-2,5 способствует уменьшению скорости его коррозии во всех исследованных средах (рис. 4). От содержания хлорид-иона в электролите наблюдается рост скорости коррозии сплавов (рис. 5).

Заключение

Установлено, что легирование 0,5 мас. % барием уменьшает скорость коррозии сплава ЦАМСв4-1-2 в среде электролита NaCl на 12-15 %. При этом, с ростом концентрации легирующего компонента отмечается смещение в положительную область потенциалов свободной коррозии, питтингообразования и репассивации. Повышение концентрации хлорид-иона в электролите способствует уменьшению потенциалов свободной коррозии, питтингообразования и репассивации сплавов и увеличению скорости их коррозии.

Список источников

1. Синявский В.С., Вальков В.В., Калинин В.Д. Коррозия и защита алюминиевых сплавов. Москва: Металлургия, 1986. 368 с.
2. Сафарова Ф.Р., Ганиев И.Н., Обидов З.Р. Анодное поведение сплава Zn+0,5 %Al, легированного таллием, в среде электролита NaCl // Проблемы материаловедения в Республике Таджикистан: сб. материалов Респ. науч.-практ. конф. Душанбе, 2016. С. 77-76.
3. Архипов П.А., Холкина А.С., Зайков Ю.П. Анодные процессы на жидкометаллическом электроде из сплавов свинца // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9. № 2-1. С. 386-388.
4. Григорьева И.О., Дресвянников А.Ф. Анодное поведение алюминия в нейтральных электролитах // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 7. С. 326-332.
5. Кечин В.А., Люблинский Е.Я. Цинковые сплавы. Москва: Металлургия, 1986. 245 с.
6. Анодная активация и пассивация алюминия в водных средах, содержащих галогенид-ионы / И.О. Григорьева, А.Ф. Дресвянников, Л.Р. Хайруллина, И.О. Михалишин // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. Вып. 24. С. 225-230.
7. Низкотемпературное уплотнение анодно-оксидных покрытий на деталях из алюминиевых сплавов / С.А. Каримова, А.Е. Кутырев, Т.Г. Павловская, К.Е. Захаров // Авиационные материалы и технологии 2014. № 4. С. 9-17.
8. Теплофизические свойства и термодинамические функции сплава Zn5Al, легированного скандием / З.Р. Обидов, Ф.Р. Сафарова, И.Н. Ганиев, А.В. Амонова // Технология комплексной переработки полезных ископаемых Таджикистана: материалы Респ. науч.-практ. конф. / Горнометаллургический институт Таджикистана. Бустон, 2016. С. 65-67.

9. Каримова С.А., Павловская Т.Г., Петрова А.П. Подготовка поверхности алюминиевых сплавов с применением анодного оксидирования // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. № 4. С. 34-38.

10. Алиханова С.Д., Обидов З.Р., Ганиев И.Н. Анодное поведение сплавов Zn5Al и Zn55Al с РЗМ цериевой подгруппы: монография. Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2014. 240 с.

11. Обидов З.Р., Ганиев И.Н. Анодные защитные цинк-алюминиевые покрытия с элементами II группы: монография. Германия: Изд. дом LAP LAMBERT Academic Publishing. 2014. – 240 с.

12. Алиев Дж.Н., Обидов З.Р., Ганиев И.Н. Цинк-алюминиевые защитные покрытия нового поколения. Физико-химические свойства цинк-алюминиевых сплавов с щелочноземельными металлами. Германия: Изд. дом LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013.

13. Ганиев И.Н., Алиев Дж.Н., Нарзуллоев З.Ф. Влияние добавок никеля на анодное поведение цинково-алюминиевых сплавов Zn N5Al, ZnN55Al в среде электролита NaCl // Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92. № 11. С. 1420-1426.

14. Коррозионно-электрохимическое поведение алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (алдрей) с оловом в среде электролита NaCl / И.Н. Ганиев, А.П. Абулаков, Д.Х. Джайлоев, Ф.А. Алиев, А.Р. Рашидов // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2019. Т. 22. № 2. С. 128-134.

Сведения об авторах

Ганиев Изатулло Наврузович – доктор химических наук, академик НАН Таджикистан, профессор кафедры «Химия и биология» Российско-Таджикского (Славянского) университета

Izatullo N. Ganiev – Dr.Sc. (Chemistry), Academician, Professor, Department of Chemistry and Biology, Russian-Tajik Slavonic University

Аминова Нигора Аминовна – заведующий лабораторией «Материаловедение» ГУ «Центр по исследованию инновационных технологий НАН Таджикистана»

Nigora A. Aminova – Ph.D., Head of Materials Science Laboratory, Center for Research of Innovative Technologies at the National Academy of Sciences of Tajikistan, Republic of Tajikistan

Бердиев Асадкул Эгамович –
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Химия и биология»
Российско-Таджикского
(Славянского) университета

Asadkul E. Berdiev –
Dr. Sci. Tech., Professor,
Head: Department
of Chemistry and Biology,
Russian-Tajik Slavonic University

Алихонова Сурайё Джамшедовна –
кандидат химических наук, старший
преподаватель кафедры «Химия
и биология» Российско-Таджикского
(Славянского) университета

Surayo D. Alikhonova –
PhD (Chemistry), Senior Lecturer,
Department of Chemistry and
Biology, Russian-Tajik
Slavonic University

Статья поступила в редакцию 25.06.2023, принята к опубликованию 12.12.2023

**Н.А. Яковлев, Е.В. Плакунова, Н.Л. Левкина,
В.И. Деревякин, А.С. Нуртазина**

**ИЗУЧЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ МОДИФИКАЦИИ
АМИНОСИЛАНОМ АГМ-9 ЭПОКСИДНОГО
СВЯЗУЮЩЕГО И ДИСПЕРСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ**

Аннотация. Изучено влияние аминсилана АГМ-9 на структуру и свойства полифосфата аммония и натрия кремнефтористого, используемых в качестве дисперсных наполнителей для эпоксидных композиций. Изучена морфология наполнителей по отдельности и в матрице эпоксидного композита при помощи сканирующей электронной микроскопии с детектором рентгеновского энергодисперсионного анализа. Показано влияние модифицированных наполнителей на физико-механические и эксплуатационные свойства композитов на их основе.

Ключевые слова: натрий кремнефтористый, полифосфат аммония, морфология, структура, свойства, эпоксидное связующее, композит

**N.A. Yakovlev, E.V. Plakunova, N.L. Levkina,
V.I. Derevyakin, A.S. Nurtazina**

**PROSPECTS FOR MODIFICATION
OF EPOXY BINDER AND DISPERSED FILLERS
USING AGM-9 AMINOSILANE**

Abstract. Effect of AGM-9 aminosilane on the structure and properties of ammonium polyphosphate and sodium silicofluoride used as dispersed fillers for epoxy compositions has been studied. Morphology of the fillers was studied separately and in the epoxy composite matrix using scanning electron microscopy with an X-ray energy dispersion analysis detector. The influence of the modified fillers on the physico-mechanical and operational properties of the composites is shown.

Keywords: sodium silicofluoride, ammonium polyphosphate, morphology, structure, properties, epoxy binder, composite

Введение

Полимерные композиционные материалы в настоящее время занимают одно из лидирующих мест и используются практически во всех отраслях промышленности. С каждым годом использование таких материалов растет вместе с возможностями их применения.

Для создания композитов на основе эпоксидных связующих эффективно введение замедлителей горения и наполнителей.

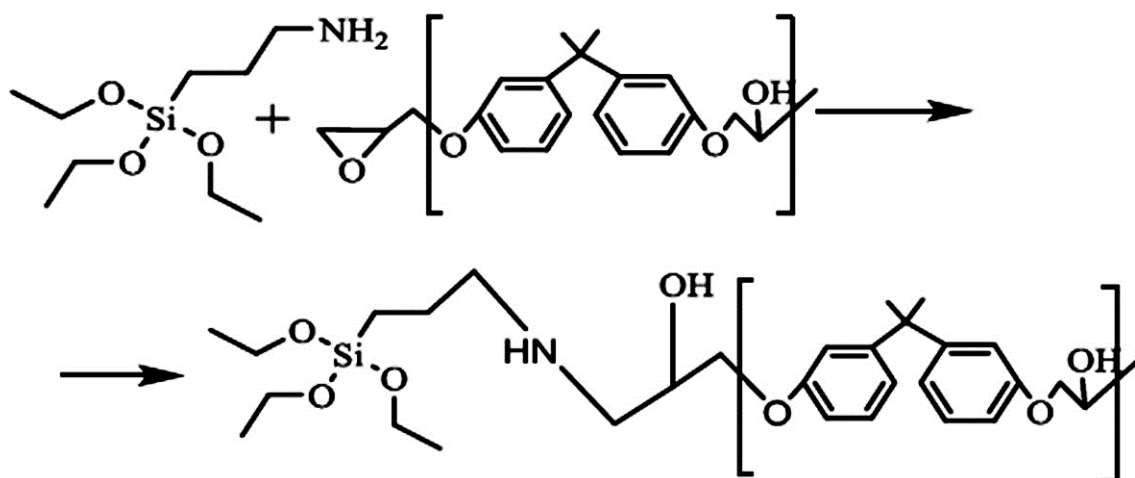
Большая часть полимеров модифицируется дорогостоящими наполнителями, которые не могут обеспечить надлежащих свойств ПКМ для современного производства. В то же время существует возможность применения наполнителей, являющихся побочными продуктами различных производств.

Поэтому целью работы является изучение возможности использования в качестве наполнителя побочного продукта химических производств, что обеспечит расширение ассортимента наполнителей для ПКМ, снижение стоимости получаемых материалов и позволит направленно регулировать свойства полимерных матриц, а также влияние аminosилана АГМ-9 на свойства наполнителей.

В работе в качестве наполнителей эпоксидной диановой смолы марки ЭД-20 использовались: кремнефтористый натрий (КФН) – побочный продукт фосфорной кислоты и полифосфат аммония (ПФА) – неорганическая соль фосфорной кислоты.

Известно [1-3], что АГМ-9 применяется для направленного регулирования структуры и свойств полимерных композитов. В работе исследовано влияние аminosилана как на эпоксидное связующее, так и на наполнители.

При совмещении ЭД-20 с АГМ-9 может протекать реакция между аминной группой аminosилана и эпоксидным кольцом смолы:



Анализ ИК-спектров смеси АГМ-9 и ЭД-20, выдерживаемой при комнатной температуре (рис. 1), показал, что через сутки после их смешения изменений интенсивности поглощения эпоксидного кольца в области 917 см^{-1} не происходит.

Через 7 суток наблюдается снижение интенсивности пика поглощения, соответствующего эпоксидному кольцу, примерно на 33 % от величины пика эпоксидного кольца, соответствующего составу сразу после смешения исходных компонентов. При этом изменяются интенсивности наиболее характерных пиков эпоксидной смолы: валентных колебаниями ароматического кольца в области 1508 см^{-1} , валентными симметрическими колебаниями С-О-С в области 1032 см^{-1} и колебаниями ароматического кольца (840 см^{-1}). Это подтверждает наличие взаимодействия между аминными группами АГМ-9 и эпоксидными ЭД-20, однако этот процесс идет относительно медленно в системе без отвердителя.

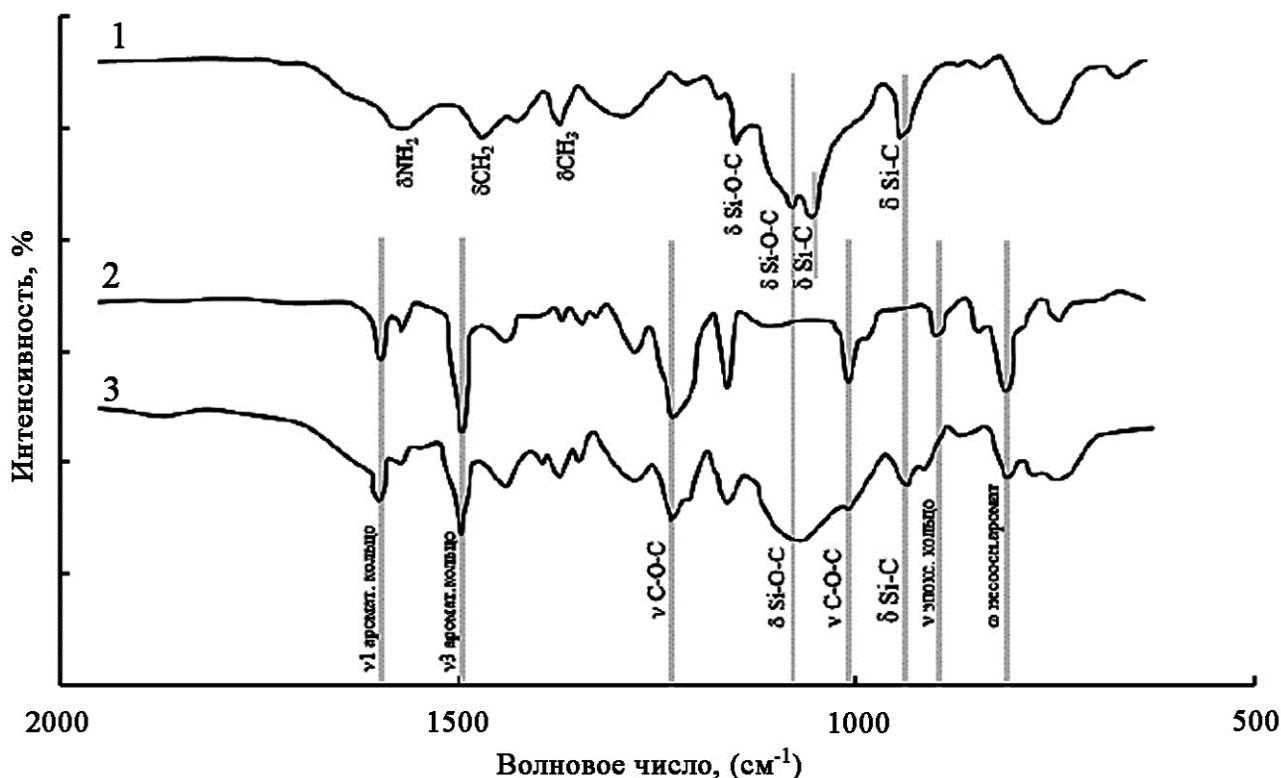


Рис. 1. ИКС эпоксидного олигомера, модифицированного АГМ-9:

- 1 – АГМ-9; 2 – не отвержденная смола ЭД-20;
- 3 – смесь АГМ-9 и ЭД-20, выдержанная 7 суток

Для снижения агломерации частиц наполнителей, а также для улучшения взаимодействия наполнителей с олигомером в качестве модификатора применяли раствор АГМ-9. После модификации наполнитель проходит стадию сушки (50° C).

Исследование методом СЭМ модифицированных аminosиланом наполнителей (рис. 2) показало, что в результате обработки АГМ-9 на их поверхности образуется пленка аппрета (рис. 2, б, д).

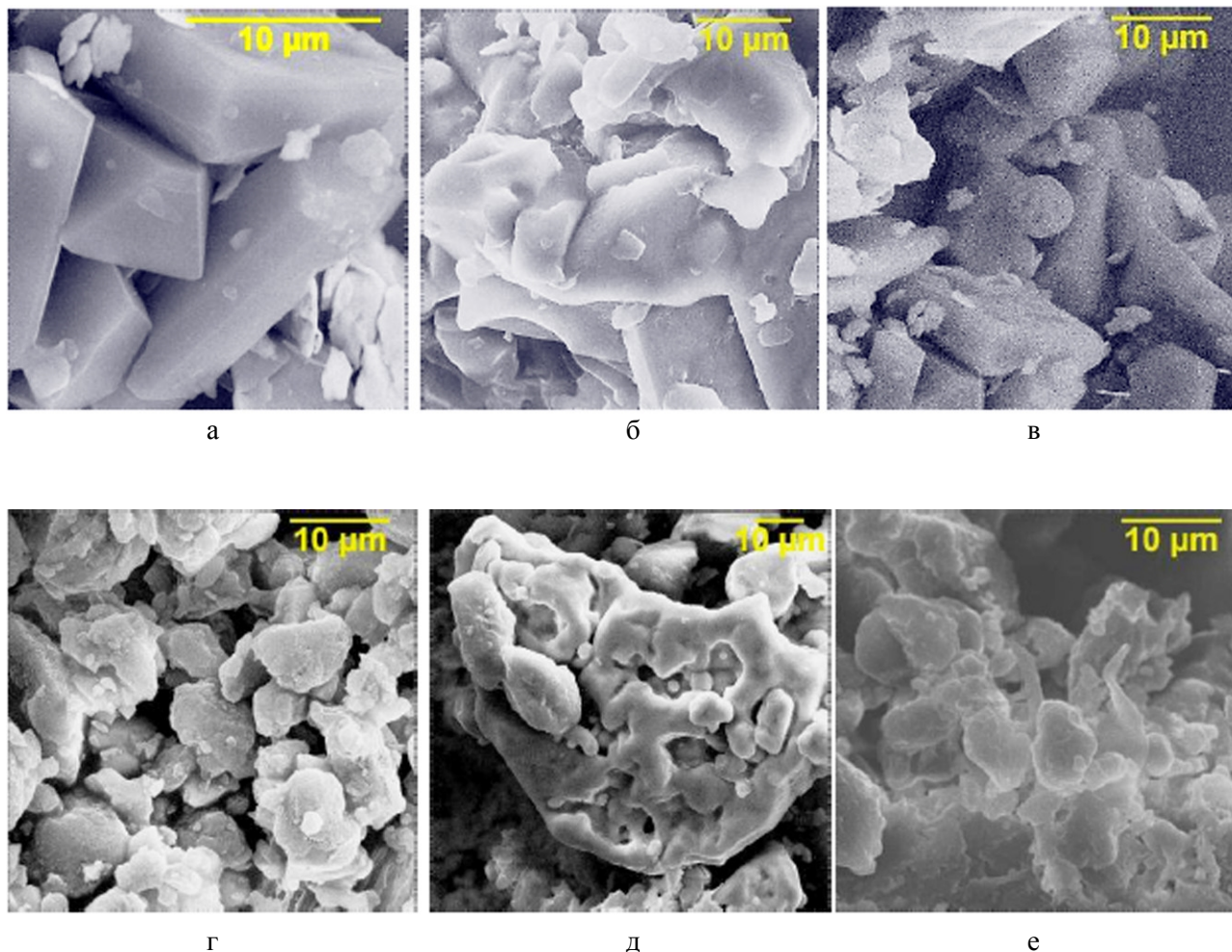


Рис. 2. Данные СЭМ наполнителей ($\times 5000$):
а, г – немодифицированные; б, д – модифицированные;
в, е – модифицированные через 120 суток хранения

Как видно из приведенных данных, эффект от модификации ПФА и КФН (рис. 2, в, е) сохраняется до 120 суток, что обеспечивает возможность хранения и транспортировки наполнителя. Эффект от модификации обработанных АГМ-9 наполнителей проявляется при определении размера частиц из гранулометрического состава методом ситового анализа (рис. 3) и определении насыпной плотности наполнителей до и после аппретирования. Из приведенных данных видно, что обработка частиц наполнителей АГМ-9 снижает их склонность к агрегированию и размер частиц наполнителя, вводимых в состав, заметно снижается (кривые 3, 4). При этом проявляется тенденция

к увеличению насыпной плотности для КФН с 0,98 до 1,1 г/см³, а ПФА – 0,62 до 0,92 г/см³. В дальнейшем для наполнения эпоксидного связующего использовали частицы размером до 40 мкм.

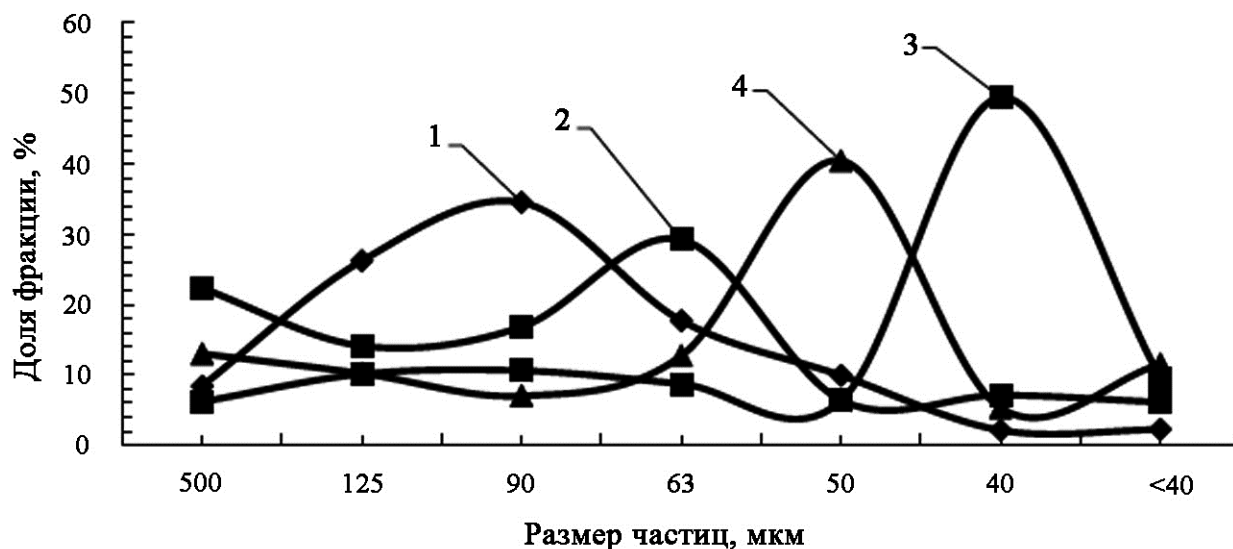


Рис. 3. Гранулометрический состав наполнителей: 1 – ПФА; 2 – КФН, немодифицированные; 3 – ПФА(М); 4 – КФН(М), модифицированные АГМ-9

Анализ влияния аппретированных наполнителей на реологические свойства эпоксидной композиции состава 100ЭД-20+40ПО-300+30ТФФ (рис. 4) показал, что динамическая вязкость составов со смесью модифицированных наполнителей снижается более чем в 1,5 раза. Это является еще одним положительным результатом модификации наполнителей.

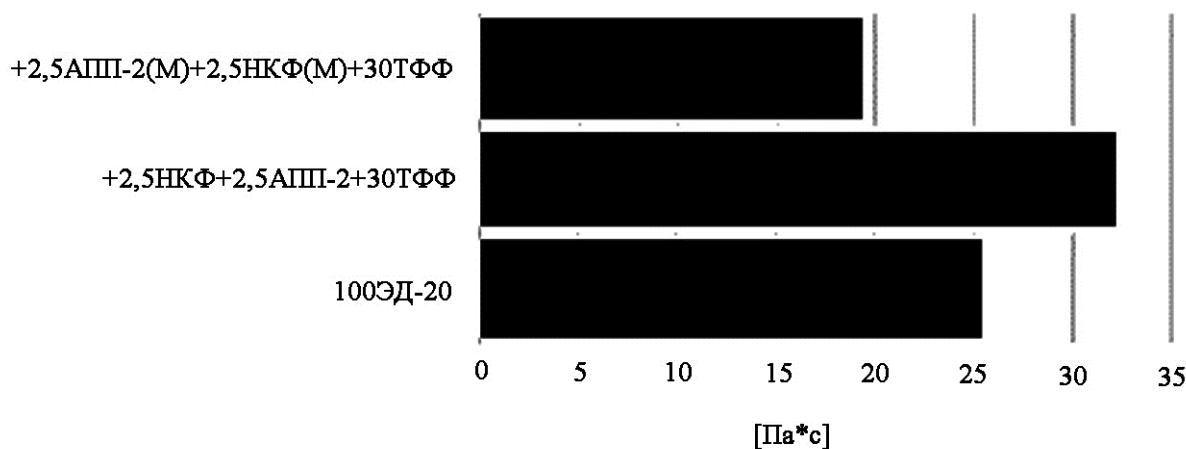


Рис. 4. Динамическая вязкость исследуемых составов, масс. ч.

Исследование структурных особенностей отвержденных составов методом СЭМ (рис. 5) показало, что образцы эпоксидных композитов, содержащих модифицированные АГМ-9 ПФА (М) или КФН(М), имеют равномерное распределение наполнителей по всему объёму эпоксидной матрицы. При этом следует отметить, что ее слоевая структура не нарушена.

Комплексное влияние АГМ-9 на гранулометрический состав модифицированных наполнителей, технологические свойства эпоксидных композиций и структурные особенности отвержденных композитов обеспечивает повышение прочностных характеристик эпоксидных композиционных материалов на их основе (таблица). При этом отмечен рост значений изгибающего напряжения от 8 до 28 МПа, а также ударной вязкости с 33 до 39 кДж/м².

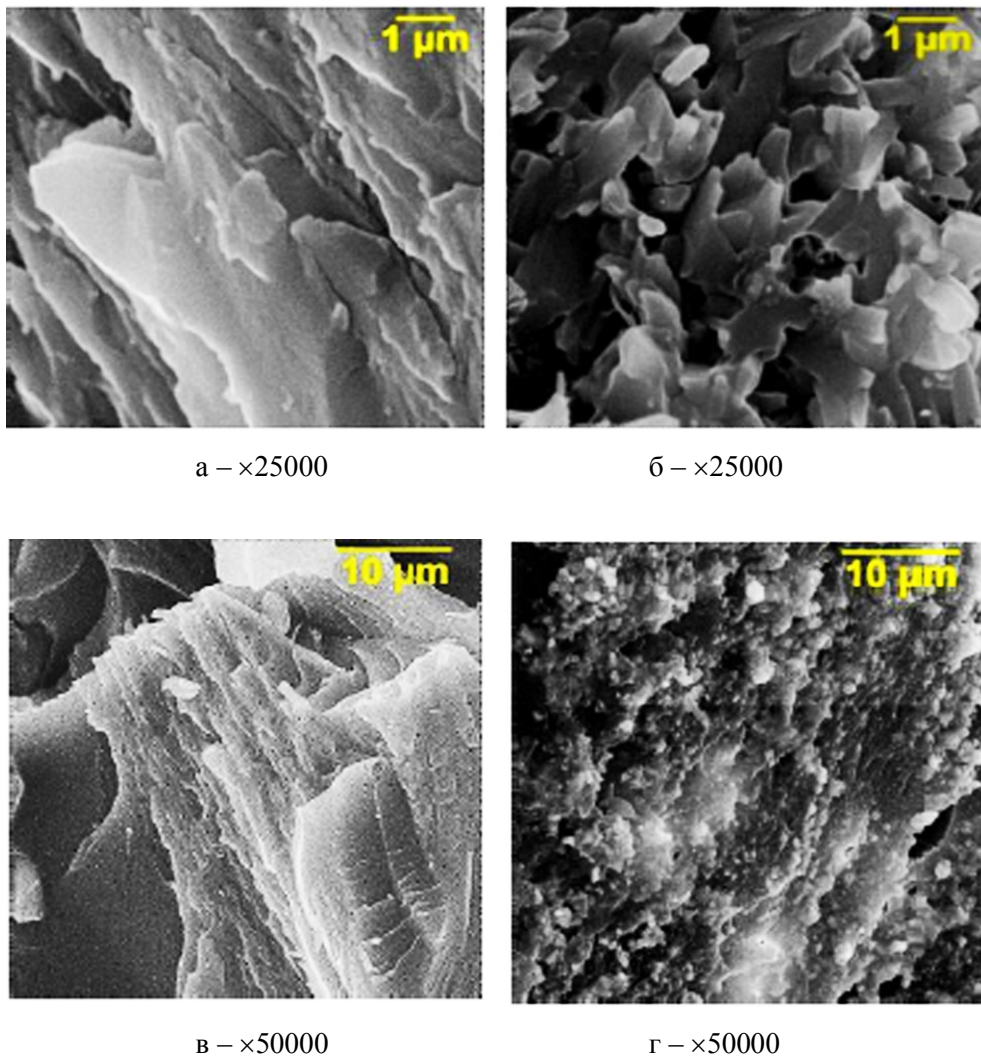


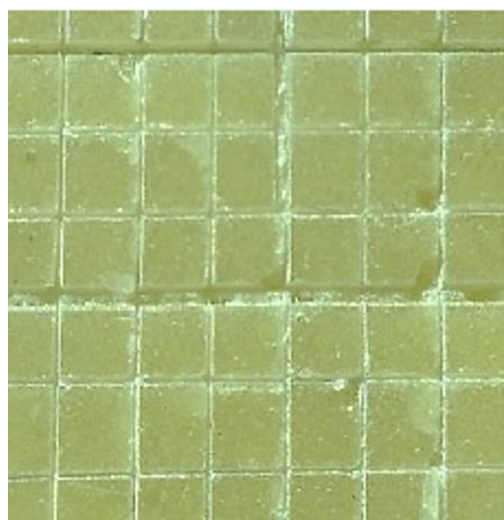
Рис. 5. Данные СЭМ композиций: а – 100ЭД-20+40ПО-300+30ТФФ;
 б – 100ЭД-20+40ПО-300+30ТФФ+2,5ПФА(М); в – 100ЭД-20+40ПО-300+30ТФФ;
 г – 100ЭД-20+40ПО-300+30ТФФ+2,5КФН(М)

**Влияние модификации наполнителей АГМ-9
на механические свойства эпоксидных композитов на их основе**

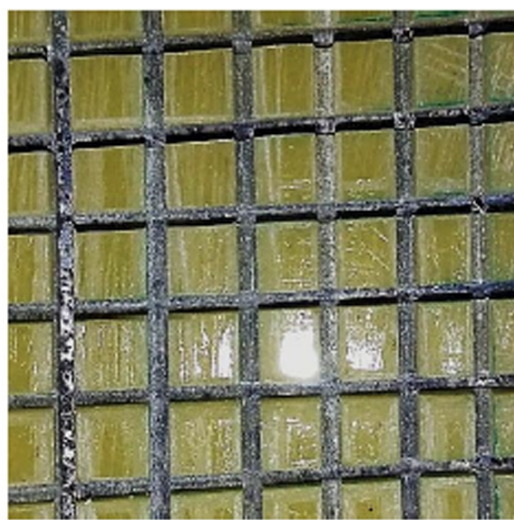
Содержание состава, масс.ч.: 100ЭД-20+40ПО- 300+30ТФФ	Ударная вяз- кость $a_{уд}$, кДж/м ²	Разрушающее напряжение при изгибе, $\delta_{изг}$, МПа	Степень отвержде- ния, %	Твердость по Бринеллю, МПа
Составы с не модифицированными наполнителями				
–	17	8*	96	165
2,5НКФ	26	14	95	152
2,5АПП-2	23	20	95	144
2,5 АПП-2+2,5 НКФ	34	27	96	147
Составы с наполнителями, модифицированными аппретом АГМ-9				
2,5НКФ	30	19*	97	176
2,5АПП-2	28	24*	95	158
2,5 АПП-2+2,5 НКФ	39	28*	99	175

*– образцы при испытаниях не разрушились.

Разработанные эпоксидные композиции отличаются достаточно высокой адгезией к дереву и металлу (рис. 6).



а



б

Рис. 6. Микрофотографии образцов после испытаний
на адгезию к деревянной (а) и металлической (б) подложкам

Проведенные испытания показали, что для образцов с деревянной подложкой (а) происходит отслоение мелких чешуек покрытия на пересечении надрезов, но площадь отслоения практически не превышает 5 % от площади решетки. Образцы на металлической подложке (б) имеют полностью гладкие края надрезов, причем ни один из квадратов на решетке не отслоился.

Заключение

Таким образом, в работе доказана эффективность модификации исследуемых наполнителей кремнефтористого натрия и полифосфата аммония аминосиланом АГМ-9, приводящая к снижению практически вдвое динамической вязкости составов с модифицированными наполнителями.

Установлено, что разработанные композиции отличаются повышенными прочностными характеристиками и кислородным индексом, а также высокой способностью к деформированию.

Список источников

1. Функциональные наполнители для пластмасс / под ред. М. Ксантоса; пер. с англ. под ред. Кулезнева В.Н. Санкт-Петербург: Научные основы и технологии, 2010. 576 с.
2. Моцарев Г.В., Соболевский М.В., Розенберг В.Р. Карбофункциональные органосиланы и органосилоксаны: учебник. Москва: Химия, 1990. 240 с.
3. The effect of an organosilicon modifier on the curing process of an epoxy oligomer / V.N. Nguyen [et al.] // Advances in Chemistry and Chemical Technology. 2018. V. 32. № 6 (202). P. 106-108.

Сведения об авторах

Яковлев Николай Алексеевич –
кандидат технических наук,
ООО «Метеор Термомеханика
Энгельс», г. Энгельс

Nikolay A. Yakovlev –
PhD (Technical Sciences),
LLC Meteor Thermomechanics Engels,
Engels City

Плакунова Елена Вениаминовна –
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технология и оборудование
химических, нефтегазовых и пищевых
производств» Энгельсского технологиче-
ского института (филиал) Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Elena V. Plakunova –
PhD (Technical Sciences), Associate
Professor, Department of Technology
and Facilities for Chemical, Oil,
Gas and Food Production,
Engels Institute of Technology
(branch) Yuri Gagarin State
Technical University of Saratov

Левкина Наталья Леонидовна –
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технология и оборудование
химических, нефтегазовых и пищевых
производств» Энгельсского технологиче-
ского института (филиал) Саратовского
государственного технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Natalia L. Levkina –
PhD (Technical Sciences), Associate
Professor, Department of Technology
and Facilities for Chemical, Oil,
Gas and Food Production,
Engels Institute of Technology
(branch) Yuri Gagarin
State Technical University of Saratov

Деревякин Вячеслав Игоревич –
студент Энгельсского технологического
института (филиал) Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Vyacheslav I. Derevyakin –
Undergraduate student,
Engels Institute of Technology
(branch) Yuri Gagarin
State Technical University of Saratov

Нуртазина Айнур Сериковна –
преподаватель кафедры экспериментальной
и теоретической физики Актюбинского
регионального государственного
университета имени К. Жубанова

Ainur S. Nurtazina –
Lecturer, Department of
of Experimental and Theoretical
Physics, Aktobe Regional State
University named after K. Zhubanov

Статья поступила в редакцию 15.11.2023, принята к опубликованию 04.12.2023

Правила оформления и представления статей

1. Статья, направляемая в редакцию журнала «Вестник Саратовского государственного технического университета», должна быть тщательно отредактирована и представлена в электронном виде в формате текстового редактора MS Word 2007 (параметры страницы А 4; поля 2,0 см; ориентация книжная; шрифт Times New Roman, высота 12; межстрочный интервал 1,0). Текст статьи представляют в редакцию по электронной почте vestnik@sstu.ru.

2. Статья должна содержать краткий обзор проблемы, из которого следует постановка задачи, обосновывать актуальность темы, отражать теоретические и (или) экспериментальные результаты и содержать четкие выводы, свидетельствующие о новизне полученных результатов.

3. В начале статьи в левом верхнем углу ставится индекс УДК. Далее на первой странице данные идут в такой последовательности:

- инициалы и фамилии авторов,
- полное название статьи (шрифт жирный, буквы прописные),
- краткая (5-7 строк) аннотация (курсив),
- ключевые слова (5-7 слов).

Далее авторы, название статьи, аннотация и ключевые слова повторяются на английском языке.

Затем идет текст самой статьи и список источников.

Статья завершается сведениями об авторах: Ф.И.О. (полностью), ученая степень, ученое звание, место работы (полностью), должность, контактные телефоны. Сведения об авторах также повторяются на английском языке.

4. Объем статьи не должен превышать 10 страниц текста, содержать не более 5 рисунков или фотографий; объем обзора 25 страниц, 10 рисунков; объем краткого сообщения не более 3 страниц, 2 рисунков.

Иллюстрации (рисунки, графики) должны быть расположены в тексте статьи и выполнены в одном из графических редакторов (формат tif, pcc, jpg, pcd, msp, dib, cdr, cgm, eps, wmf). Допускается также создание и представление графиков при помощи табличных процессоров Excel, Quattro Pro, MS Graph. Каждый рисунок должен иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

5. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. Каждая формула должна иметь номер.

6. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т. е., и т. д., и т. п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

7. Список источников должен быть оформлен по ГОСТ 7.0.5-2008 и включать: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

8. К статье прилагается экспертное заключение.

9. Рукопись статьи рецензируется ведущим ученым в данной области, как правило, доктором наук.

10. Электронная версия опубликованной статьи размещается в системе РИНЦ.

11. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

12. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются, рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста. В случае отказа в публикации статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

13. Для публикации и своевременной подготовки журнала необходимо заполнить регистрационную карту участника, представляемую отдельным файлом. Высылается вместе с рукописью.

14. Плата с аспирантов за публикацию статьи не взимается..

Вестник Саратовского государственного технического университета – рецензируемый научно-технический журнал, публикующий статьи по следующим научным направлениям и специальностям:

2.3 – Информационные технологии и телекоммуникации

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки, физико-математические науки)

2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

2.5 – Машиностроение

2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)

2.5.6 – Технология машиностроения (технические науки)

2.6 – Химические технологии, науки о материалах, металлургия

2.6.6 – Нанотехнологии и наноматериалы (технические науки, физико-математические науки, химические науки)

2.6.9 – Технология электрохимических процессов и защита от коррозии (технические науки, химические науки)

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки, химические науки)

Журнал имеет следующие соответствующие указанным группам специальностей разделы содержания:

– **Информационные технологии и телекоммуникации**

– **Машиностроение**

– **Химические технологии, науки о материалах, металлургия**

Журнал публикует статьи только по данным группам специальностей!

Регистрационная карта публикующегося в журнале «Вестник Саратовского государственного технического университета»		
Фамилия	Имя	Отчество
Полное название статьи		
Ученая степень	Ученое звание	Должность с указанием кафедры, отдела, лаборатории
Наименование организации места работы		
Электронная почта	Служебный телефон/факс	Домашний адрес и телефон
Группа специальностей, к которой относится статья		