

ВЕСТНИК

САРАТОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

2022

№ 4 (95)

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.

Выходит один раз в квартал

Декабрь 2022 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. Игнатьев

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) 99-89-81
E-mail: vestnik@sstu.ru

Подписано в печать 23.12.2022 Дата выхода в свет 28.12.2022
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 12,5 Уч.-изд. л. 3,8
Тираж 500 экз. Заказ 63 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

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., 2022
ISSN 1999-8341

VESTNIK

**SARATOV
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY**

2022

№ 4 (95)

Scientific Journal

Since 2003

Published quarterly

December 2022

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) 99-89-81

E-mail: vestnik@sstu.ru

Print date: 23.12.2022. Date of publication 28.12.2022

Format 60×84 1/8 Offset-Print

Conventional printed sheet 12,5 Publication base sheet 3,8

Circulation: 500 printed copies Order 63

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

ISSN 1999-8341

© Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Самойлова Е.М.

ГИБРИДНАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КАК ПРИМЕР ИНТЕГРАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ 5

Тригорлый С.В., Скрипкин А.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРОЦЕССОРОВ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕПЛОВЫМИ РЕЖИМАМИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ 14

Шустов В.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТЕРМООБРАБОТКИ
ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ..... 27

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Захаров О.В., Яковишин А.С., Жуков А.В.

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРОВ СЕРИИ ISO 16610 ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ
ПОВЕРХНОСТИ. ЧАСТЬ 3. ПРОФИЛЬНЫЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ..... 36

Панфилова А.В.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УДАЛЕНИЯ ОКАЛИНЫ..... 50

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Ганиев И.Н., Исмоилова М.Х., Отаджонов С.Э., Рахимов М.Р.

ВЛИЯНИЕ БЕРИЛЛИЯ НА АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВА $Al+1,0\% Si$
В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА $NaCl$ 56

Ганиев И.Н., Ширинов М. Ч., Олимов Н.С., Иброхимов Н.Ф.

МОДИФИЦИРУЮЩЕЕ ВЛИЯНИЕ КАЛЬЦИЯ, СТРОНЦИЯ И БАРИЯ
НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЕМКОСТИ И ИЗМЕНЕНИЙ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК9 67

Злобина И.В., Кузнецов Д.И., Лысов А.Д., Шамсутдинов Р.Н., Бекренев Н.В.

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ЧАСТОТ НАГРУЖЕНИЯ НА ИЗГИБНУЮ
ПРОЧНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ 79

Пулин В.Ф., Рыжова Е.В., Сурина Т.Ю., Пулин О.В., Элькин П.М.

КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ БОРАЗИНА
И БОРАЗОТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТОЙКИХ ПОЛИМЕРОВ..... 92

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND TELECOMMUNICATIONS

- Samoylova E.M.**
HYBRID INTELLIGENT SYSTEM AS AN EXAMPLE OF TECHNOLOGY
INTEGRATION IN SOLVING QUALITY MANAGEMENT PROBLEMS..... 5
- Trigorly S.V., Skripkin A.A.**
PROCESSOR COOLING SIMULATION
AND CONTROLLING THERMAL MODES OF THEIR OPERATION..... 14
- Shustov V.A.**
MODELING AUTOMATIC CONTROL
SYSTEMS OF THE HEAT TREATMENT PROCESS
FOR ELECTRIC RESISTANCE FURNACES 27

MECHANICAL ENGINEERING

- Zakharov O.V., Yakovishin A.S., Zhukov A.V.**
APPLICATION OF ISO 16610 SERIES FILTERS FOR SURFACE STRUCTURE.
PART 3. PROFILE MORPHOLOGICAL FILTERS 36
- Panfilova A.V.**
MODERN METHODS OF SCALE REMOVAL 50

CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

- Ganiev I.N., Ismoilova M.H., Otajonov S.E., Rahimov M.R.**
EFFECTS OF BERYLLIUM ON THE ANODE BEHAVIOR OF THE
AL+1,0% SI ALLOY IN THE NaCl ELECTROLYTE MEDIUM..... 56
- Ganiev I.N., Shirinov M. Ch., Olimov N.S., Ibrokhimov N.F.**
MODIFYING EFFECT OF CALCIUM, STRONTIUM, AND BARIA ON THE
TEMPERATURE DEPENDENCE OF HEAT CAPACITY AND CHANGES
IN THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF THE AK9 ALUMINUM ALLOY..... 67
- Zlobina I.V., Kusnetsov D.I., Lysov A.D., Shamsutdinov R.N., Bekrenev N.V.**
AFFECT OF ULTRASONIC LOADING FREQUENCIES ON THE BENDING
STRENGTH OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS..... 79
- Pulin V.F., Ryzhova E.V., Surinskaya T.Yu., Pulin O.V., Elkin P.M.**
QUANTUM CHEMICAL STUDIES OF THE DYNAMICS OF BORAZINE
AND BORAZOTE COMPOUNDS USED IN THE PRODUCTION
OF RESISTANT POLYMERS 92

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК: 004.8;681.5

Е.М. Самойлова

ГИБРИДНАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КАК ПРИМЕР ИНТЕГРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

Аннотация. Рассматривается вопрос разработки гибридной интеллектуальной системы для идентификации дефектов дорожек качения колец подшипников на основе применения теории распознавания образов с использованием вейвлет-преобразований сигналов вихретокового датчика и нейронных сетей.

Ключевые слова: гибридная интеллектуальная система, нейронная сеть, экспертная система, идентификация, теория распознавания образов, вейвлет-преобразования, вихретоковый датчик, дефекты

E.M. Samoylova

HYBRID INTELLIGENT SYSTEM AS AN EXAMPLE OF TECHNOLOGY INTEGRATION IN SOLVING QUALITY MANAGEMENT PROBLEMS

Abstract. The article considers development of hybrid intelligent systems for identifying defects in raceways of the bearing rings based on the theory of pattern recognition using wavelet transformations of eddy current sensor signals and neural networks.

Keywords: hybrid intelligent system, neural network, expert system, identification, pattern recognition theory, wavelet transform, eddy current sensor, defects

ВВЕДЕНИЕ

В современной научно-технической литературе достаточно широко рассмотрены теоретические аспекты применения интеллектуальных технологий (ИТ), однако их

практической реализации и применению непосредственно в производственных условиях при мониторинге технологических процессов и станков уделено недостаточное внимание.

Интеграция ИТ разного типа, как, например, экспертных систем (ЭС) и нейросетевых структур (НС), соединяющая как формализуемые знания (в ЭС), так и неформализуемые знания (в НС), является междисциплинарным направлением и позволяет добиться увеличения быстродействия и гибкости, ЭС и нечеткой логики – сокращение объема баз знаний (БЗ) на порядок и носит название гибридная интеллектуальная система (ГиИС).

ИНТЕГРАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Технологии, внедряемые в ГиИС, зависят от особенностей решаемой задачи, в частности задачи управления качеством обработки высокоточных деталей. Из пяти основных стратегий разработки ГиИС, основываясь на предыдущих исследованиях и условиях решаемой проблемы, выбираем интегрированную модель, используя ее преимущества в совместном использовании структур данных и представлений знаний, реализуемом в среде единого информационного пространства (ЕИП) с обеспечением мгновенного доступа к информации и компонентам, осуществляемого посредством двойственной природы структур [1-8].

Проведенный анализ проблемной области при организации информационно-измерительного канала вихретокового контроля ГиИС показал, что необходимо осуществить идентификацию технического состояния объекта как компонента технологического процесса (ТП).

В составе подсистемы связи с внешним окружением ГиИС машино- и приборостроительного производства для контроля поверхностного слоя высокоточных деталей применяются современные методики неразрушающего контроля и автоматизации процесса идентификации, для чего формируется комплекс автоматизированных аппаратных и программных средств, способных измерять и анализировать значения контролируемых признаков.

Для поддержки принятия решения ГиИС создается база алгоритмов (БА) распознавания с соответствующим методическим и программным обеспечением, что позволяет осуществить идентификацию объекта путем сопоставления имеющихся данных о возможных состояниях объекта (эталонов) с экспериментальной информацией о нем [9-12].

Алгоритмизация процесса распознавания образов проведена с обучением, когда формирование описания классов производится по обучающей выборке, представленной в блоке «Обучающий эксперимент». Из существующих методов распознавания образов выбран метод эталонов (рис. 1).



Рис. 1. Алгоритмизация идентификации дефектов шлифования деталей по интеллектуальному анализу образной информации

Во время обучающего эксперимента формируются база данных (БД) и база знаний (БЗ), определяется алфавит классов дефектов для идентификации, производится сравнение значений массива данных с эталонными значениями классификатора и осуществляется формирование признаков идентификации и эталонных оценок дефектов для последующего принятия решения по анализу образной информации, что и определяет интеллектуальный аспект системы. В процессе распознавания по данным информационно-измерительного подсистемы связи с внешним окружением ГиИС механизм логического вывода (МЛВ) принимает решение и вырабатывает рекомендации по обеспечению качества продукции [11, 13].

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

При проведении экспериментов выполнены вихретоковые измерения качества поверхностного слоя дорожек качения колец на круглошлифовальных автоматах модели SWaAGL-50 (4 шт.) и на внутришлифовальных автоматах модели SIW-5 (6 шт.). Размерность массивов данных на одно кольцо достигает 2004×60 . Примеры результатов анализа вихретокового контроля колец прибором ПВК-К2М (амплитудная и фазовая составляющие) представлены на рис. 2 и 3, где по вертикали представлены амплитуды сигнала вихретокового контроля, а по горизонтали – номера столбцов данных сканированной дорожки качения кольца, а – вся поверхность детали (амплитудная составляющая), б – локализация максимального/минимального значения параметров.

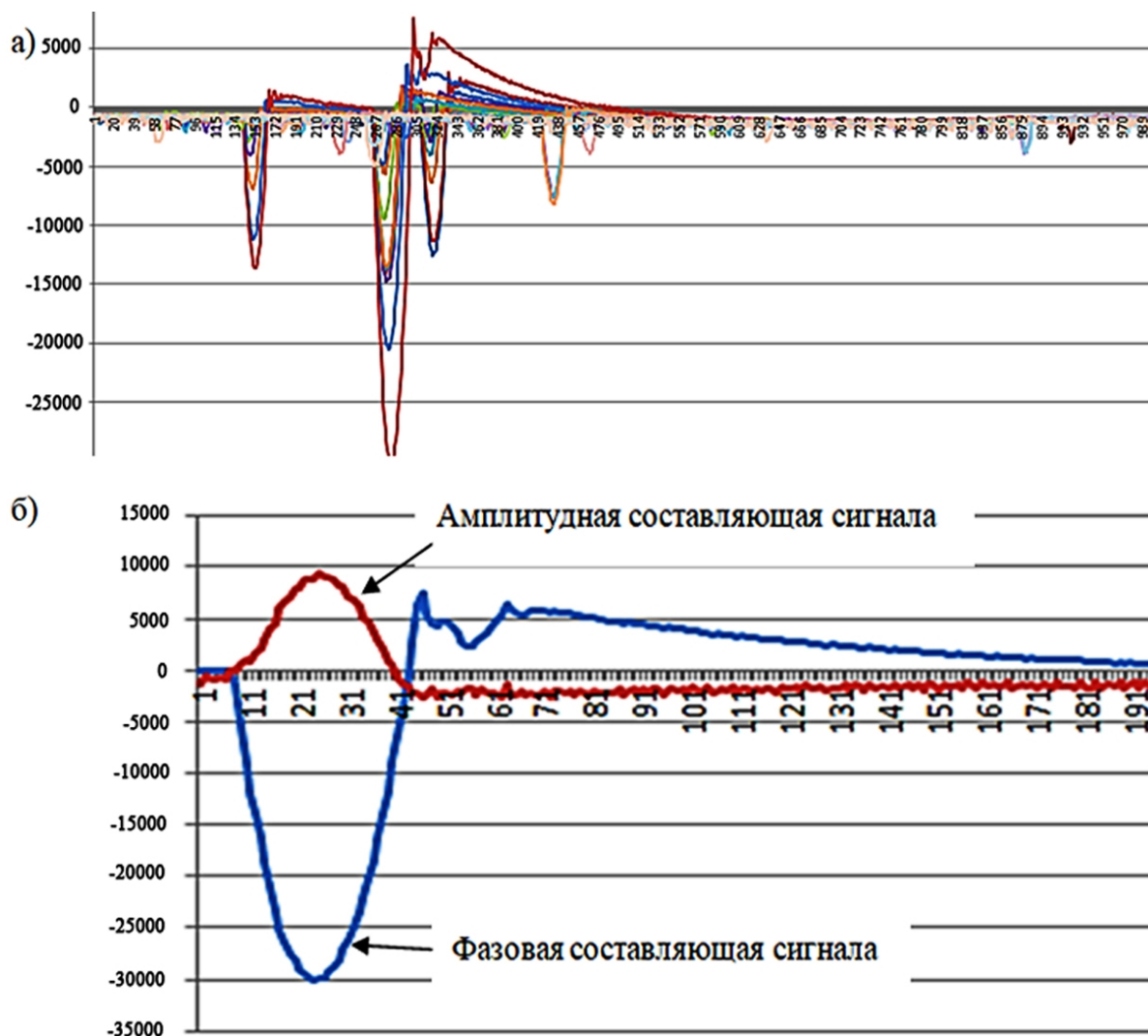


Рис. 2. Результаты анализа вихретокового сканирования поверхности качения кольца подшипника с локальным дефектом «забоина»

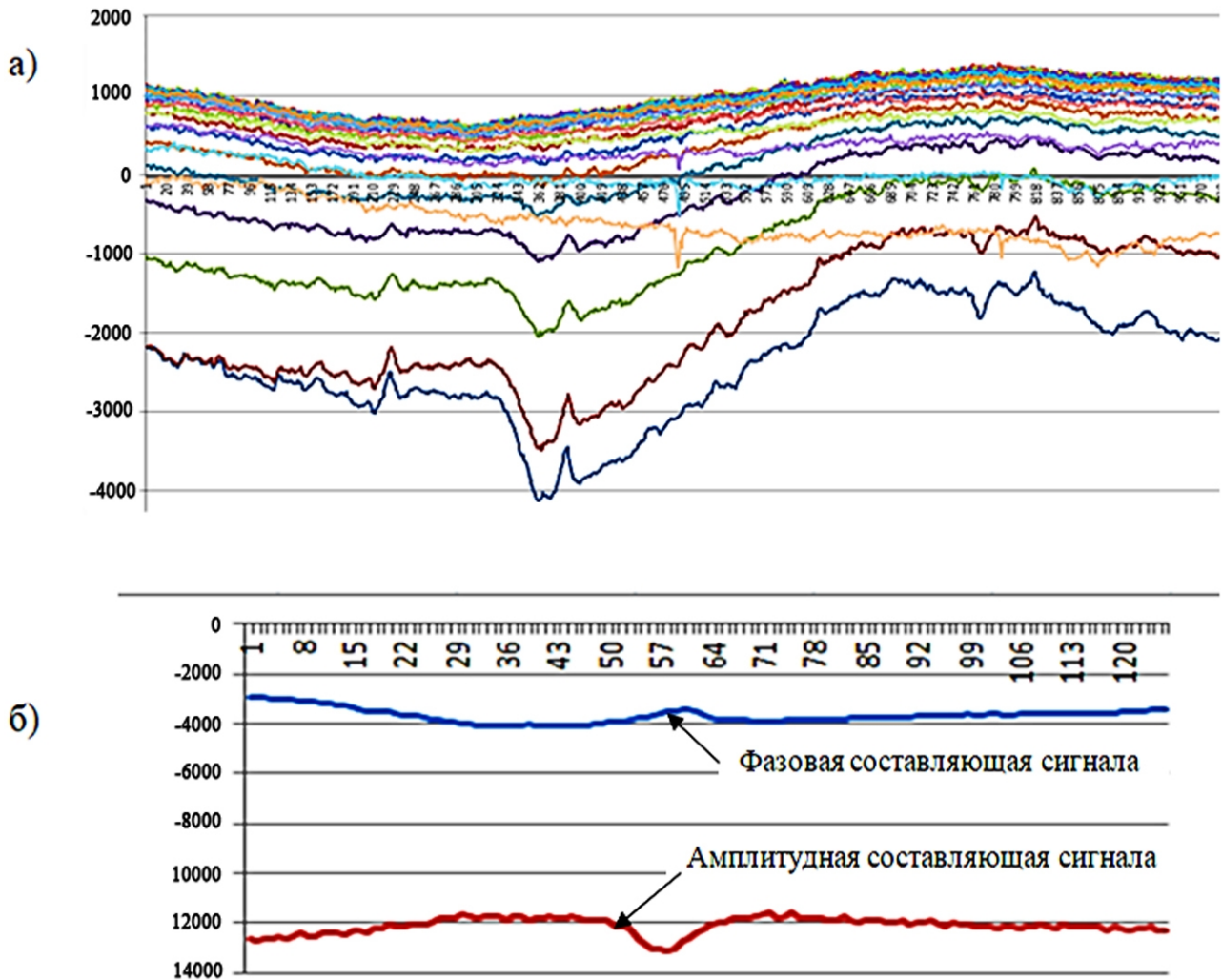


Рис. 3. Результаты анализа вихретокового сканирования поверхности качения кольца подшипника с локальным дефектом «срез»

Визуальный анализ результатов вихретокового сканирования позволяет достаточно определенно распознать вид дефекта по значениям амплитудной и фазовой составляющих вихретокового сигнала, сравнивая их с эталонными параметрами, однако в условиях реального производства данный процесс необходимо автоматизировать, для чего определен алфавит классов для идентификации состояния технологической системы (ТС) в составе 10 дефектов и создан набор из 4 параметров, характеризующих каждое состояние контролируемого объекта, связанных с параметрами сигнала вихретокового прибора.

Специально разработанное ПО автоматически рассчитывает данный комплекс признаков и сохраняет в БД ЕИП для дальнейшего распознавания дефектов поверхностного слоя деталей подшипников и анализа на основе нейросетевых методов.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ О КАЧЕСТВЕ ШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В СОСТАВЕ ГИИС

Нейросетевые методы являются решением задачи обработки больших массивов данных о качестве деталей, позволяющим создать эффективную автоматизированную систему мониторинга, связать в ЕИП ГиИС подсистемы контроля изделий, контроля и управления ТП, снизить себестоимость контроля качества, охватить большой объем выборки контролируемых деталей и повысить эффективность управления ТП изготовления высокоточных деталей подшипников [1-9].

Для построения нейросетевой модели в соответствии с рассмотренной ранее концепцией ЕИП по использованию унифицированных программных платформ, открытых архитектур, международных стандартов и апробированных коммерческих продуктов обмена данными, выбрана среда Matlab. Полученная модель персептрона распознавания дефектов поверхностного слоя деталей включает три слоя [13].

При определении исходных данных для распознавания дефектов поверхностного слоя учитывалось, что точность существенно зависит от объема обучающей выборки. Экспериментально было установлено, что объем выборки значений вихретокового контроля должен составлять не менее 400 значений (100 деталей), иначе уровень обучения/распознавания резко снижается. Обучающая выборка из 500 значений (125 деталей) автоматически импортировалась в программный модуль из БД ГиИС. Для тестирования обученной НС в программу импортировались массивы реальных значений вихретокового контроля по 22 деталям. Распознано 21 состояние поверхности детали из 22, что составляет 96 %. Ошибка распознавания (расхождение между обучающей выборкой и реакцией сети на тестовые данные) – в пределах 0,04.

Весь цикл работы данной методики для анализа вихретокового сигнала одной детали составил 10...15 секунд, что подтверждает целесообразность и эффективность использования разработанного метода в производственных условиях.

ПОСТРОЕНИЕ АРХИТЕКТУРЫ ГИБРИДНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ И НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В соответствии с анализом архитектур интеллектуальных систем разработана и представлена на рис. 4 структура ГиИС на основе интеграции технологий ЭС реального времени или ситуационного управления и НС для поддержки принятия решения и контроля эффективности процесса обработки для различных сочетаний обрабатываемых деталей и инструмента.

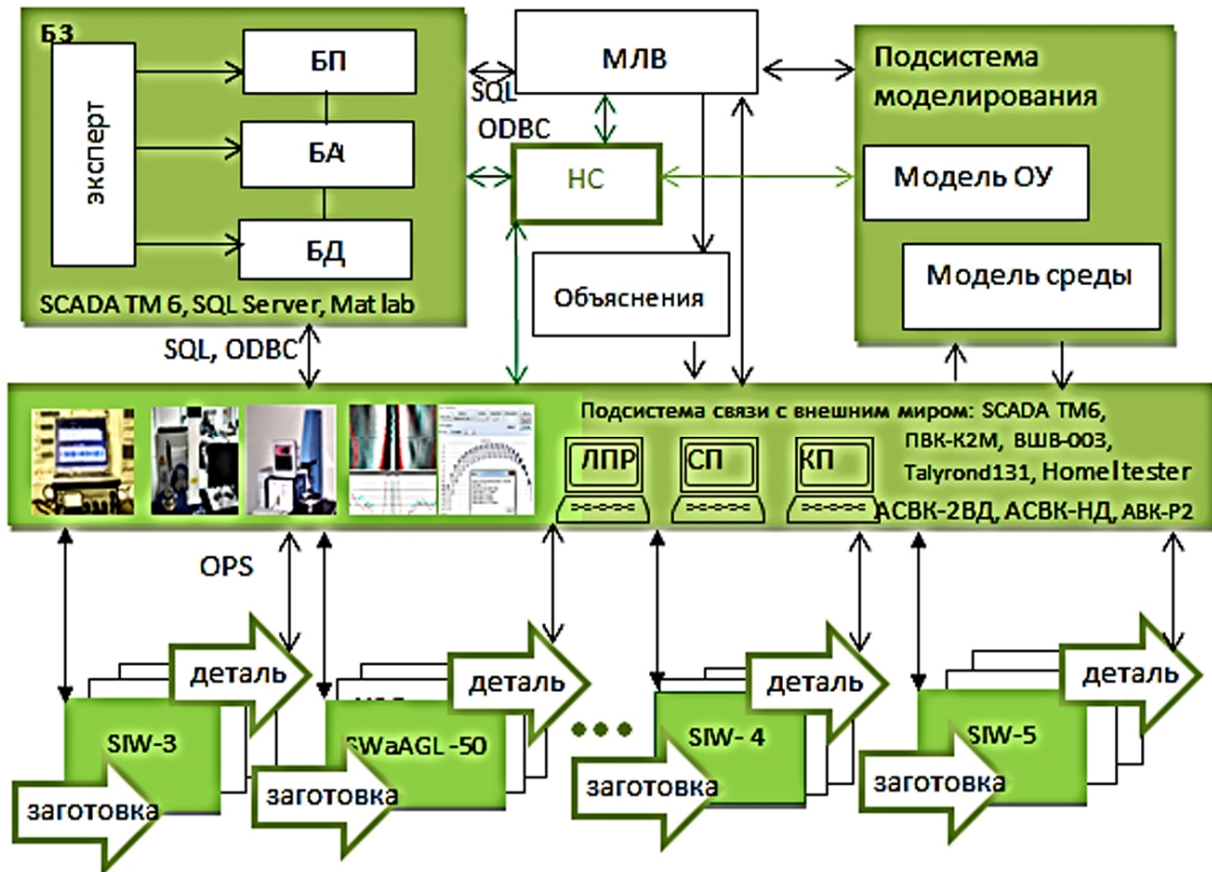


Рис. 4. Структура ГиИС как пример интеграции технологий ЭС и НС

Структура содержит, помимо традиционных составляющих структуры ЭС, реальные объекты управления (автоматические внутришлифовальные станки моделей SIW-5, SIW-4 и SIW-3; круглошлифовальные станки моделей SWaAGL-50), подсистему связи с внешним миром, подсистему моделирования внешнего мира и непрерывную составляющую управляющей части системы, кроме того, осуществляется идентификация объекта, создается БЗ, включающая базу правил (БП), БА и базу данных (БД), блок НС, МЛВ и блок объяснений, что позволяет лицу, принимающему решение (ЛПР), оперативно реагировать на изменяющиеся условия осуществления ТП. ГиИС сочетает в себе численное и лингвистическое представление знаний, реализованное при построении БЗ.

Адаптация ГиИС к изменениям в предметной области реализуется путем обновления фактов, правил или алгоритмов БЗ, а также обучающей выборки и конфигурации НС, производимых пользователем-экспертом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построенная интеллектуальная система позволяет использовать преимущества традиционных средств искусственного интеллекта, такие как обучаемость НС и знания ЭС, преодолевая некоторые их недостатки, и может решать специализированные задачи, не

решаемые отдельными методами искусственного интеллекта, что отражает ее актуальность и целесообразность применения для задач контроля качества обработки высокоточных деталей, корректировки технологического режима и ремонтно-восстановительных работ в системе мониторинга технологического процесса.

Автоматизация процессов контроля и принятия решения с применением ГиИС позволяет сократить (ликвидировать) брак изделий, а также увеличить основное время работы, т. к. ранее контроль изделий занимал до 80 % от всего времени на обслуживание

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колесников А.В. Гибридные интеллектуальные системы: Теория и технология разработки. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГТУ, 2001. 711 с.
2. Игнатьев В.В. Адаптивные гибридные интеллектуальные системы управления // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 12. С. 89-94.
3. Гаврилов А.В. Гибридные интеллектуальные системы. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 168 с.
4. Ярушкина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. Москва: Финансы и статистика, 2004. 320 с.
5. Гейценредер А.А. Мониторинг состояния станочной системы токарной обработки при интеллектуальном управлении: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. Ростов-на-Дону, 2006. 18 с.
6. Игнатьев А.А., Самойлова Е.М. Интеллектуализация мониторинга технологического процесса производства подшипников // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 4. С. 50-52.
7. Самойлова Е.М. Построение экспертной системы поддержки принятия решения как интеллектуальной составляющей системы мониторинга технологического процесса // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2016. № 2 (18). С. 128-142.
8. Самойлова Е.М., Игнатьев А.А. Методы и алгоритмы интеллектуализации мониторинга технологических систем на основе автоматизированных станочных модулей интегрированного производства: в 3 ч. Ч. 2: Динамическая экспертная система поддержки принятия решения. Саратов: СГТУ, 2018. 100 с.
9. Самойлова Е.М., Игнатьев А.А. Методы и алгоритмы интеллектуализации мониторинга технологических систем на основе автоматизированных станочных модулей интегрированного производства: в 3 ч. Ч. 3. Интеграция «технологического уровня» единого информационного пространства предприятия на уровне АСУТП. Гибридная интеллектуальная система. Саратов: СГТУ, 2019. 84 с.

10. Самойлова Е.М. Построение гибридной интеллектуальной системы на основе интеграции технологий для решения задач контроля качества обработки высокоточных деталей // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. 2017. № 2 (54). С. 45-51.

11. Программа интеллектуального анализа образной информации при организации информационно-измерительного канала неразрушающего контроля ЭСППР (Image) № 2016616445 / Самойлова Е.М., Цыбина Т.В., Игнатьев А.А.; дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 10.06.2016.

12. Controlling the periodicity of grinding wheel dressing with the application of expert decision support system / E.M. Samoylova, M.Yu. Zakharchenko, M.V. Vinogradov, M.G. Babenko, A.A. Ignatiev, S.V. Slesarev, V.A. Melentiev and L.G. Bokova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862 (12). pp. 1077-1079.

13. Обработка и анализ вихретоковых сигналов мониторинга технологического процесса производства подшипников (Amplituda) № 2017613316 / Самойлова Е.М., Цыбина Т.В., Игнатьев С.А.; дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 15.03.2017.

14. Программа распознавания дефектов на основе нейросетевых методов многослойного перцептрона (Identification) № 2017613792 / Самойлова Е.М.; дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 31.03.2017.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Самойлова Елена Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Elena M. Samoylova – Ph.D (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Technical Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 26.09.2022, принята к опубликованию 06.12.2022

С.В. Тригорлый, А.А. Скрипкин

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРОЦЕССОРОВ
И УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМИ РЕЖИМАМИ
ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Аннотация. Для охлаждения процессоров используются различные конструкции радиаторов с естественным и принудительным охлаждением. Разработана математическая модель тепловых режимов процессоров с охлаждающими радиаторами различного типа в условиях свободного и вынужденного конвективного теплообмена. Исследована эффективность охлаждения процессора в зависимости от конструкции радиатора, скорости движения воздуха, нагнетаемого вентилятором. Предложенные математические модели в программном пакете COMSOL Multiphysics и результаты исследований могут быть использованы при разработке конструкций радиаторов охлаждения процессоров и систем управления тепловыми режимами их эксплуатации.

Ключевые слова: процессор, охлаждение, математическое моделирование, управление тепловыми режимами

S.V. Trigorly, A.A. Skripkin

**PROCESSOR COOLING SIMULATION
AND CONTROLLING THERMAL MODES OF THEIR OPERATION**

Abstract. Various designs of generators with natural and forced cooling are used in processor cooling. A mathematical model of thermal modes of processors with various types cooling radiators under conditions of free and forced convective heat exchange procedures has been developed. Efficiency of processor cooling is investigated depending on the radiator design, and the speed of air movement injected by the fan. The proposed mathematical models in the COMSOL Multiphysics software package and the research results can be used in the developing designs for processor cooling radiators and control systems for thermal mode operation.

Keywords: processor, cooling, mathematical modeling, thermal mode control

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей задачей при создании и эксплуатации различных типов электронных элементов является обеспечение требуемого теплового режима, от которого зависит надежность работы каждого элемента конструкции [1]. Разработка новых конструкций вычислительных систем с высокой производительностью требует создания эффективных систем охлаждения для электронных компонентов, включая процессоры с повышенной степенью интеграции и большой тактовой частотой [2]. В этой связи большое значение имеет математическое моделирование процессов теплопереноса в электронных устройствах и элементах с целью определения оптимальных условий их охлаждения [3-9].

Для обеспечения допустимой температуры нагрева процессоров, которая для современных типов процессоров может составлять от средней величины 65°C до максимально допустимой величины 100°C [10], используются пассивные системы охлаждения с установкой радиаторов [8, 9] и активные с применением вентиляторов, тепловых труб, термоэлектрических систем [2, 6, 7].

Пассивные системы охлаждения процессоров предлагается использовать, например, в условиях производственных помещений с повышенной влажностью, запыленностью и температурой, где охлаждающие вентиляторы принудительного охлаждения (кулеры) быстро выходят из строя [8].

Актуально также использование пассивных систем кондуктивного охлаждения процессоров за счет передачи теплоты теплопроводностью в бортовых системах обитаемых космических аппаратов, в которых применение вентиляционных систем ограничено из-за низкого давления газа и практического отсутствия конвективного теплообмена [9].

Для интенсификации охлаждения радиоэлектронных компонентов используются, например, пластинчатые, ребристые, штыревые радиаторы различных типоразмеров [1]. В устройствах, в которых требуется рассеивать большие мощности до нескольких сотен ватт, требуется принудительное воздушное охлаждение. Перспективным направлением повышения эффективности охлаждения полупроводниковых и микроэлектронных компонентов является применение в качестве радиатора пенометалла с открытыми порами, например на основе алюминиевого сплава [11].

Целью данной работы является математическое моделирование охлаждения процессора при использовании различных типов радиаторов при естественном и вынужденном теплообмене. Задачей исследования является оценка эффективности системы охлаждения в зависимости от конструктивных размеров радиаторов и скорости движения воздуха при вынужденной конвекции.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Схема расположения процессора с радиатором охлаждения показана на рис. 1. В ходе сборки процессор вместе с крышкой входит в разъем на материнской плате, а радиатор плотно прилегает к крышке процессора.

Термопаста служит для уменьшения теплового сопротивления на границе контакта «крышка процессора – радиатор» за счет исключения воздушных включений из-за шероховатости поверхностей контакта. Предполагается, что термопаста также имеется между процессором и крышкой процессора и полностью заполняет остаточные воздушные включения.

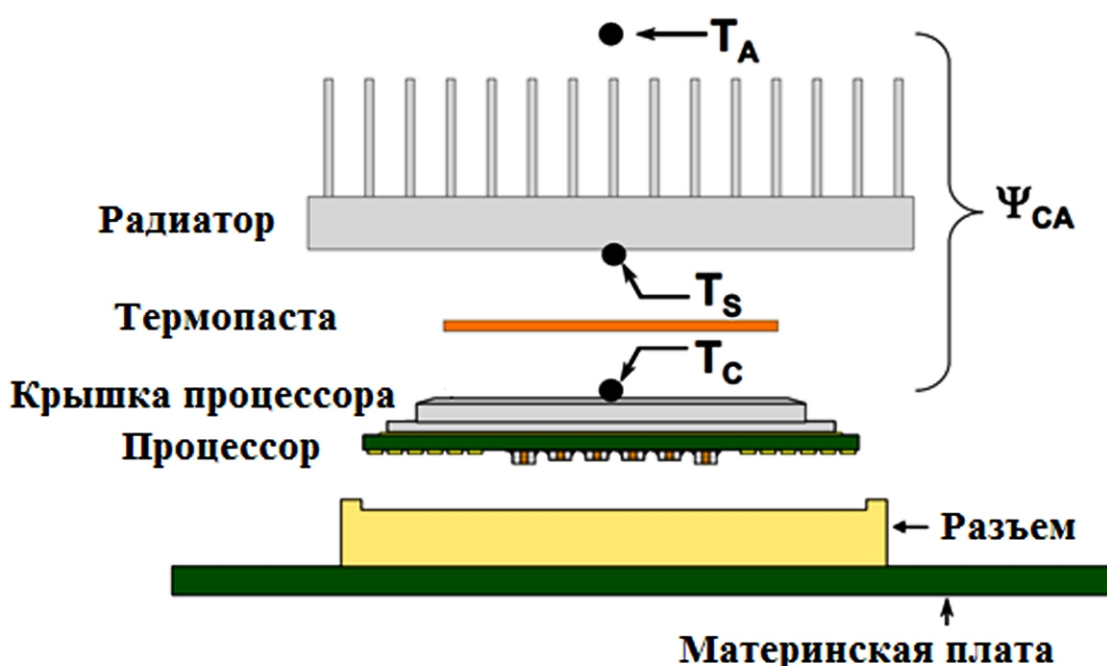


Рис. 1. Схема расположения процессора с радиатором охлаждения:
 T_A – температура окружающего воздуха; T_S – температура нижней поверхности радиатора;
 T_C – температура наружной поверхности крышки процессора

Для моделирования тепловых процессов охлаждения процессора рассмотрим геометрическую модель процессора, включая все элементы конструкции, участвующие в процессе теплообмена. В силу симметричного расположения процессора относительно основных конструктивных частей достаточно рассмотреть четвертую часть процессора, включая радиатор и остальные конструктивные элементы (рис. 2).

Рассмотрим математическую модель процесса нестационарной теплопроводности в процессоре с радиатором при известной мощности тепловыделения в кристалле процессора. В качестве примера на рис. 2 показана геометрическая модель процессора с ребристым радиатором.

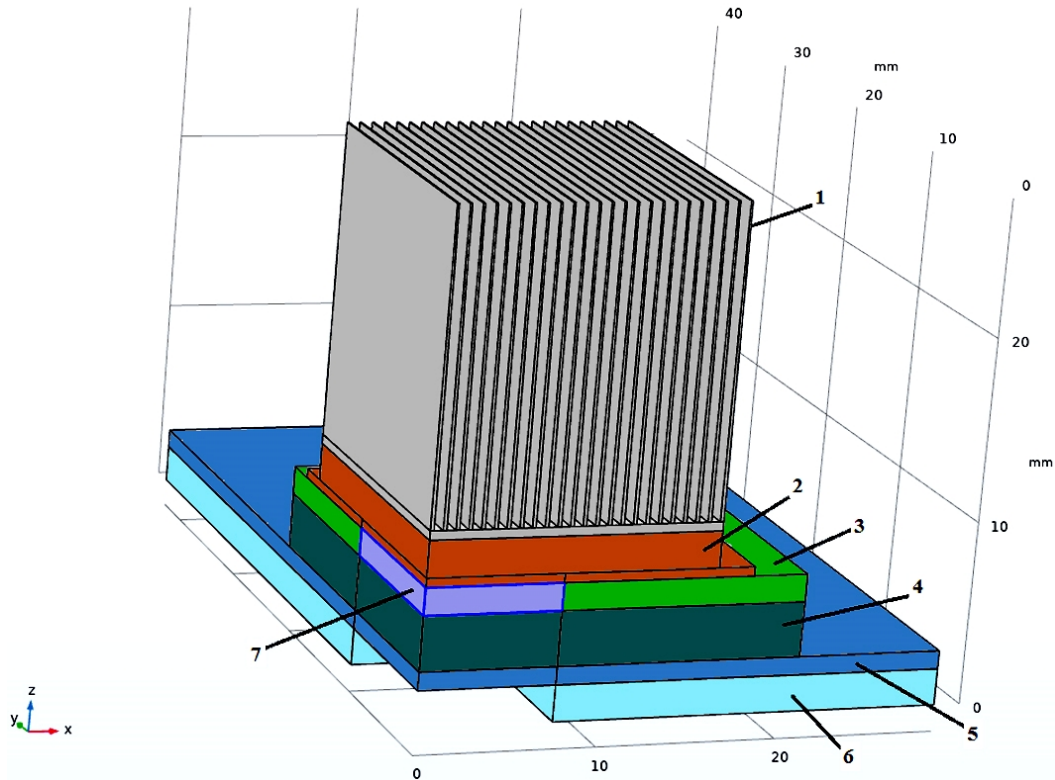


Рис. 2. Геометрическая модель четвертой части процессора с радиатором охлаждения:
 1 – радиатор; 2 – крышка процессора; 3 – подложка процессора; 4 – разъем;
 5 – материнская плата; 6 – алюминиевая теплоотводящая пластина; 7 – кристалл процессора

Процесс нестационарной теплопроводности описывается соответствующим дифференциальным уравнением с граничными и начальными условиями [1]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} - \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) = q_v; \quad (1)$$

$$-n \cdot q = h(T_{\text{ext}} - T_c); \quad (2)$$

$$-n \cdot q = \varepsilon \sigma_r (T_{\text{ext}}^4 - T_r^4); \quad (3)$$

$$T_1 = T_2; \quad (4)$$

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial n} \right)_S = \lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial n} \right)_S; \quad (5)$$

$$T(0) = T_0, \quad (6)$$

где ρ – плотность, c_p – удельная теплоемкость, T – температура, τ – время, λ – коэффициент теплопроводности, q_v – мощность внутренних источников теплоты, обуслов-

ленная тепловыделением известным тепловыделением в процессоре, h – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности, T_{ext} – температура окружающей среды, T_c – температура поверхности конвективного теплообмена, ε – коэффициент излучения, σ_r – постоянная Стефана-Больцмана, q – вектор плотности теплового потока, T_r – температура поверхности радиационного теплообмена, T_1, T_2 – температуры сопрягающихся поверхностей теплообмена областей 1 и 2, λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности областей 1 и 2, n – вектор нормали к поверхности раздела S , T_0 – начальная температура объекта.

Граничное условие (2) характеризует конвективный теплообмен между открытыми поверхностями радиатора и окружающей средой. Коэффициент теплоотдачи с наружных поверхностей определяется из критериальных уравнений по [12].

Граничное условие (3) характеризует радиационный теплообмен. Граничные условия (4) и (5) задаются на поверхности раздела составных частей процессора и радиатора.

Решение дифференциального уравнения теплопроводности с граничными и начальными условиями реализовано в трехмерной постановке в программном пакете COMSOL Multiphysics [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проведены численные исследования охлаждения процессоров с радиаторами с плоскими, штыревыми и полыми трубчатыми ребрами (рис. 3) для случаев свободной и вынужденной конвекции (при охлаждении с помощью вентилятора). В качестве примера выбран процессор Intel CORE i7-920 с расчетной мощностью 130 Вт.

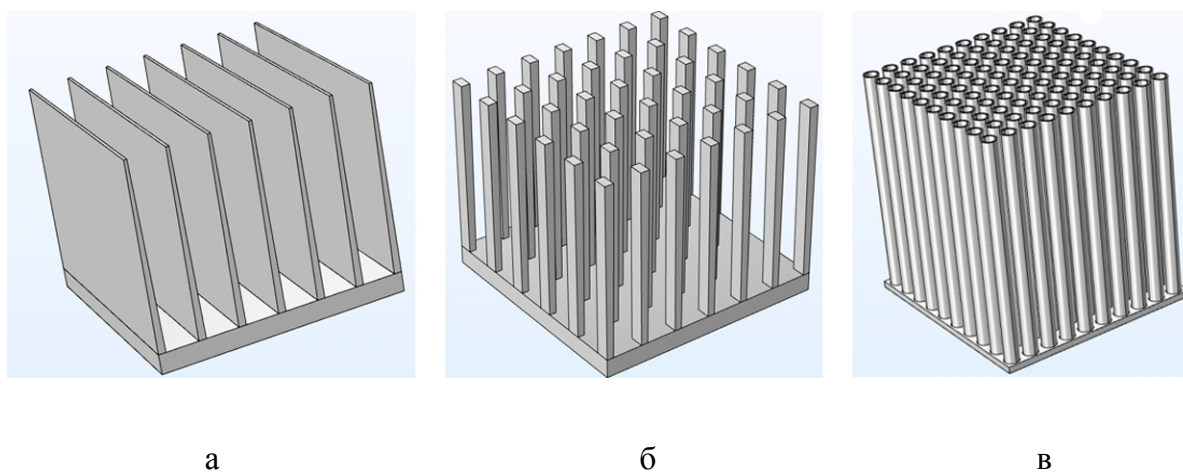


Рис. 3. Виды радиаторов охлаждения: а – с плоскими ребрами, б – со штыревыми ребрами, в – с трубчатыми полыми ребрами

Теплофизические свойства материалов конструктивных элементов процессора и радиатора приведены в табл. 1.

Таблица 1

Теплофизические свойства материалов конструктивных элементов процессора и радиатора

Наименование конструктивно-го элемента	Материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, кг/м ³	Степень черноты
Материнская плата, плата процессора	Стекло-текстолит	0,31	990	1740	0,9
Процессор	Кремний	148	714	233	0,9
Термопаста	Алмазные микрочастицы	8,4	502	2600	–
Крышка процессора	Алюминиевый сплав	144	2217	2800	0,7

Габаритные размеры рассматриваемых радиаторов для оценки их эффективности принимались одинаковыми, высота радиаторов составляла $h = 17$ мм. Другие конструктивные особенности радиаторов для рассматриваемой четверной части процессора приведены в табл. 2. При свободном конвективном теплообмене исследовано влияние мощности процессора на его максимальную температуру для представленных выше видов радиаторов. При этом учитывался радиационный теплообмен между открытыми поверхностями процессора и радиатора и окружающим воздухом в соответствии с уравнением (3). Коэффициент конвективной теплоотдачи определялся в программном пакете COMSOL Multiphysics с учетом формы и расположения границы раздела между твердой поверхностью и окружающим воздухом. Температура окружающего воздуха при моделировании принималась равной 20°C . Мощность процессора варьировалась от среднего значения 65 Вт до расчетного значения 130 Вт и выше.

На основе проведенного моделирования тепловых процессов были определены максимальные температуры процессора при разной его мощности для трех рассматриваемых радиаторов при свободном конвективном теплообмене (табл. 2).

Таблица 2

Сведения о геометрических особенностях радиаторов и результаты моделирования температуры при свободной конвекции

Вид радиатора	Геометрические параметры (для четвертой части радиатора)		Максимальная температура процессора, $^{\circ}\text{C}$, при мощности, Вт					
	количество ребер	площадь поверхности, см ²	65	130	150	175	200	250
С полыми трубками	22 × 23 шт. трубок	313,5	56	87	–	–	–	–
Штыревой	36 × 36 шт. штырьков	276,9	42	63	71	79	87	103
С плоскими пластинами	36 шт. пластин	208,1	87	140	–	–	–	–

На рис. 4 приведено распределение температурного поля в процессоре со штыревым радиатором при мощности 130 Вт и изменение температуры во времени для наиболее нагретых частей кристалла процессора.

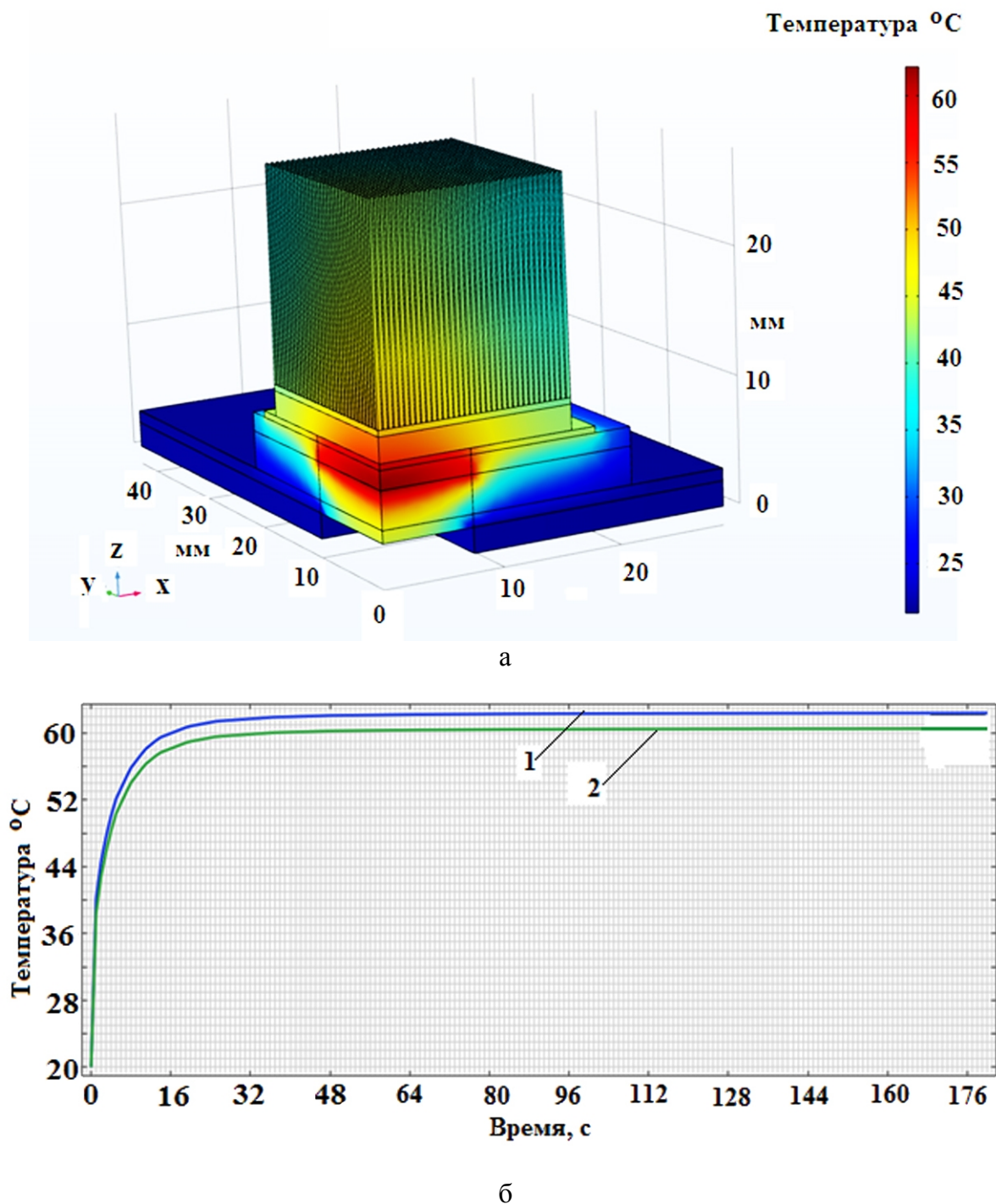


Рис. 4. Результаты моделирования теплообмена в процессоре со штыревым радиатором при мощности 130 Вт в случае свободного конвективного теплообмена: а – распределение температурного поля в процессоре в момент времени 60 с; б – изменение температуры во времени для верхней (1) и нижней (2) части кристалла процессора

Как видно из полученных расчетных данных (табл. 2), при средней мощности 65 Вт для случая свободного конвективного теплообмена все типы радиаторов обеспечивают нагрев процессора до температуры ниже максимально допустимой величины 100°C , однако только штырьковый и трубчатый радиаторы позволяют поддерживать температуру 42°C и 63°C соответственно, что ниже средней допустимой для процессора 65°C .

При мощности процессора 130 Вт в случае применения штыревого радиатора максимальная температура процессора не превышает 63°C , а для трубчатого радиатора составляет 87°C , что меньше предельно допустимой температуры 100°C . Для пластинчатого радиатора температура процессора достигает 140°C , значительно превышая допустимую величину.

Следует отметить, что увеличение площади теплообмена влияет на снижение температуры нагрева процессора. Так, например, площадь поверхности теплообмена у штыревого радиатора на 25 % больше по сравнению с радиатором с плоскими пластинами, при этом снижение температуры процессора со штыревым радиатором по сравнению с пластинчатым радиатором при мощности 130 Вт составляет 122 %.

Однако для радиатора с полыми трубками, имеющими площадь теплообмена на 13 % больше по сравнению со штыревым радиатором, температура процессора получилась на 38 % меньше при мощности процессора 130 Вт. Это объясняется тем, что в трубчатом радиаторе примерно третья часть поверхности теплообмена приходится на внутреннюю поверхность трубок, где конвекция происходит в ограниченном пространстве с меньшей интенсивностью теплообмена.

Таким образом, при свободном конвективном теплообмене с окружающим воздухом наиболее эффективно охлаждение процессора с использованием штыревого радиатора. Исследование влияния мощности процессора на его максимальную температуру показали, что возможно превышение мощности процессора выше расчетной величины 130 Вт, но при этом максимальная мощность не должна достигать 250 Вт, с тем чтобы температура процессора не превышала 100°C (табл. 2).

Для оценки эффективности принудительного охлаждения процессора с помощью вентилятора при использовании различных радиаторов (рис. 3) проводилось моделирование тепловых процессов вынужденного конвективного теплообмена. Исследовалось влияние мощности процессора на его температуру нагрева для заданной скорости движения воздуха $v = 1$ м/с при работе вентилятора. Результаты данного исследования приведены в табл. 3.

Установлено, что при скорости движения воздуха $v = 1$ м/с и расчетной мощности процессора 130 Вт максимальная температура для штыревого радиатора и с полыми

трубками составляет соответственно 47 и 52° С, что не превышает среднюю допустимую температуру процессора 65° С.

При мощности 275 Вт максимальная температура для штыревого радиатора и радиатора с полыми трубками составляет 77 и 87° С соответственно, что меньше максимально допустимой температуры 100° С. Для радиатора с плоскими пластинами максимальная температура при мощности процессора $P = 130$ Вт и $P = 275$ Вт составляет 83 и 150° С соответственно, превышая установленные пределы по средней и максимальной температуре процессора.

Таблица 3

Влияние мощности процессора на максимальную температуру нагрева при скорости движения воздуха $v = 1$ м/с

Вид радиатора	Максимальная температура процессора, °С, при мощности	
	130 Вт	275 Вт
С полыми трубками	52	87
Штыревой	47	77
С плоскими пластинами	83	150

Для процессора со штыревым радиатором исследовано влияние скорости движения воздуха, нагнетаемого вентилятором, высоты и количества штырей на температуру нагрева процессора. Результаты моделирования сведены в табл. 4, 5 и показаны на рис. 5.

Таблица 4

Влияние скорости движения воздуха на максимальную температуру процессора со штыревым радиатором при количестве штырей $n = 36 \times 36$ шт., высоте $h = 17$ мм и мощности процессора $P = 275$ Вт

Скорость воздуха, м/с	0,1	1	2	3	4	5
Максимальная температура процессора, °С	98	80	75	73	71	69

Таблица 5

Влияние количества штырей радиатора на максимальную температуру процессора при высоте штырей $h = 17$ мм, мощности процессора $P = 275$ Вт и скорости воздуха $v = 0,1$ м/с

Количество штырей $n_x \times n_y$, шт.	25×25	30×30	35×35	40×40
Максимальная температура процессора, °С	136	113	101	92

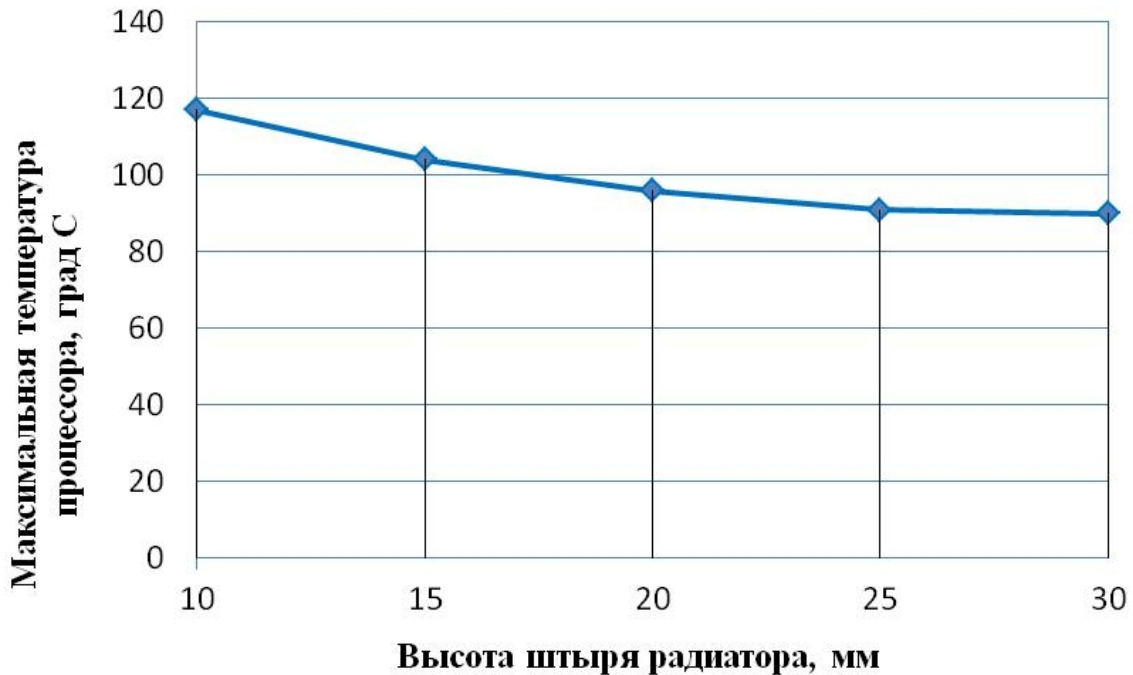


Рис. 5. Влияние высоты штырей радиатора на максимальную температуру процессора при количестве штырей $n = 36 \times 36$ шт., мощности процессора $P = 275$ Вт, скорости движения воздуха $v = 0,1$ м/с

Зависимость максимальной температуры процессора от скорости движения воздуха для штыревого радиатора охлаждения при количестве штырей $n = 36 \times 36$ шт., высоте $h = 17$ мм и мощности процессора $P = 275$ Вт в диапазоне скоростей v от 1 до 5 м/с можно аппроксимировать следующей зависимостью:

$$T_{\max}(v) = 0,4286 \cdot v^2 - 5,174 \cdot v + 84,4, \quad (7)$$

где v – скорость движения воздуха, м/с.

Как видно из данной зависимости и табл. 4, наибольшее снижение температуры нагрева процессора происходит при увеличении скорости движения воздуха от 0,1 до 1 м/с (на 18°C), а также в диапазоне увеличения скорости движения воздуха от 0,1 до 1 м/с – на 5°C .

Увеличение высоты штырей и их количества повышает общую поверхность теплообмена и, как следствие, приводит к уменьшению температуры процессора (см. табл. 5 и рис. 5).

На основе обобщения результатов численного моделирования при выбранных параметрах конструктивных элементов установлены следующие зависимости максимальной температуры процессора от высоты и количества штырей радиатора:

$$T_{\max}(h) = 1,9286 \cdot h^2 - 18,271 \cdot h + 133,2; \quad (8)$$

$$T_{\max}(n) = 3,5 \cdot n^2 - 31,9 \cdot n + 64. \quad (9)$$

Здесь h – высота штырей, мм, n – количество штырей вдоль одной координаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов численного моделирования тепловых режимов процессоров с различными охлаждающими радиаторами в условиях свободного и вынужденного конвективного теплообмена установлено следующее.

1. При свободном конвективном теплообмене с окружающим воздухом наиболее эффективно охлаждение процессора с использованием штыревого радиатора. При расчетной мощности процессора 130 Вт максимальная температура не превышает допустимую среднюю температуру 63°C . Для пластинчатого и трубчатого радиаторов при мощности процессора более 65 Вт необходимо использовать принудительное охлаждение с помощью вентилятора с целью управления тепловым режимом процессора.

2. Для случая принудительного охлаждения процессора с помощью вентилятора при использовании различных радиаторов установлено, что при скорости движения воздуха $v = 1$ м/с и расчетной мощности процессора 130 Вт максимальная температура для штыревого радиатора и радиатора с полыми трубками составляет соответственно 47 и 52°C , что ниже допустимой средней величины. Температура процессора с радиатором из плоских пластин равна 83°C , что превышает среднюю величину.

3. На основе полученных численных результатов для процессора со штыревым радиатором получены зависимости максимальной температуры от скорости движения воздуха, нагнетаемого вентилятором, высоты и количества штырей радиатора.

4. Установлено, что управление скоростью движения воздуха в случае принудительного охлаждения процессора в диапазоне от $0,1$ до 5 м/с позволяет уменьшить максимальную температуру нагрева от 98 до 69°C при мощности $P = 275$ Вт.

Таким образом, проведенное математическое моделирование позволило оценить эффективность различных радиаторов для охлаждения процессоров с учетом условий теплообмена с окружающей средой. Предложенные математические модели в программном пакете COMSOL Multiphysics и результаты исследований могут быть использованы при разработке конструкций радиаторов охлаждения процессоров и систем управления тепловыми режимами их эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен радиоэлектронной аппаратуре. Москва: Высшая школа, 1984. 247 с.

2. Штерн М.Ю., Штерн Ю.И., Шерченков А.А. Термоэлектрические системы для обеспечения тепловых режимов вычислительной техники // Известия вузов. Электроника, 2011. № 4 (90). С. 30-38.
3. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета тепловых режимов прибора. Москва: Радио и связь, 1990. 312 с.
4. Резников Г.А. Расчет и конструирование систем охлаждения ЭВМ. Москва: Радио и связь, 1988. 224 с.
5. Исследование тепловых характеристик РЭС методами математического моделирования: монография / В.В. Гольдин, В.Г. Журавский, Ю.Н. Кофанов и др.; под ред. А.В. Сарафанова. Москва: Радио и связь, 2003. 456 с.
6. Ван Юй, Денисов О.В., Денисова Л.В. Моделирование охлаждения процессоров в наноспутнике с помощью контурных тепловых труб // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 3. С. 211-219.
7. Моделирование и оптимизация теплового насоса в системе охлаждения супер ЭВМ / С.Г. Ворончихин, В.А. Помыткин, А.Л. Флакман, М.А. Земцов // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1 (52). С. 46.
8. Зуев А.С., Корочкина Е.Е. Разработка пассивных систем охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры с внутренними источниками теплоты в составе текстильного отделочного оборудования // Фундаментальные исследования. 2014. № 9-3. С. 516-520.
9. Гарсия В. Бортовые вычислительные комплексы с кондуктивным теплоотводом: пример конструктивной реализации на основе спецификации VPX REDI // Современные технологии автоматизации. 2013. № 1. С. 34-40.
10. Рабочая температура процессора от Pentium до Core i7 последнего поколения URL: <https://setupik.ru/rabochaya-temperatura-protssessora-ot-pentium-do-core-i7-poslednego-pokoleniya.html>. – 16.12.2022.
11. Патент (ПМ) № 207764. Радиатор для охлаждения полупроводниковых и микроэлектронных электровакуумных приборов / Царев В.А., Скрипкин А.А. и др. 15.11.2021 г.
12. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Москва: Энергия, 1975. 488 с.
13. Моделирование СВЧ электротехнологических процессов и установок с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics / С.В. Тригорлый, В.С. Алексеев, С.Г. Калганова, В.В. Захаров. Саратов: Амирит, 2019. 105 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Тригорлый Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey V. Trigorly – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electrical Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Скрипкин Александр Александрович – доктор технических наук, старший научный сотрудник Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского

Alexander A. Skripkin – Dr. Sci. Tech., Senior Research Fellow, Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky

Статья поступила в редакцию 26.11.2022, принята к опубликованию 20.12.2022

В.А. Шустов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТЕРМООБРАБОТКИ
ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ**

***Аннотация.** Рассматриваются основные характеристики процесса термической обработки. Разработана математическая модель системы управления для электрической печи сопротивления и проведен термический анализ рабочего пространства в печи, являющийся необходимым условием современной конструкторской и технологической деятельности. Показана возможность применения разработанной математической модели для возможной оптимизации конструкции и режимов работы оборудования.*

***Ключевые слова:** электрическая печь сопротивления, регулирование, система автоматического управления, модель, температура*

V.A. Shustov

**MODELING AUTOMATIC CONTROL
SYSTEMS OF THE HEAT TREATMENT PROCESS
FOR ELECTRIC RESISTANCE FURNACES**

***Abstract.** The article considers the main characteristics of the heat treatment process. A mathematical model for the control system of an electric resistance furnace has been developed and a thermal analysis of the working space in the furnace has been made, which is a necessary condition for the modern design and technological activities. A possibility for application of the developed mathematical model in optimization of the design and operating modes of the equipment is shown.*

***Keywords:** resistance electric furnace, regulation, automatic control system, model, temperature*

ВВЕДЕНИЕ

Технологический процесс, контролируемый разрабатываемой системой управления, – термическая обработка, а на качество термической обработки влияют следующие факторы:

- стабильно и точно поддерживаемые температурные режимы;
- точная выдержка по времени и в некоторых случаях поддержание многозонной температурно-временной зависимости;
- равномерность температурного поля в печи;
- состав среды.

Несмотря на тот факт, что в современных системах некоторые технические проблемы имеют решения [1-5, 11], есть аспекты, которые необходимо учесть при разработке. Речь идет о требованиях, которые применяются к термическому оборудованию и системам контроля, измерения и регулирования в тех случаях, когда речь идет об особо ответственных изделиях [7-9]. За рубежом такие требования учтены и сформулированы в документах программы Nadcap и стандарте AMS 2750.

В зависимости от требований к качеству деталей и качеству технологического процесса термообработки оборудованию предписываются определенные типы приборов, класс однородности температуры и точность регулирования температуры [2]. Тип приборов определяет необходимый комплект применяемых устройств регулирования, измерения и хранения информации. Чем выше класс оборудования, тем точнее приборы и выше однородность температуры.

Целью работы является разработка математической модели электрической печи сопротивления для оценки переходной характеристики, величины перерегулирования и расчёта коэффициентов для ПИД-регулятора: построение трехмерной модели и проведение термического анализа для оценки однородности температуры в рабочем пространстве печи.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Система управления электрической печью сопротивления (ЭПС) обеспечивает стабилизацию и управление температурой внутри печи, т. е. является регулятором температуры [6, 10].

Устаревшие системы управления ЭПС имеют ряд технических проблем, а именно: низкая точность измерения и регулирования температуры; отсутствие системы мониторинга и архивирования данных технологического процесса, что снижает информативность производства; низкая точность позиционного регулирования; отсутствие систем аварийных защит и технологической сигнализации; отсутствие системы управления временными режимами [1].

Регулятор температуры можно представить в виде набора следующих элементов:

- ЗУ – задающее устройство, с помощью которого осуществляется ввод установки температуры;

- ВУ – вычислительное устройство, которое выполняет функцию сравнения реального и заданного значений температуры и рассчитывает регулирующий сигнал;
- РМ – регулятор мощности, принимающий сигнал от ВУ и изменяющий мощность, подаваемую на нагревательные элементы;
- ДТ – датчик температуры печи.

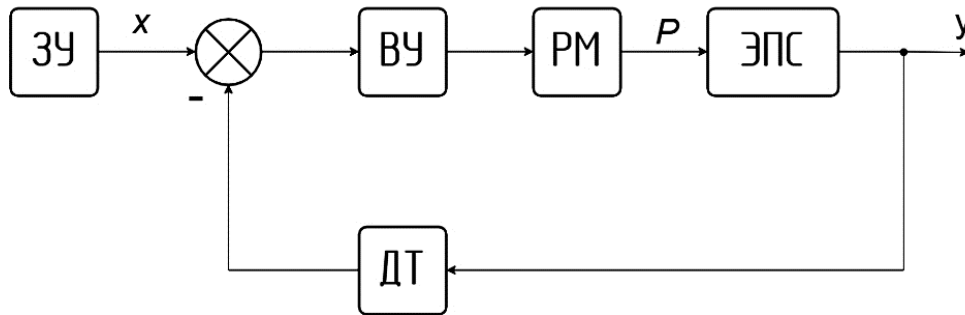


Рис. 1. Функциональная схема системы управления

Контроль температуры будем осуществлять с помощью ПИД-регулятора, который представляет собой управляющий элемент в цепи обратной связи и широко используемый в промышленных системах управления. ПИД-регулятор непрерывно вычисляет значение ошибки $e(t)$ как разность между желаемой уставкой и измеряемой величиной и применяет поправку, основанную на пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих.

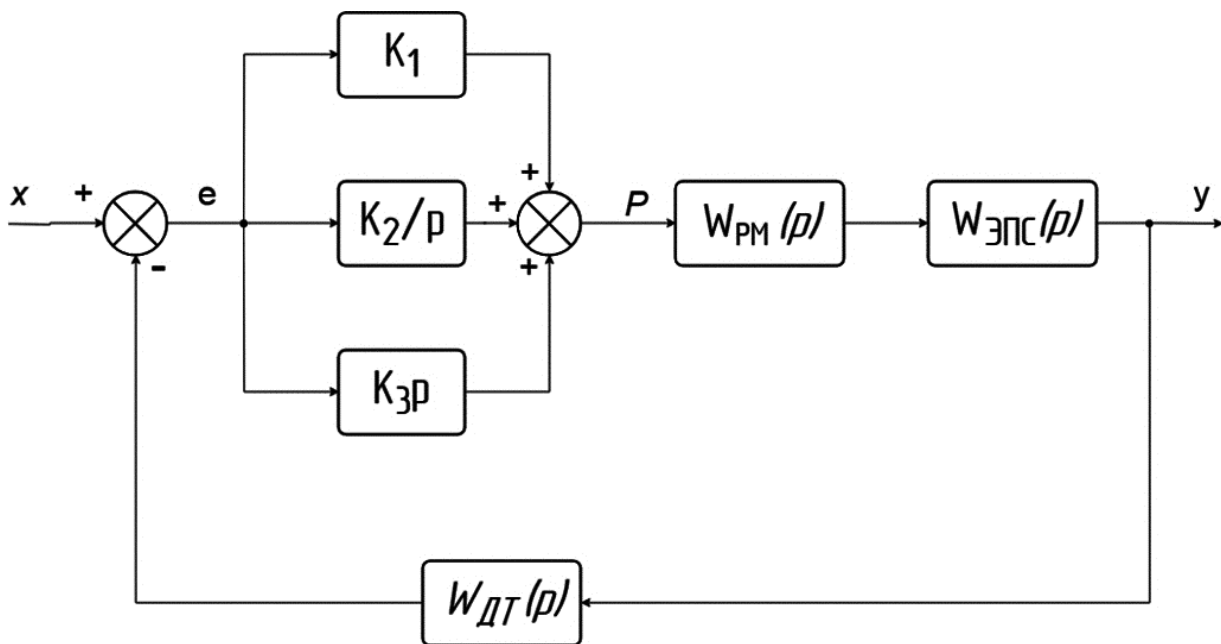


Рис. 2. Структурная схема системы управления с ПИД-регулированием, где следующие значения являются параметрами настройки регулятора: K_1 – пропорциональный коэффициент усиления; K_2 – интегральный коэффициент усиления; K_3 – дифференциальный коэффициент усиления

Передаточная функция в области Лапласа имеет вид

$$L(p) = K_1 + \frac{K_2}{p} + K_3 p. \quad (1)$$

Рассмотрим схему, представленную на рис. 2 подробнее:

$$W_{ЭПС}(p) = \frac{k_{ЭПС}}{T_{ЭПС} p + 1}, \quad (2)$$

где $k_{ЭПС}$ – коэффициент передачи печи; $T_{ЭПС}$ – постоянная времени печи.

Входной величиной для ЭПС как объекта управления выступает действующее значение поступающей на нагреватели мощности. Выходной величиной является температура в месте установки датчика обратной связи. Предполагается, что ЭПС является однородным, сосредоточенным и бесконечно тонким в теплотехническом отношении телом, теплопередача осуществляется за счет теплопроводности, а коэффициенты теплопроводности и теплоемкости постоянны и не зависят от температуры.

Данное представление ЭПС позволяет решить ряд задач, но не учитывает отдельные элементы такие как: нагревательный элемент, футеровка, само изделие в печи, воздушные промежутки, это создает определенные проблемы при проектировании и настройке регулятора.

Важной характеристикой во многих технологических процессах при термообработке изделий является однородность температуры в рабочем пространстве печи. При внедрении рассматриваемой системы управления необходимо и желательно знать теплотехнические параметры печи, распределение температуры на этапе разработки и проектирования системы управления.

В соответствии со стандартом AMS 2750 оборудование для термической обработки металлов подразделяется на 6 классов в зависимости от однородности температурного поля в рабочей зоне [10] (таблица).

Классификация термооборудования по однородности температуры

Класс термооборудования	Однородность температуры, °C
1	±3
2	±6
3	±8
4	±10
5	±14
6	±28

Для анализа этой характеристики составим и воспользуемся математической моделью ЭПС, в которой будут отражены разные коэффициенты теплосопротивления изоляции печи и

рабочее пространство будет поделено на несколько зон измерения. Для исследования и анализа целесообразно использовать численные методы структурного моделирования. Наиболее удобным и функциональным можно считать пакет Simulink для программы Matlab.

Данная модель, составленная в среде Matlab/Simulink, позволяет проанализировать работу системы, управляемой с помощью ПИД-регулятора.

Температурно-временная характеристика печей косвенного нагрева характеризуется тремя четко выраженными областями: при низкой температуре характеристика имеет почти линейный вид с крутым ростом температуры, при средних значениях температуры характеристика нелинейна, в области высоких температур характеристика также имеет почти линейный вид, но с небольшой крутизной роста. Теоретически электрическую печь сопротивления можно представить в виде апериодического звена второго порядка. Его нелинейность в значительной степени обусловлена механизмом теплопередачи, конвекцией и излучением тепла.

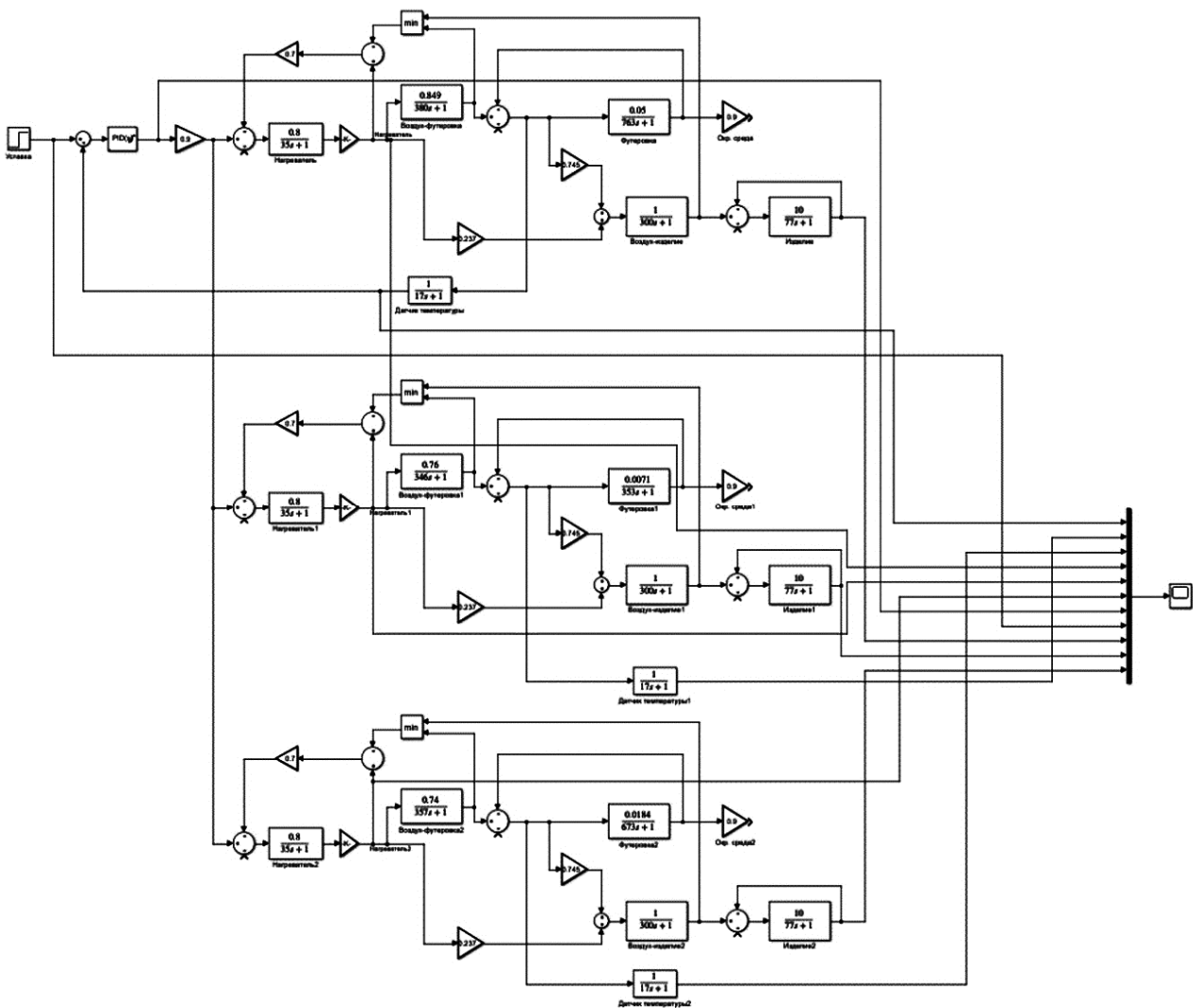


Рис. 3. Математическая модель системы управления с ПИД-регулированием

В качестве входного воздействия подается ступенчатый сигнал с заданным значением температуры. С помощью различных настроек регулятора можно достичь заданной скорости нагрева и плавности переходного процесса.

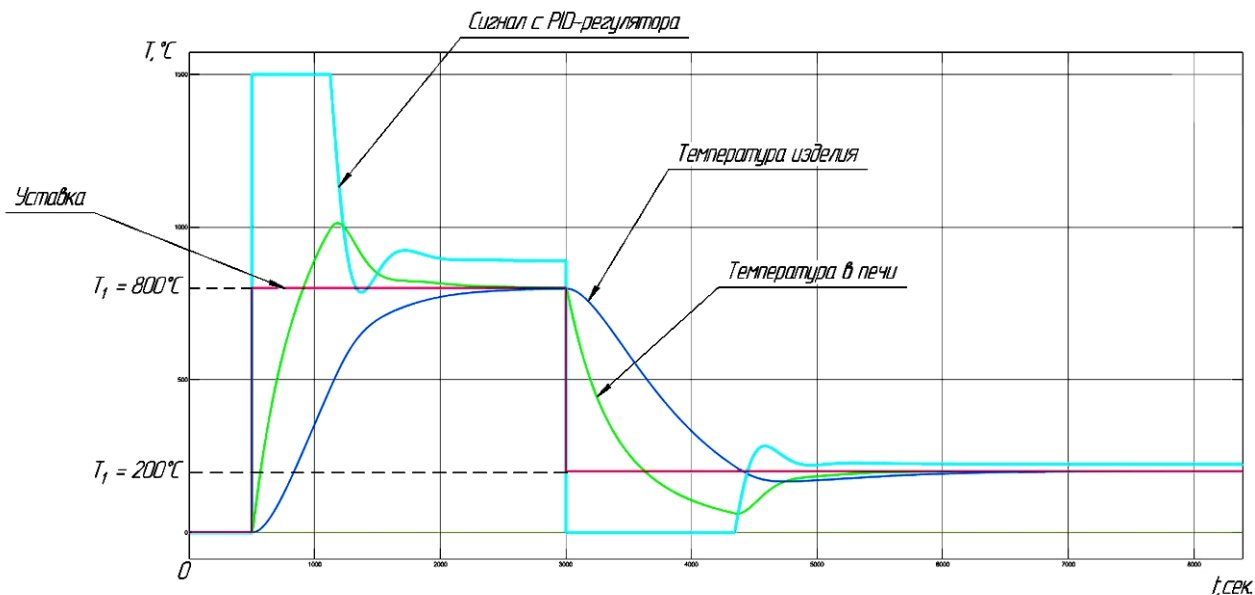


Рис. 4. Переходная характеристика при $T_1 = 800^\circ\text{C}$, $t_1 = 9$ мин и $T_2 = 200^\circ\text{C}$, $t_2 = 50$ мин

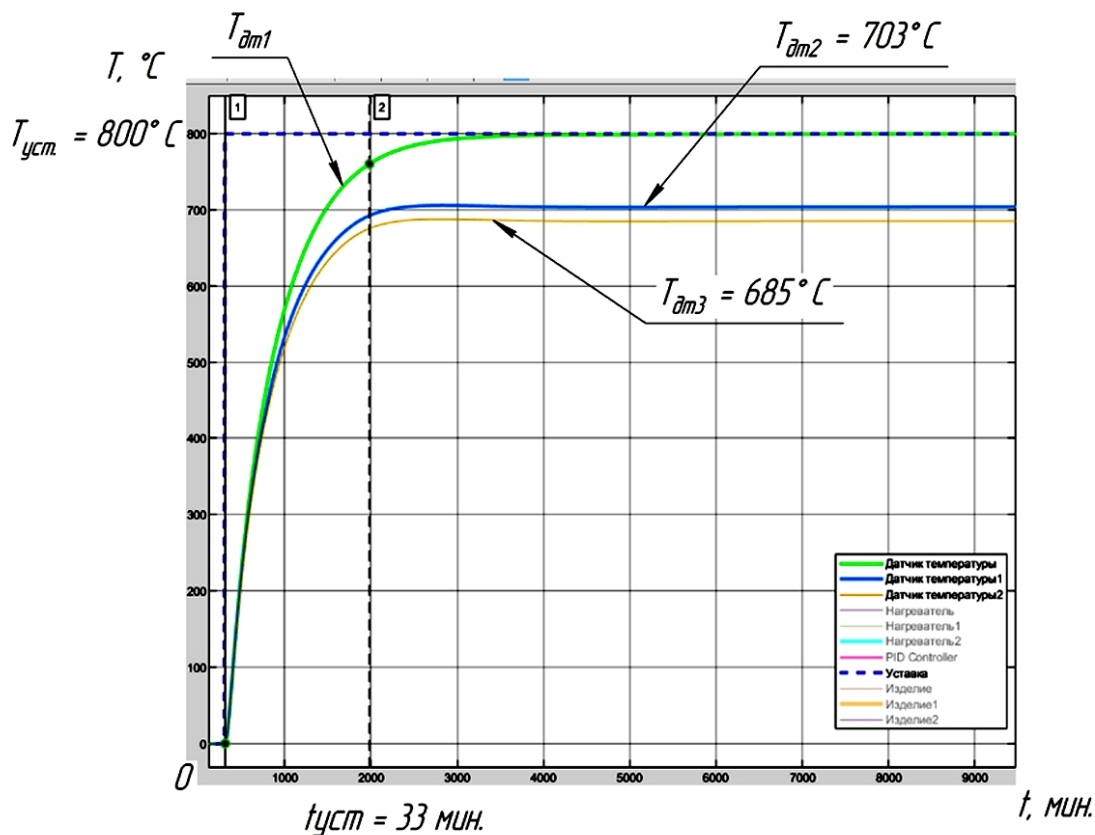


Рис. 5. Переходная характеристика, полученная с трех датчиков температуры

На рис. 5 видны значения с трех датчиков температуры, которые показывают, что температура в зонах 2 и 3 имеет значение меньше установленной и заданной величины в 800, 703 и 685° С соответственно. Такая разница температуры объясняется расположением 2 и 3 зон вблизи дверцы печи, где объем изоляции имеет меньший коэффициент теплосопротивления и соответственно большие теплопотери.

Для наглядности эффекта и уточнения расчётов была смоделирована ЭПС в среде автоматизированного проектирования SolidWorks и проведен термический анализ пространства рабочей камеры и изоляции печи.

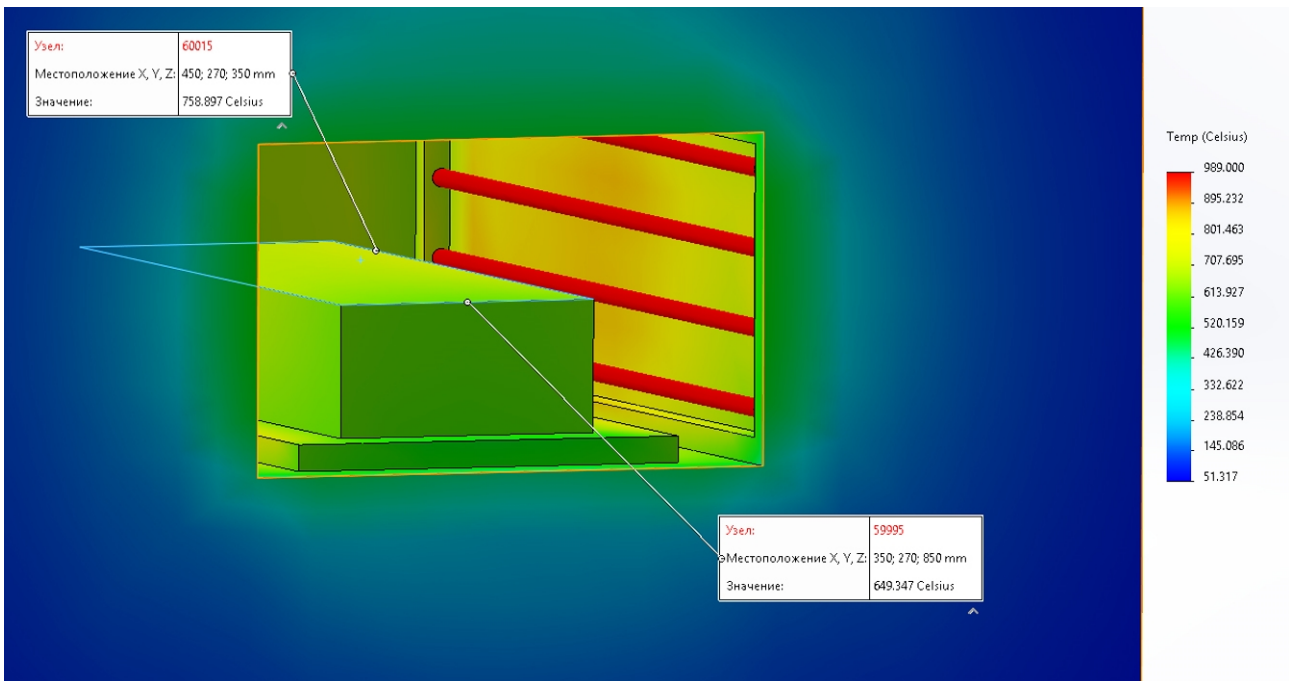


Рис. 6. Термический анализ рабочего пространства печи

На рис. 6 видно, что температура на поверхности заготовки в крайних зонах имеет разницу 109° С. По результатам математической модели и проведённого термического анализа можно сделать вывод, что данной ЭПС не может быть присвоен класс термооборудования в соответствии со стандартом AMS 2750.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая результаты, полученные с помощью математической модели ЭПС, можно утверждать, что предлагаемый метод регулирования с применением ПИД-регулятора позволяет обеспечить многозонную температурную обработку (рис. 4). В отличие от позиционного регулирования [11] в системе отсутствуют перерегулирование и колебания температуры. Без внешних возмущений система выходит на заданное значение температуры и поддерживает её.

Применение математической модели при дальнейшей разработке и внедрении системы управления на объектах позволит проанализировать поведение системы в каждом конкретном случае на этапе проектирования и избежать дополнительных затрат на проведение реальных испытаний. Модель облегчит процесс разработки управляющей программы для контроллера и позволит рассчитать коэффициенты для регулятора температуры заранее.

Применение трехмерной модели печи сопротивления в программе SolidWorks и проведение термического анализа рабочего пространства можно считать необходимым условием для автоматического поиска оптимальных конструктивных и технологических решений, таких как расположение датчиков температуры, объем изоляции, мощность нагревательных элементов. Термический анализ позволит оценить однородность температуры для определения класса термооборудования в соответствии со стандартом AMS2750.

Такие жесткие требования к данным характеристикам предъявляются при термической обработке металлических тонкостенных изделий, керамических изделий и при процессах пайки многосоставных металлокерамических узлов, когда для обеспечения собираемости используются припой со схожей температурой плавления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Турицын Ю.А., Баранникова И.В., Пасечник И.А. Обзор современных АСУ ТП и АСДУ на промышленных предприятиях. Москва: ГИАБ, 2014. 147 с.
2. Кисаримов Р.А. Практическая автоматика: справочник. Москва: РадиоСофт, 2015. 192 с.
3. Полетыкин А.Г. Проблемы управления. Москва: СенСиДат-Контрол, 2015. 75 с.
4. Гуськов А.В., Милевский К.Е. Технологические процессы обработки металлов. Новосибирск: НГТУ, 2017. 128 с.
5. Андык В.С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Москва: Юрайт, 2018. 406 с.
6. Чередниченко В.С., Бородачев А.С., Артемьев В.Д. Электрические печи сопротивления. Новосибирск: НГТУ, 2006. 623 с.
7. Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Автоматизация производственных процессов в машиностроении. Вологда: Инфра-М, 2011. 272 с.
8. Схиртладзе А.Г. Автоматизация производственных процессов в машиностроении. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 600 с.
9. Дастин Э. Тестирование программного обеспечения. Внедрение, управление и автоматизация / пер. с англ. М. Павлова. Москва: Лори, 2013. 567 с.

10. Лахтин Ю.М. Термическая обработка в машиностроении. Москва: Машиностроение, 1980. 783 с.

11. Осипов В.С., Данилушкин А.И., Базаров А.А. Позиционное регулирование температуры электрической печи нагрева сопротивления // Вестник Самарского государственного технического университета. 2018. № 4. С. 122-132.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Шустов Владислав Андреевич –

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

Vladislav A. Shustov –

Postgraduate, Department of Technical Mechanics and Mechatronics,
Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov

Статья поступила в редакцию 03.11.2022, принята к опубликованию 06.12.2022

УДК 681.2

О.В. Захаров, А.С. Яковишин, А.В. Жуков

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРОВ СЕРИИ ISO 16610 ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ. ЧАСТЬ 3. ПРОФИЛЬНЫЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

Аннотация. Вашему вниманию предлагается третья статья из цикла, посвященного применению серии стандартов ISO 16610 для фильтрации профиля и структуры поверхности. В настоящей статье представлен анализ профильных морфологических фильтров по ISO 16610-41:2015. Морфологические фильтры являются нелинейными и естественно робастными и эффективно дополняют фильтры Гаусса. К достоинствам морфологических фильтров относят простоту устранения краевых эффектов и отсутствие необходимости предварительного исключения из профиля компоненты формы. Поэтому их целесообразно применять для анализа мультифункциональных поверхностей. Расширяет возможности фильтрации переменный симметричный фильтр по ISO 16610-49:2015. Последовательно чередуя морфологические операции замыкания и размыкания, можно получить различную степень подавления впадин и пиков профиля. Наиболее перспективным будет асимметричный морфологический фильтр, в котором используются различные индексы вложения для комбинаций операций замыкания и размыкания. В настоящее время асимметричный морфологический фильтр не стандартизован. Поэтому выбор соотношения индексов вложения остается открытым вопросом.

Ключевые слова: измерение, метрология поверхности, шероховатость, фильтрация, профильный фильтр, морфологический фильтр

O.V. Zakharov, A.S. Yakovishin, A.V. Zhukov

APPLICATION OF ISO 16610 SERIES FILTERS FOR THE SURFACE STRUCTURE AND PROFILE MORPHOLOGICAL FILTERS

Abstract. The article deals with application of the series of ISO 16610 standards for filtering profile and surface structures. Analysis of the profile morphological filters in line

with ISO 16610-41:2015 is presented. Morphological filters are non-linear and robust, and effectively complement the Gaussian filters. Advantages of morphological filters include simple elimination of end effects and absence of necessity for prior elimination of the form component from the profile. Therefore, it is advisable to use them for the analysis of multifunctional surfaces. The variable symmetrical filter in accordance with ISO 16610-49:2015 expands the filtering possibilities. By interchanging opening and closing morphological operations, it is possible to obtain various suppression degrees for profile valleys and peaks. The asymmetric morphological filter is most promising due to its various embedding indices for combinations of opening and closing operations. Currently, the asymmetric morphological filter is not standardized. Therefore, correlation of the embedding indices is so far a challenging issue.

Keywords: measurement, surface metrology, roughness, filtration, profile filter, morphological filter

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОСНОВА МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

Морфологические фильтры представляют собой отдельную группу профильных фильтров [1, 2]. Данные фильтры нелинейные и естественно робастные [3]. В машиностроении все большее применение получают мультифункциональные поверхности и изделия аддитивного производства.

В первом случае поверхности содержат два и более уровня шероховатости. Например, поверхности после хонингования имеют протяжённые плато и узкие глубокие впадины. Во втором случае при достаточно высоком уровне шероховатости имеются особенности структуры.

Традиционное использование линейного и робастного регрессионного фильтров Гаусса в этом случае имеет недостатки [4, 5]. Для линейного фильтра Гаусса характерны краевые эффекты, в результате чего отсекается 20-60 % данных измерений.

Для регрессионного фильтра Гаусса предварительно требуется удаление компоненты формы из профиля. Известен целый ряд исследований, показавших высокую эффективность морфологических фильтров для анализа мультифункциональных поверхностей [6, 7], сложнопрофильных поверхностей [8], изделий аддитивного производства [9, 10]. Также морфологический фильтр может применяться для реконструкции профиля, полученного при измерении с помощью координатно-измерительных машин [11].

Основой морфологических фильтров можно считать механическую фильтрацию и метод Motif [12, 13], который включен в новый стандарт [14]. Морфологические фильтры изначально ориентированы на анализ функциональных свойств поверхностей. При

Машиностроение

морфологической фильтрации поверхностей проще описывать их трибологические свойства – скольжение, прилипание, герметизацию [15].

В основе морфологических фильтров лежит математическая морфология. Первоначально математическая морфология развивалась в области обработки изображений, затем она была внедрена в метрологию поверхности. Существуют две основные морфологические операции – наращивание и эрозия, и две вторичные операции – замыкание и размыкание (рис. 1). Операторы замыкания и размыкания представляют собой простые морфологические фильтры.

Морфологические операции определяются на основе сложения и вычитания Минковского с использованием представлений множества [17, 18]. Для проведения операций морфологической фильтрации необходимо выбрать структурный элемент в виде диска или горизонтального сегмента прямой. Индекс вложения есть размер структурного элемента.

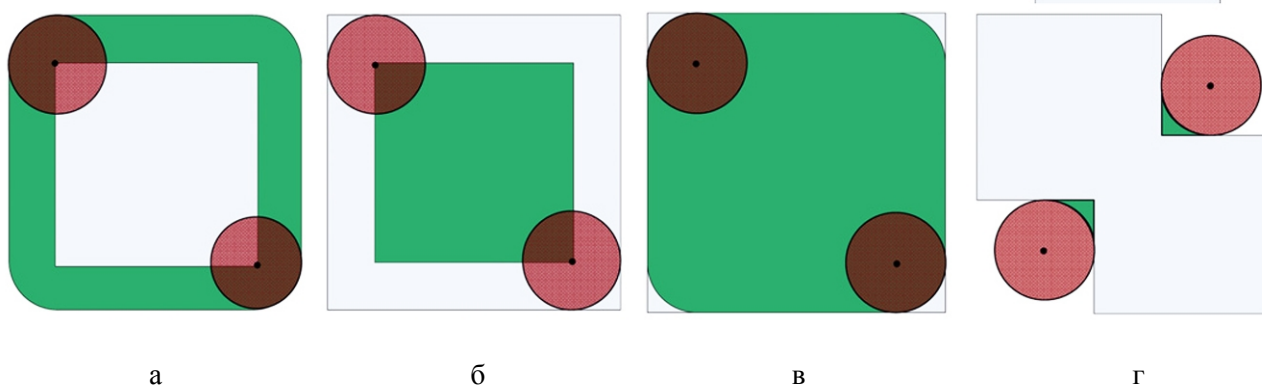


Рис. 1. Морфологические операции: а – наращивание, б – эрозия, в – размыкание, г – замыкание [16]

Операция замыкания является вторичной операцией морфологической фильтрации. Вначале выполняется операция наращивания над входным профилем, чтобы получить расширенный профиль. Затем на этом расширенном профиле выполняется операция эрозии. Этот двухэтапный процесс наращивания и эрозии называется операцией замыкания, а результат называется профилем замыкания.

Операция размыкания также является вторичной операцией, выполняемой в два этапа аналогично замыканию. Однако при размыкании вначале выполняется операция эрозии на входном профиле, чтобы получить профиль эрозии, а затем выполняется операция наращивания на профиле эрозии, чтобы получить профиль размыкания. На рис. 2 приведен пример профиля размыкания с различными структурными элементами.

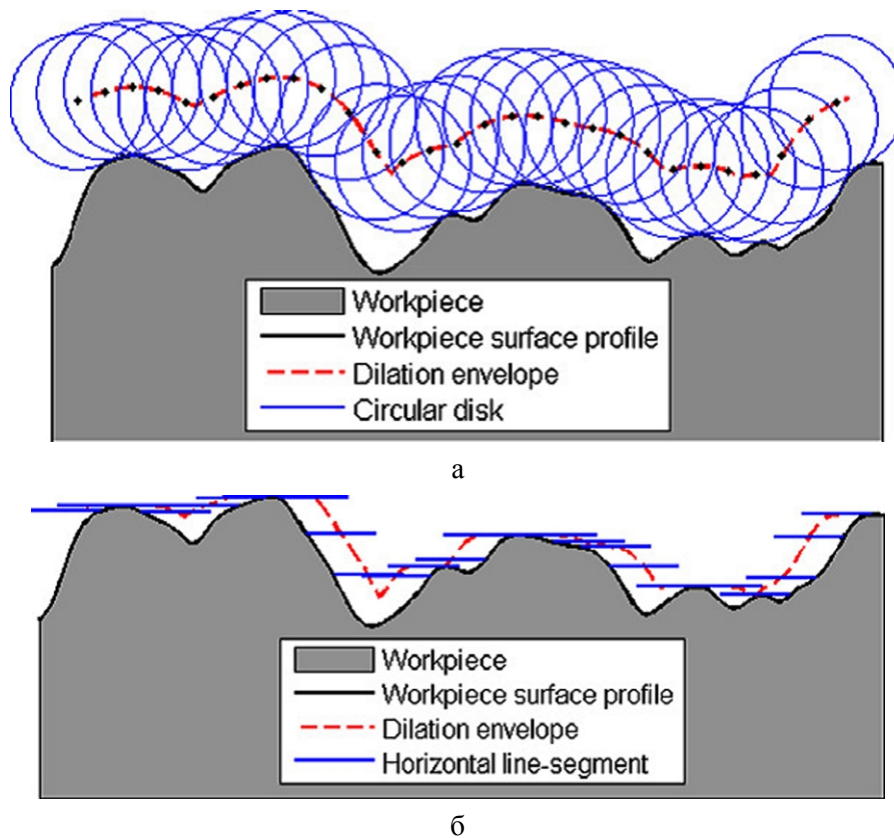


Рис. 2. Профиль размыкания с использованием структурного элемента:
а – диск, б – сегмент прямой линии [12]

Операция наращивания обозначится оператором \otimes и реализуется через построение кривой, которая описывается центром структурного элемента (диска) k при его последовательном огибании над первичным профилем A [19]:

$$D(A, k) = Ak^{\sim},$$

где оператор \sim означает зеркальное отражение относительно горизонтальной плоскости.

Операция эрозии реализуется через построение огибающей под первичным профилем:

$$E(A, k) = (A^{\sim} \otimes k^{\sim}).$$

С целью исключения вертикального смещения огибающей используют вторичные операции – замыкания и размыкания. Операция замыкания \bullet представляет простейший морфологический фильтр и реализуется как комбинация двух базовых операций: наращивания и эрозии:

$$C(A, k) = A \bullet k = E[D(A, k), k].$$

Фильтр замыкания подавляет глубокие впадины на профиле, сохраняя при этом выступы. Такое избирательное подавление неровностей имеет практический интерес при анализе триботехнических свойств поверхности. Двойственная к закрытию операция размыкания \circ является комбинацией эрозии и последующего расширения:

$$O(A, k) = A \circ k = D[E(A, k), k].$$

Фильтр размыкания обладает противоположными эффектами: подавляет выступы, но оставляет впадины. Это требуется при изучении смазочных свойств или долговечность покрытия. Результат процесса морфологической фильтрации иллюстрирует рис. 3. Морфологическая фильтрация устраняет элементы, ширина которых меньше размера структурного элемента. Пример дан для структурного элемента в виде горизонтальной линии.

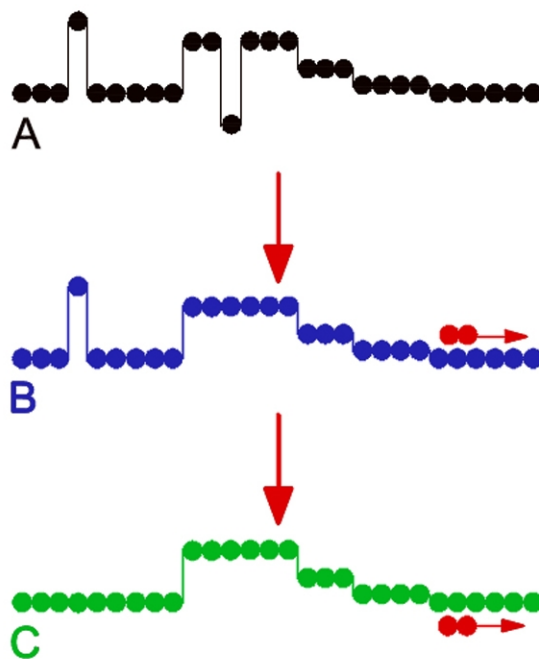


Рис. 3. Результат операций замыкания и размыкания с горизонтальным линейным структурным элементом: А – первичный профиль, В – профиль замыкания, С – профиль размыкания [18]

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОФИЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Для проведения операций морфологической фильтрации необходимо выбрать структурный элемент. Согласно ISO 16610-41:2015 используются структурные элементы в виде диска (вариант по умолчанию) или горизонтального сегмента прямой. Размер структурного элемента, т. е. радиус диска – это индекс вложения. Структурные элементы представляются дискретно (рис. 4).

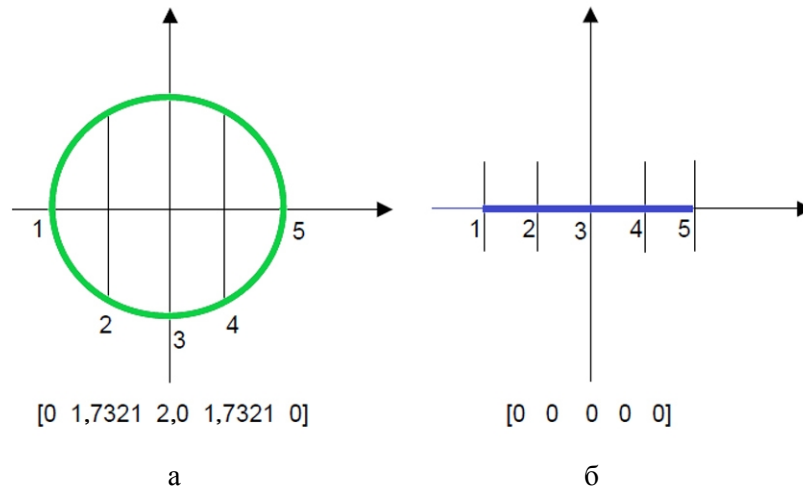


Рис. 4. Структурные элементы: а – диск, б – прямая линия [20]

Основополагающими работами по морфологическим фильтрам стали [21, 22]. В них было показано, что разделение шероховатости, волнистости и погрешности формы контролируется радиусом окружности качения в E-системе измерения. Дискретный алгоритм и программа MATLAB, представленные в [23], легли в основу стандарта ISO 16610-41:2015. Основная идея алгоритмов наращивания и эрозии заключалась в размещении начала структурного элемента в каждой точке исходных данных и суммировании их координат. Экстремальные значения в каждой точке выборки собирались и представлялись в качестве выходных данных (рис. 5).

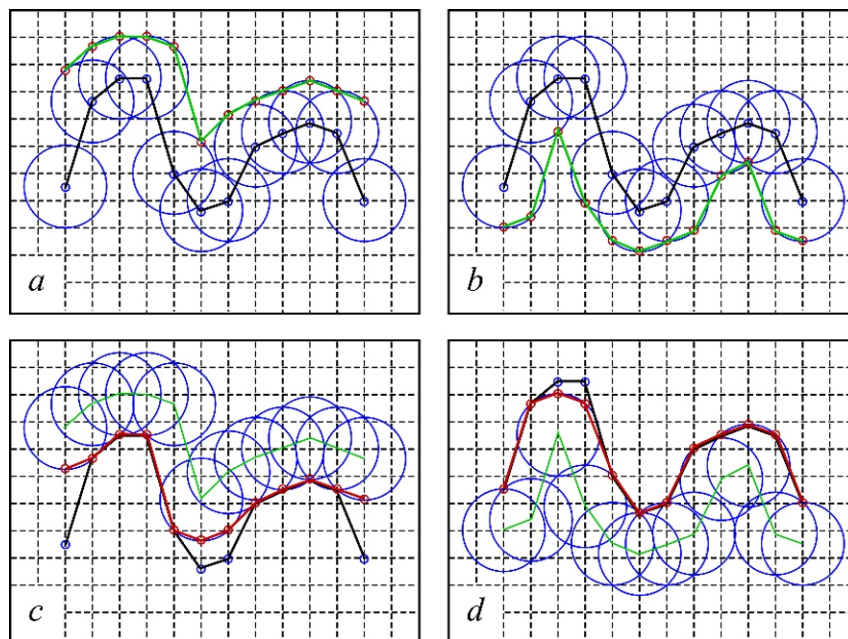


Рис. 5. Морфологические операции: а – наращивание, б – эрозия, с – размыкание, d – замыкание

Особенностью алгоритма стало то, что структурный элемент благодаря симметричности описывался только в первом квадранте, а при операциях наращивания и эрозии учитывались конечные эффекты.

Пример фильтрации профиля длиной 0,8 мм со структурным элементом в виде диска радиусом 0,2 мм дан на рис. 6. Черным цветом показан первичный профиль, зеленым цветом на рис. 6 а – операция эрозии, на рис. 6 б – операция размывания, синим цветом на рис. 6 а – операция наращивания, на рис. 6 б – операция замыкания. На рис. 6 в показаны профили размывания и замыкания. Видно, что размывающий фильтр удаляет пики, ширина которых меньше индекса вложения, а замыкающий фильтр удаляет впадины, ширина которых меньше индекса вложения. После принятия стандарта ISO 16610-41:2015 данный алгоритм был реализован в отечественных программах [24].

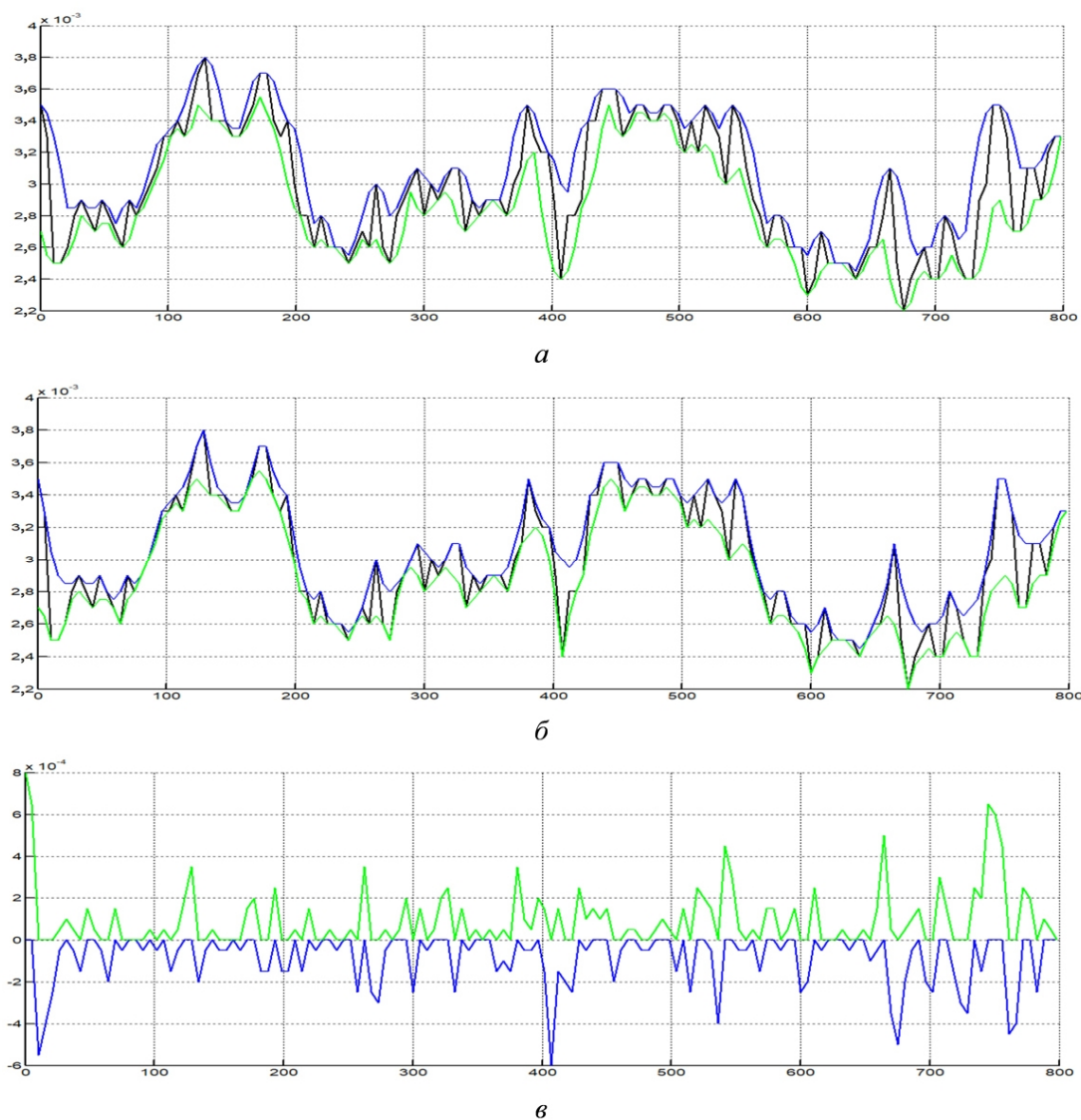


Рис. 6. Морфологическая фильтрация: а – операции наращивания и эрозии; б – операции замыкания и размывания; в – профили после фильтрации

Основное ограничение известных дискретных алгоритмов для морфологической фильтрации заключается в исходном задании равномерного шага. Только в этом случае дискретные отсчёты для профиля и структурного элемента могут быть сопоставлены. Для традиционных профилометров равномерный шаг реализуется за счёт перемещения щупа относительно измеряемой поверхности с постоянной скоростью и снятия данных через равные интервалы времени. Однако введённое допущение затрудняет использование таких алгоритмов для данных, полученных с помощью КИМ. Поэтому в [25] предложен модифицированный алгоритм на основе кусочно-линейной интерполяции первичного профиля для фильтрации. Основным достоинством модифицированного алгоритма является возможность использовать дискретные профили с переменным шагом.

Сравнительно низкая производительность стандартного дискретного алгоритма морфологической фильтрации заставила искать альтернативные алгоритмы. В [26] был предложен алгоритм альфа-формы, основанный на триангуляции Делоне. Альфа-форма представляет собой выпуклую оболочку множества точек, из которой извлекаются грани в виде набора симплексов (рис. 7). Полученный результат близок к аналогичному по стандартному дискретному алгоритму, но реализующие численные методы позволяют уменьшить время расчета. Разница по производительности становится значимой при числе точек на профиле свыше 10000.

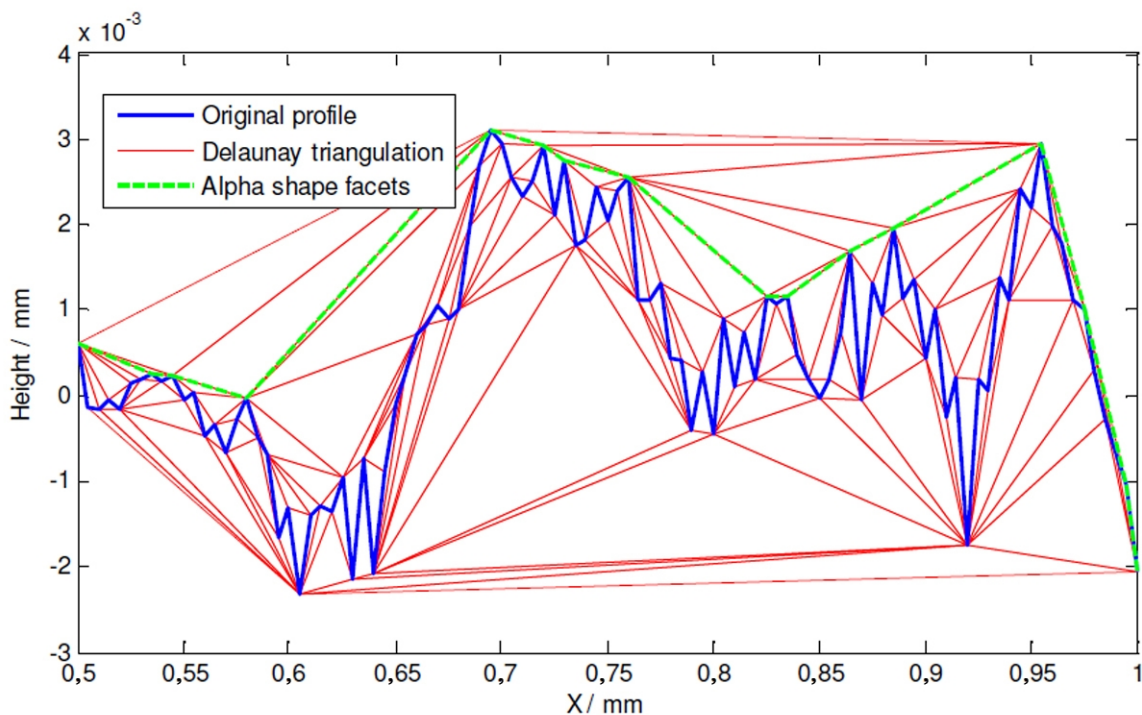


Рис. 7. Альфа-форма, извлеченная из профиля с помощью триангуляции Делоне [16]

ПЕРЕМЕННЫЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

Размыкающий фильтр определенного масштаба удаляет из первичного профиля пики, ширина которых меньше этого масштаба, а замыкающий фильтр удаляет впадины. Для одновременного устранения как пиков, так и впадин, ширина которых меньше индекса вложения, требуются чередующиеся (переменные) симметричные фильтры по ISO 16610-49:2015.

Переменный симметричный фильтр представляет собой морфологический фильтр, удовлетворяющий критерию сита, который может устранять пики и впадины ниже заданного масштаба k . Практически это реализуется за счет последовательности операций замыкания C и размыкания O :

$$OC(A, k) = O[C(A, k), k];$$

$$CO(A, k) = C[O(A, k), k].$$

Размыкающе-замыкающий фильтр OC сохраняет основные свойства размыкающего фильтра. Эталонный профиль проходит по нижней границе первичного профиля. Влияние замыкающего фильтра проявляется в частичном подавлении впадин профиля. Замыкающе-размыкающий фильтр CO , наоборот, сохраняет основные свойства замыкающего. Данный фильтр частично подавляет пики профиля.

Согласно ISO 16610-49:2015 возможны четыре варианта комбинаций операций: $m = 3(O)$, $n = O(3)$, $r = 3(O(3))$, $s = O(3(O))$. Пример фильтрации переменными симметричными фильтрами показан на рис. 8. Использован первичный профиль, показанный на рис. 6. Проведенные нами исследования показали, что результаты фильтров r и s полностью соответствуют фильтрам m и n .

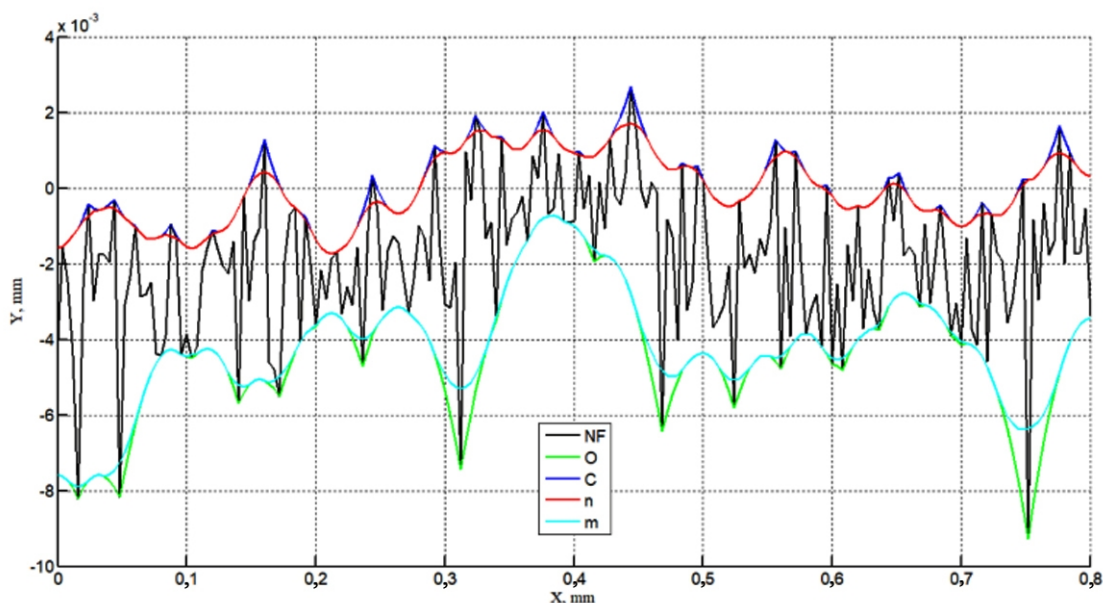


Рис. 8. Переменные симметричные фильтры

Симметричные морфологические фильтры не позволяют учесть все особенности конкретной поверхности. Поэтому в [21] было предложено использовать два структурных элемента разного радиуса.

В итоге результирующий профиль подавляет все глубокие впадины и позволяет избежать дрейфа в сторону изолированных пиков. Подобный фильтр получил название асимметричного морфологического фильтра. Пример фильтрации переменными симметричными фильтрами показан на рис. 9. Фильтры n1, m1, n2, m2 имеют размеры дискового структурного элемента 0,02 и 0,2 мм.

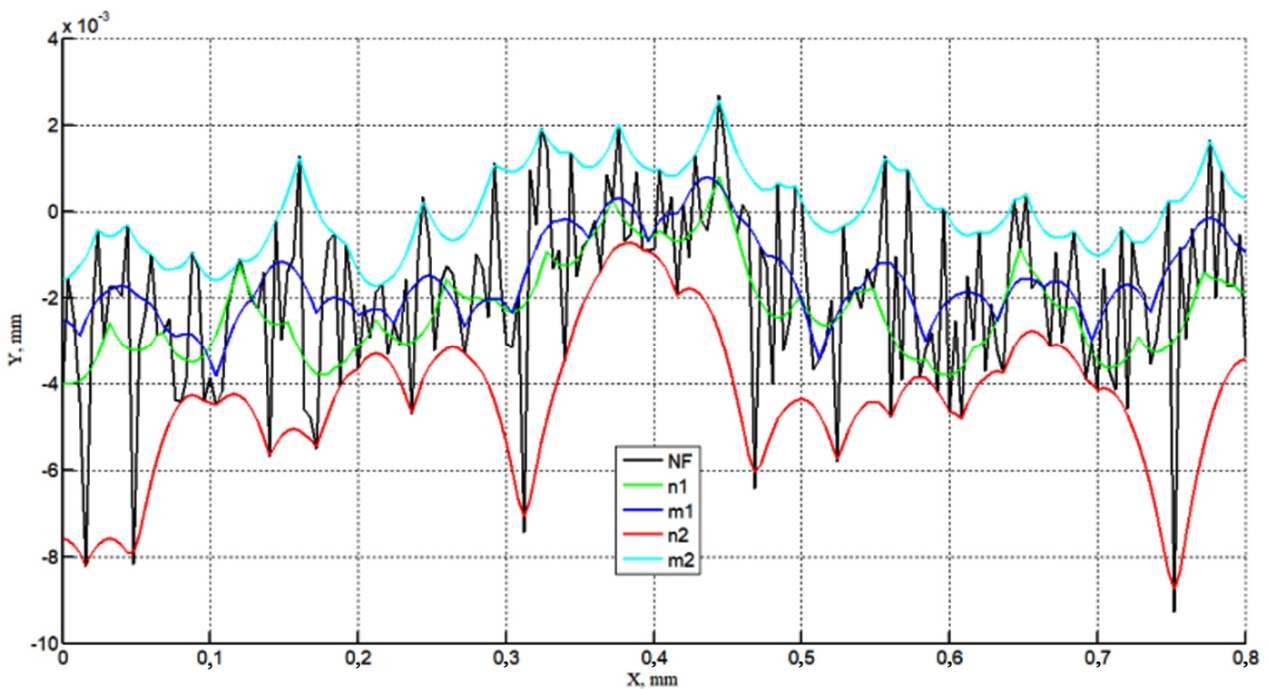


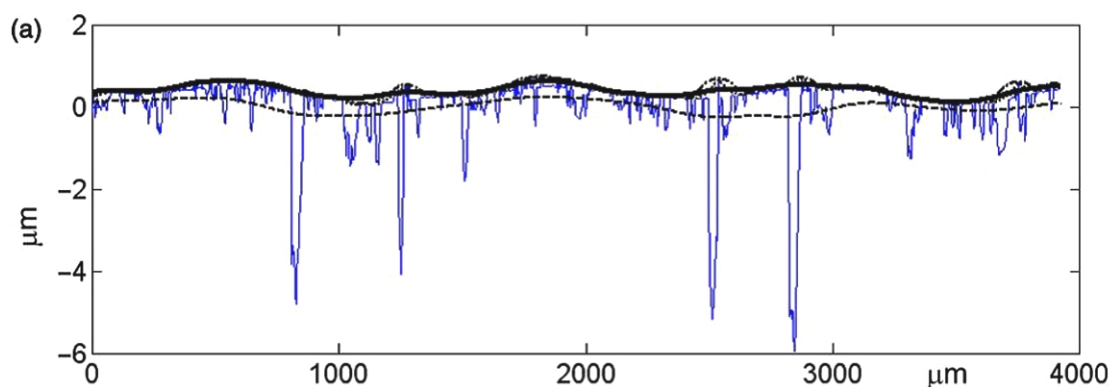
Рис. 9. Переменные асимметричные фильтры

В [20] показано, что применение замыкающе-размыкающего фильтра m хорошо работает для многих профилей, поскольку подавляет все глубокие впадины. Однако для профилей с несколькими большими изолированными пиками эталонный профиль будет значительно смещен в сторону изолированных пиков. Для преодоления этой проблемы используются два диска разного диаметра.

С помощью диска меньшего диаметра сначала над профилем выполняются операции замыкания и размыкания, чтобы получить профиль замыкания. Это значительно подавит все впадины и пики. Затем больший диск используется для выполнения операций замыкания и размыкания над замыкающе-размыкающим профилем, созданным на первом этапе. Результирующий профиль подавляет все глубокие впадины и позволяет избежать дрейфа эталонного профиля в сторону изолированных пиков. Результи-

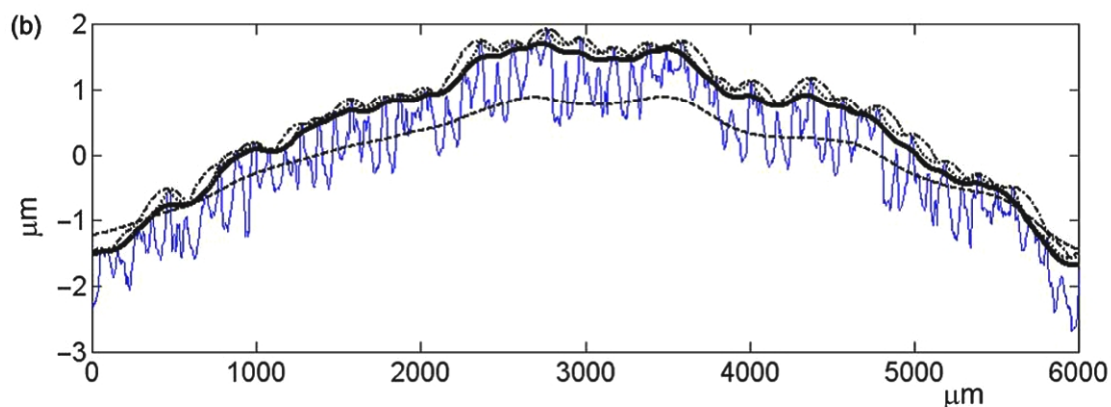
Машиностроение

рующий профиль будет иметь такую же кривизну, как и кривизна большего диска. Выбор радиуса меньшего диска должен производиться в зависимости от радиуса большего диска (эквивалентная отсечка фильтра). Обосновано, что радиус меньшего диска выбирают равным 0,316 радиуса большего диска. Например, если радиус большего диска составляет 0,8 мм, то для меньшего диска используется радиус 0,25 мм. Пример применения асимметричного фильтра для разных профилей дан на рис. 10. Видно, что асимметричный фильтр показывает лучший результат, чем симметричные фильтры и регрессионный фильтр Гаусса.



Valley outliers introduced

($h_s = 2,11 \mu\text{m}$, $R_s = 3,8 \text{ mm}$, $h_L = 0,75 \mu\text{m}$, $R_L = 105,9 \text{ mm}$, $h = 6,66 \mu\text{m}$, $R = 12,01 \text{ mm}$)



Form error introduced

($h_s = 0,81 \mu\text{m}$, $R_s = 9,84 \text{ mm}$, $h_L = 1,65 \mu\text{m}$, $R_L = 48,47 \text{ mm}$, $h = 2,57 \mu\text{m}$, $R = 31,13 \text{ mm}$)

- Closing filter
- Gaussian regression filter – zeroth order
- Proposed filter
- - - - - Envelope filter

Рис. 10. Смоделированные профили: а – с выбросами впадин, б – с погрешностью формы [20]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Морфологические профильные фильтры являются нелинейными и естественно робастными и эффективно дополняют фильтры Гаусса. Однако область их применения в настоящее время не определена. К достоинствам морфологических фильтров относят простоту устранения краевых эффектов и отсутствие необходимости предварительного исключения из профиля компоненты формы. Поэтому их целесообразно применять в первую очередь для анализа мультифункциональных поверхностей. Большие возможности для фильтрации предоставляют переменные симметричные фильтры. Последовательно чередуя морфологические операции замыкания и размыкания, можно получить различную степень подавления впадин и пиков профиля. Наиболее перспективным будет асимметричный морфологический фильтр, в котором используются различные индексы вложения для комбинаций операций замыкания и размыкания. В настоящее время асимметричный морфологический фильтр не стандартизован. Поэтому выбор соотношения для индексов вложения остается предметом дальнейших исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-01269).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Захаров О.В., Яковишин А.С., Жуков А.В. Применение фильтров серии ISO 16610 для анализа структуры поверхности. Ч. 1. Обзор профильных фильтров // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 2. С. 22-37.
2. Захаров О.В., Яковишин А.С., Жуков А.В. Применение фильтров серии ISO 16610 для анализа структуры поверхности. Ч. 2. Профильные фильтры Гаусса // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 3. С. 46-60.
3. ГОСТ Р 8.895-2015. Геометрические характеристики изделий. Фильтрация. Часть 1. Обзор и основные понятия.
4. A review of digital filtering in evaluation of surface roughness / B. He, H. Zheng, S. Ding, R. Yang, Z. Shi // Metrology and Measurement Systems. 2021. Vol. 28. pp. 217-253.
5. Podulka P. Comparisons of envelope morphological filtering methods and various regular algorithms for surface texture analysis // Metrology and Measurement Systems. 2020. Vol. 27. pp. 243-263.
6. Jiang X. Robust solution for the evaluation of stratified functional surfaces // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2010. Vol. 59. pp. 573-576.

7. Pawlus P., Reizer R., Wieczorowski M. Analysis of surface texture of plateau-honed cylinder liner – A review // Precision Engineering. 2021. Vol. 72. pp. 807-822.

8. Bolotov M.A., Pechenin V.A., Murzin S.P. Method for uncertainty evaluation of the spatial mating of high-precision optical and mechanical parts // Computer Optics. 2016. Vol. 40. pp. 360-369.

9. Geometrical metrology for metal additive manufacturing / R.K. Leach, D. Bourell, S. Carmignato, A. Donmez, N. Senin, W. Dewulf // CIRP Annals. 2019. Vol. 68. pp. 677-700.

10. Study of Laser Beam Modulation Influence On Structure of Materials Produced by Additive Manufacturing / A. Okunkova, M. Volosova, P. Peretyagin, I. Zhirnov, P. Podrabinnik, S.V. Fedorov, A. Gusarov // Advanced Materials Letters. 2016. Vol. 7. pp. 111-115.

11. Повышение точности воспроизведения и передачи единицы длины в области измерений параметров шероховатости поверхности нанометрового диапазона контактными профилометрами / В.Г. Лысенко, В.А. Костеев, Е.А. Милованова, Н.А. Табачникова и др. // Законодательная и прикладная метрология. 2021. № 5. С. 37-47.

12. Lou S., Jiang X., Scott P.J. Correlating motif analysis and morphological filters for surface texture analysis // Measurement. 2013. Vol. 46. pp. 993-1001.

13. ISO 12085:1996. Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture: Profile method. Motif parameters.

14. ISO 21920-2:2021. Geometrical product specifications (GPS). Surface texture: Profile. Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.

15. Dietzsch M., Gerlach M., Groger S. Back to the envelope system with morphological operations for the evaluation of surfaces // Wear. 2008. Vol. 264. pp. 411-415.

16. Lou S., Jiang X., Scott P.J. Applications of morphological operations in surface metrology and dimensional metrology // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 483. pp. 012020.

17. ISO 16610-41:2015. Geometrical product specifications (GPS). Filtration. Part 41: Morphological profile filters: Disk and horizontal line-segment filters.

18. ISO 16610-49:2015. Geometrical product specifications (GPS). Filtration. Part 49: Morphological profile filters: Scale space techniques.

19. Применение морфологической пространственной фильтрации неровностей поверхности для трёхмерной параметрической оценки текстуры / В.В. Порошин, Д.Ю. Богомолов, О.В. Порошин, В.Г. Лысенко // Метрология. 2016. № 2. С. 3-14.

20. Kumar J., Shunmugam M.S. A new approach for filtering of surface profiles using morphological operations // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2006. Vol. 46. pp. 260-270.

21. Radhakrishnan V. Selection of an enveloping circle radius for E-system roughness measurement // International Journal of Machine Tool Design and Research. 1972. Vol. 12. pp. 151-159.

22. Serra J. Image analysis and mathematical morphology. Vol. 1. Academic Press, New York, 1982.

23. Srinivasan V. Discrete morphological filters for metrology // Proceedings of the sixth IMEKO ISMQC symposium on metrology for quality control in production. TU Wein, Austria, September 8-10, 1998.

24. Марков Б.Н., Меликова О.Н., Шулепов А.В. Алгоритм построения морфологического дискового фильтра для анализа шероховатости поверхности // Измерительная техника. 2017. № 5. С. 30-33.

25. Дискретный алгоритм на основе кусочно-линейной интерполяции для дискового морфологического фильтра / О.В. Захаров, А.Г. Лаптев, В.Г. Лысенко, Е.А. Милованова, Н.А. Табачникова // Измерительная техника. 2022. № 8. С. 35-40.

26. Jiang X., Lou S., Scott P.J. Morphological method for surface metrology and dimensional metrology based on the alpha shape // Measurement Science and Technology. 2012. Vol. 23. pp. 015003.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Захаров Олег Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Oleg V. Zakharov – Dr. Sci. Tech., Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Яковишин Александр Сергеевич – ассистент кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexander S. Yakovishin – Assistant Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Жуков Андрей Владимирович – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Andrey V. Zhukov – Undergraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 18.11.2022, принята к опубликованию 06.12.2022

А.В. Панфилова

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УДАЛЕНИЯ ОКАЛИНЫ

***Аннотация.** В статье представлены основные виды окалины, возникающие при получении проката, наиболее распространенные методы ее удаления и кратко – технологии их реализации.*

***Ключевые слова:** прокат, окалина, методы, способы, технология*

A.V. Panfilova

MODERN METHODS OF SCALE REMOVAL

***Abstract.** The article presents the main types of scales that occur in the production of rolled products, the most common methods of their removal, and technologies for their implementation.*

***Keywords:** rolled products, scale, methods, methods, technology*

Производство стального горячекатаного проката сопровождается появлением на его поверхности окалины. Окалина – это смесь оксидов железа, образующаяся при взаимодействии кислорода с раскалённым металлом.

При толщине окалины до 40 нанометров невооружённым глазом она не видна. Если толщина окалины свыше 40 нм, но не превышает 500 нм, то она проявляется цветами побежалости. При значительной толщине окалины – свыше 500 нм – появляется постоянный ее окрас.

Удельный вес прокатной окалины может достигать до 3 % от общего веса готовых изделий. Хотя в некоторых случаях прокатная окалина играет и положительную роль, т. к. может использоваться как сырьё для металлургического производства за счёт высокого содержания (до 75 %) в ней железа и после переработки – очистки от примесей и восстановления – превращается в низкоуглеродистую сталь, окалина является большой проблемой для использования проката в машиностроении.

Окалина, не удаленная с поверхности проката, значительно снижает коррозионную стойкость металла. Поэтому с его поверхности необходимо удалять даже следы окалины полностью.

В настоящее время в промышленности используются различные методы удаления окалины – механические, абразивные, гидравлические, гидроабразивные [1], химические, электрохимические и комбинированные [2].

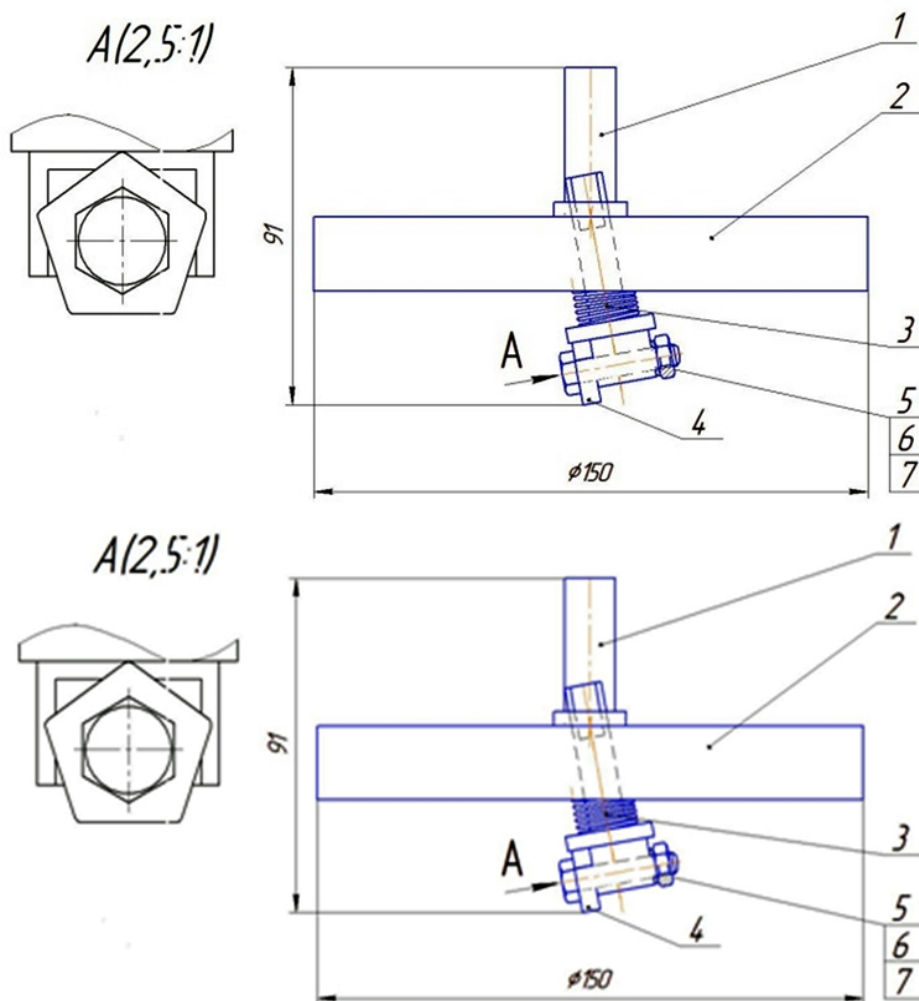
В качестве механических методов используются различные способы воздействия на окалину. Одним из самых распространенных является способ протягивания стального проката или проволоки через ряд роликов. А так как ролики располагаются на различном уровне, при прохождении через них проката происходит частое его изгибание, в результате чего железная окалина рассыпается на отдельные чешуйки и осыпается с поверхности металла.

Для окончательной очистки проката от окалины, а также в качестве самостоятельной абразивной обработки могут использоваться различные абразивные материалы как в связанном, так и в свободном состоянии. В качестве свободного абразива в промышленности используются абразивные материалы (абразивы) – это, как правило, сыпучие материалы, полученные путем дробления природных кристаллических минералов или искусственных (синтетических) материалов. К абразивным способам удаления окалины можно отнести обработку проката шлифованием и шлифовальными лентами.

Кроме того, для окончательной очистки поверхности проката от окалины применяется дробеструйная обработка – это вид механической обработки металлических заготовок, при которой воздушным напором разгоняют дробь и с помощью такой струи производится очистка поверхности проката. При этом в качестве обрабатывающего состава используется чугунная колотая дробь, алюминиевая, стеклянная и др.

При протягивании стального проката через ролики для уменьшения трения стальных поверхностей используется их смазка. Поэтому достоинством этого метода является относительно низкая стоимость операции, но в качестве недостатка следует отметить замасливание окалины, что усложняет и удорожает ее дальнейшее использование.

К высокоэффективным механическим способам можно отнести способ очистки поверхности стального проката по патенту [3, 7]. Способ реализуется устройством, представленным на рисунке. Устройство с режущими пластинами состоит из инструмента 1, корпуса 2, оси 3, пружин 4 и элементов крепления пластины 5, 6, 7. В качестве инструмента используется твердосплавная режущая пластина, закрепленная на цилиндрическом стержне. Инструмент 1 расположен в направлении вращения корпуса 2 под острым углом.



Это уменьшает задний угол пластины, а следовательно, требуемую силу прижима пластины к обрабатываемой поверхности. Но угол разворота должен быть таким, чтобы пластина хорошо осуществляла сдвиг окалины, но не царапала обрабатываемую поверхность. С другой стороны, площадь контакта пластины с обрабатываемой поверхностью должна быть такой, при которой пластина не будет «всплывать» над окалиной. Если при износе пластины режущая кромка будет оставаться острой, то при правильном выборе параметров пластины и угла ее наклона в направлении вращения пластина не потребует частых переточек и будет работать до полного износа. Это существенно уменьшает трудоемкость технического обслуживания устройства.

Нередко в качестве механических способов используются галтовка и крацевание. Крацевание может осуществляться вручную или с использованием станков или инструментов электрического или пневматического типа, как правило, круглыми щетками из тонкой упругой нержавеющей стальной проволоки диаметром 0,1-0,4 мм. Частота вращения щеток 750-1000 мин⁻¹. Поверхность изделий во время крацевания смачивают 3-5-процентным раствором кальцинированной соды или полировочной известью [4, 5].

Галтовку выполняют во вращающихся барабанах совместно с абразивными полирующими материалами с частотой вращения 30-60 об/мин. При этом различают галтовку мокрую и сухую. В первом случае детали обрабатывают с абразивными материалами, к которым добавляют 2-3 %-й раствор соды, во втором – с сухими абразивными материалами [4, 5].

К эффективным способам удаления окалины можно отнести гидравлический (гидросбив, hydraulic descaling) – удаление окалины с поверхности проката водой под высоким давлением [1]. При этом для повышения эффективности процесса удаления окалины струи воды из сопел направляются под заданным углом против движения металла. Технологические параметры, такие как величина угла, давление, расход воды, рассчитываются в зависимости от конкретных условий реализации процесса. Гидросбив широко используют в прокатном производстве для удаления как печной, так и вторичной окалины.

К химическим и электрохимическим способам относятся травление, пассивирование и электролитическое полирование [1, 2, 4, 5].

Травлением называют процесс удаления окалины и оксидов с поверхности металлов путем обработки изделий в растворах кислот и кислых солей или щелочей. Процесс травления предусматривает выполнение следующих операций: обработка в щелочном расплаве, затем промывка в проточной холодной воде, потом травление в растворе кислоты, затем вторичная промывка, пассивирование и окончательная промывка. Заканчивается процесс протиркой и сушкой. Протекающие при реализации технологического процесса травления химические реакции вызывают изменения в структуре окалины, в результате чего она легко разрушается и удаляется. После травления стали, как правило, подвергают пассивированию в 3-5-процентном растворе азотной кислоты. После пассивирования поверхность полуфабрикатов и заготовок принимает серебристо-матовый оттенок и становится чистой. Это в результате приводит к значительному повышению коррозионной стойкости металла. Для того чтобы в процессе пассивирования поверхность металла не чернела, необходимо составлять пассивирующий раствор на чистой воде, не содержащей хлоридов.

Зачастую машиностроительные заводы не имеют установок со щелочными расплавами. В таких случаях перед термической обработкой заготовки для облегчения кислотного травления следует погружать в насыщенный раствор поваренной соли. Во время термической обработки поваренная соль вступает во взаимодействие с окислами металла и окалина, остывая, при малейшем постукивании легко осыпается [4, 5].

С поверхности нержавеющей сталей окалину можно удалять с помощью щелочного раствора перманганата калия. Но так как перманганат калия является доста-

Машиностроение

точно дорогим химикатом, процесс удаления окалины в таком растворе в производственных условиях будет весьма неэкономичным. Поэтому электролитическое травление нержавеющей сталей можно выполнять в 5-10-процентном растворе азотной кислоты при комнатной температуре. При этом продолжительность процесса не превышает 10 мин при катодной плотности тока 3-4 А/дм², катодом является нержавеющая сталь, а анодом – кремнистый чугун [4, 5].

К комбинированным методам удаления окалины можно отнести способ по патенту [6]. Авторы предлагают использовать свой способ для удаления окалины с помощью травления поверхности углеродистой термообработанной стали в металлургии, машиностроении, метизном и других производствах. В способе используют травильные растворы, содержащие хлорное железо и соляную кислоту, и на эту среду с погруженными в нее изделиями воздействуют ультразвуковыми колебаниями в режиме кавитации. Наложение ультразвуковых колебаний ведут импульсами в течение всего цикла снятия окалины с интервалами во времени. Первый импульс накладывают через 3-5 мин после начала погружения изделия в ванну с раствором, второй – в середине цикла, а третий – одновременно с завершением цикла снятия окалины, причем время наложения импульса составляет 2-3 мин. Данный способ позволяет добиться эффективного снятия окалины без повреждения поверхности металла, технологичен, легко поддается автоматизации.

Существуют и другие способы удаления окалины с поверхности проката и заготовок, но в этом обзоре представлены методы и способы, наиболее часто встречающиеся в производственных условиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. <https://nzmetallspb.ru/tehnologii/zheleznaya-okalina-protsess-obrazovaniya-metody-udaleniya.html>. 24.03.2020.
2. <https://studfile.net/preview/383572/page:6>. 24.03.2020.
3. Пат. 2014105408 Российская Федерация, МПК⁷ В08В 1/04. Способ очистки поверхности / Королев А.В., Королев А.А. заявл. 13.02.14; опубл. 20.08.15, Бюл. № 23.
4. Туфанов Д.Г. Коррозионная стойкость нержавеющей сталей, сплавов и чистых металлов. Москва: Металлургия, 1990.
5. https://markmet.ru/tehnologiya_metallov/metody-udaleniya-okaliny-s-poverkhnosti-metalla. 24.03.2020.
6. Пат. 2 168 559 Российская Федерация, МПК. С2. Способ ультразвукового снятия окалины с поверхности металлических изделий / В.И. Лангборт, А.В. Макаров, Т.Ф. Моисеева, В.Т. Зыкин, Ю.А. Самойленко, З.С. Глазунова; опубл. 06.10. 2001.

7. Панфилова А.В. Эволюция разработки способа удаления окалины // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 1 (84). С. 52-58.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Панфилова Анастасия Вячеславовна –
аспирант кафедры «Технология
машиностроения» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Anastasia V. Panfilova –
Postgraduate, Department of Mechanical
Engineering Technology,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Статья поступила в редакцию 05.09.2022, принята к опубликованию 20.12.2022

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 620.193-034

И.Н. Ганиев, М.Х. Исмоилова, С.Э. Отаджонов, М.Р. Рахимов

ВЛИЯНИЕ БЕРИЛЛИЯ НА АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВА Al+1,0 % Si В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА NaCl

Аннотация. Алюминий и его сплавы являются наиболее благоприятным объектом для авиа-, машиностроения и электротехники. В работе потенциостатическим методом при скорости развертки потенциала $2 \text{ мВ} \cdot \text{с}^{-1}$ исследовано влияние бериллия на анодное поведение сплава Al+1,0 % Si в среде электролита NaCl, различной концентрации. Результаты исследования показывают, что добавки бериллия уменьшает скорость анодной коррозии исходного сплава на 15-20 %.

Ключевые слова: сплав Al+1,0 % Si, бериллий, анодное поведение, потенциалы питтингообразования, репассивация, скорость коррозии, плотность тока коррозии

I.N. Ganiev, M.H. Ismoilova, S.E. Otajonov, M.R. Rahimov

EFFECTS OF BERYLLIUM ON THE ANODE BEHAVIOR OF THE AL+1,0% SI ALLOY IN THE NaCl ELECTROLYTE MEDIUM

Abstract. Aluminum and its alloys are most effective in aviation, mechanical engineering and electrical engineering. Effects of beryllium on the anodic behavior of the Al+1,0 % Si alloy in the NaCl electrolyte medium of various concentrations was studied using the potentiostatic method at the potential sweep rate of $2 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$. The results of the research show that beryllium additives reduce the rate of anodic corrosion of the parent alloy by 15-20 %.

Keywords: Al+1,0 % Si alloy, beryllium, anodic behavior, pitting potentials, re-passivation, corrosion rate, corrosion current density

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной науки и техники предъявляет все возрастающие требования к уровню, качеству и разнообразию свойств изделий из цветных металлов. В связи с этим особое значение приобретают производство и использование алюминия и его сплавов, обладающих высокой механической прочностью и пластичностью, малой плотностью, высокой коррозионной стойкостью и рядом других свойств [1-4].

Сплавы на основе особо чистого алюминия с учётом их химического состава используются во всех сферах человеческой деятельности, начиная от высокотехнологичных отраслей электроники, производства транзисторов, диодов и термисторов для образования контактного переходного слоя между алюминием и кремнием, а также для токоподводов к кремниевым пластинкам при производстве кремниевых выпрямителей электрического тока [5, 6].

Объёмы использования во многих отраслях промышленности и бытовой сфере алюминия и его различных сплавов по масштабам сравнимы с объёмами применения сплавов железа, что объяснимо в связи с теми физическими, химическими и механическими свойствами, которыми обладают алюминий, а также его сплавы [3].

Исследование анодного поведения сплавов алюминия в зависимости от среды электролита и его состава представляет важную научную проблему, имеющую большую практическую значимость.

В литературе имеются сведения о влиянии добавок щелочных, щёлочноземельных, редкоземельных и некоторых переходных металлов на коррозионно-электрохимическое поведение алюминиево-бериллиевого сплава Al+1% Be. Этому вопросу посвящены также монографии [7-10].

Однако в литературе не имеется сообщений о влиянии добавки бериллия на коррозионное и электрохимическое поведение сплава Al+1 % Si.

Целью настоящей работы является исследование влияние добавки бериллия на анодное поведение сплава Al+1,0 % Si в среде электролита NaCl.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сплавы для исследования получали в шахтной лабораторной печи сопротивления типа СШОЛ в интервале температур 750-850° С, используя алюминий марки А5N, алюминиево-кремниевые лигатуры 1,0 мас. % Si и металлический бериллий марки БрМ1 (ТУ112-40). Лигатуры алюминия с бериллием и кремнием предварительно синтезировались в вакуумной печи сопротивления.

Взвешивание шихты производили на аналитических весах АРВ-200 с точностью $0.1 \cdot 10^{-6}$ кг. В случае отклонения веса шихты от веса полученного сплава более чем на 2 % плавку повторяли.

Сплавы отливали в графитовой изложнице диаметром 8 мм и длиной 120 мм. Не-рабочая часть образцов изолировалась смолой из смеси канифоли и парафина в соотно-шении 50:50.

Рабочую торцевую часть электродов зачищали наждачной бумагой, полировали, обезжиривали, травили в 10 %-м растворе NaOH, тщательно промывали спиртом и затем погружали в насыщенный хлорид-серебряный электрод.

Исследования проводили на потенциостате ПИ-50-1.1 с самописцем ЛКД-4-002 в среде электролита NaCl по методике, описанной в работах [11-22]. Электродом сравне-ния служил хлорид-серебряный, а вспомогательным – платиновый. Скорость развертки потенциала составляла 2 мВ/с.

Для электрохимических исследований образцы поляризовали в положительном направлении от потенциала, установившегося при погружении образца в исследуемый раствор ($E_{св.кор.}$ – потенциал свободной коррозии, или стационарный) до значения по-тенциала, при котором происходит резкое возрастание плотности тока – 2 А/м² (рис. 1, кривая I).

Затем образцы поляризовали в обратном направлении (рис. 1, кривая II), далее шли в катодную область до значения потенциала -1,350 В, в результате чего происходило подщелачивание при электродном слое поверхности образца (рис. 1, кривой III). Нако-нец, образцы повторно поляризовали в положительном направлении (рис. 1, кривой IV), при этом при переходе от катодного к анодному ходу фиксируется потенциал питтинго-образования ($E_{п.о.}$).

В качестве примера на рис. 1 представлена полная поляризационная кривая для сплава Al+1,0 % Si, в среде электролита 3,0 %-го NaCl. Расчет тока коррозии как основ-ной электрохимической характеристики процесса коррозии проводили по катодной кри-вой с учетом тафельской константы, равной $v_k = 0,12$ В. Скорость коррозии (K) опреде-ляли по току коррозии ($i_{кор.}$) по формуле

$$K = i_{кор.} \cdot k ,$$

где $k = 0,335 \text{ г} / \text{А} \cdot \text{ч}$ – электрохимический эквивалент алюминия.

Результаты исследования анодного поведения сплава Al+1,0% Si с бериллием пред-ставлены в таблице и на рис. 2-4. При изучении коррозионно-электрохимического пове-дения данных сплавов была исследована зависимость потенциала свободной коррозии от времени в течение часа выдержки образцов в электролите NaCl. Результаты показали, что легирование исходного сплава Al+1,0 % Si бериллием смещает электродный потенциал в положительную область (рис. 2).

Потенциал свободной коррозии сплава Al+1,0 % Si после одного часа выдержки в растворе 0,03 %-го хлорида натрия составляет -0,803 В, а у сплава, содержащего 0,5 мас. % бериллия, – 0,750 В (рис. 2).

Рассчитанная из катодных ветвей потенциостатических кривых скорость коррозии сплавов показывает, что добавка бериллия в интервале 0,01 ÷ 0,5 мас. % уменьшает скорость коррозии исходного сплава на 15-20 %.

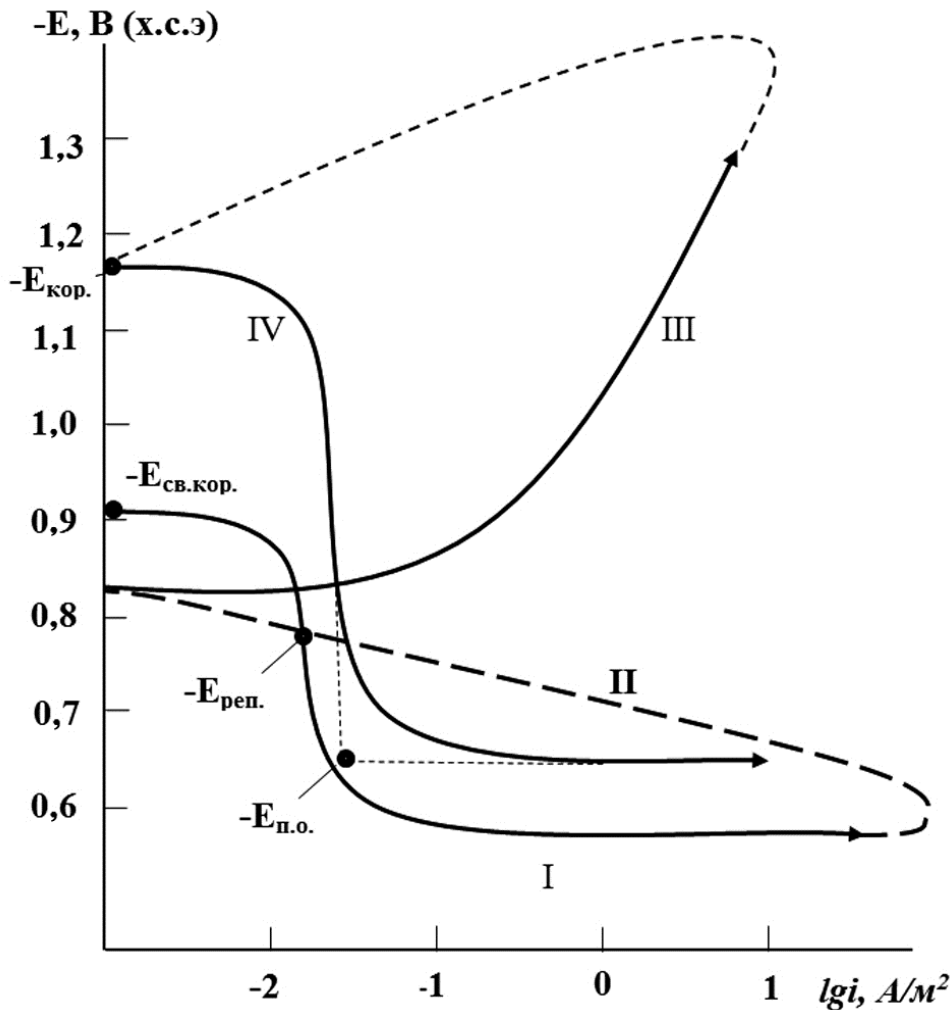


Рис. 1. Полная поляризационная (2 мВ/с) кривая сплава Al+1,0 % Si в среде электролита 3,0 %-го NaCl

Электрохимические характеристики сплава Al+1,0 % Si с бериллием, снятые при скорости развертки потенциала 2 мВ/с, приведены в таблице. Видно, что добавки бериллия к сплаву Al+1,0 % Si несколько сдвигают в положительную область потенциалы коррозии, питтингообразования и репассивации. Высокие концентрации легирующего элемента вызывают уменьшение плотности тока и соответственно скорости коррозии исходного сплава.

Коррозионно-электрохимические характеристики сплава Al+1,0 % Si
с бериллием, в среде электролита NaCl

Среда NaCl, мас. %	Содержание бериллия в сплаве, мас. %	Электрохимические потенциалы, В(х.с.э.)				Скорость коррозии	
		$-E_{св.кор.}$	$-E_{кор.}$	$-E_{н.о}$	$-E_{р.п}$	$i_{кор},$ A/m^2	$K \cdot 10^3$ $г/м^2 \cdot ч$
0,03	–	0,803	1,030	0,439	0,644	0,23	0,77
	0,01	0,790	1,019	0,430	0,635	0,21	0,70
	0,05	0,776	1,009	0,420	0,626	0,19	0,64
	0,1	0,764	0,998	0,411	0,618	0,17	0,57
	0,5	0,750	0,988	0,400	0,610	0,15	0,50
0,3	–	0,876	1,095	0,478	0,658	0,33	1,11
	0,01	0,863	1,074	0,460	0,640	0,31	1,03
	0,05	0,849	1,062	0,451	0,632	0,29	0,97
	0,1	0,836	1,051	0,442	0,623	0,27	0,91
	0,5	0,822	1,040	0,431	0,611	0,25	0,84
3,0	–	0,935	1,170	0,650	0,770	0,48	1,61
	0,01	0,924	1,161	0,642	0,763	0,46	1,54
	0,05	0,912	1,152	0,631	0,752	0,44	1,47
	0,1	0,899	1,140	0,620	0,741	0,42	1,40
	0,5	0,888	1,131	0,611	0,730	0,40	1,34

На рис. 3 представлены анодные ветви потенциостатических кривых, характеризующие анодное поведение сплава Al+1,0 % Si с бериллием. У сплавов с бериллием по сравнению с исходным на потенциостатических кривых область активно-пассивного состояния смещена в сторону положительных значений потенциала и с ростом концентрации легирующего элемента наблюдается уменьшение плотности тока коррозии (рис. 4). Это, в свою очередь, сопровождается сдвигом потенциала питтингообразования в область положительных значений.

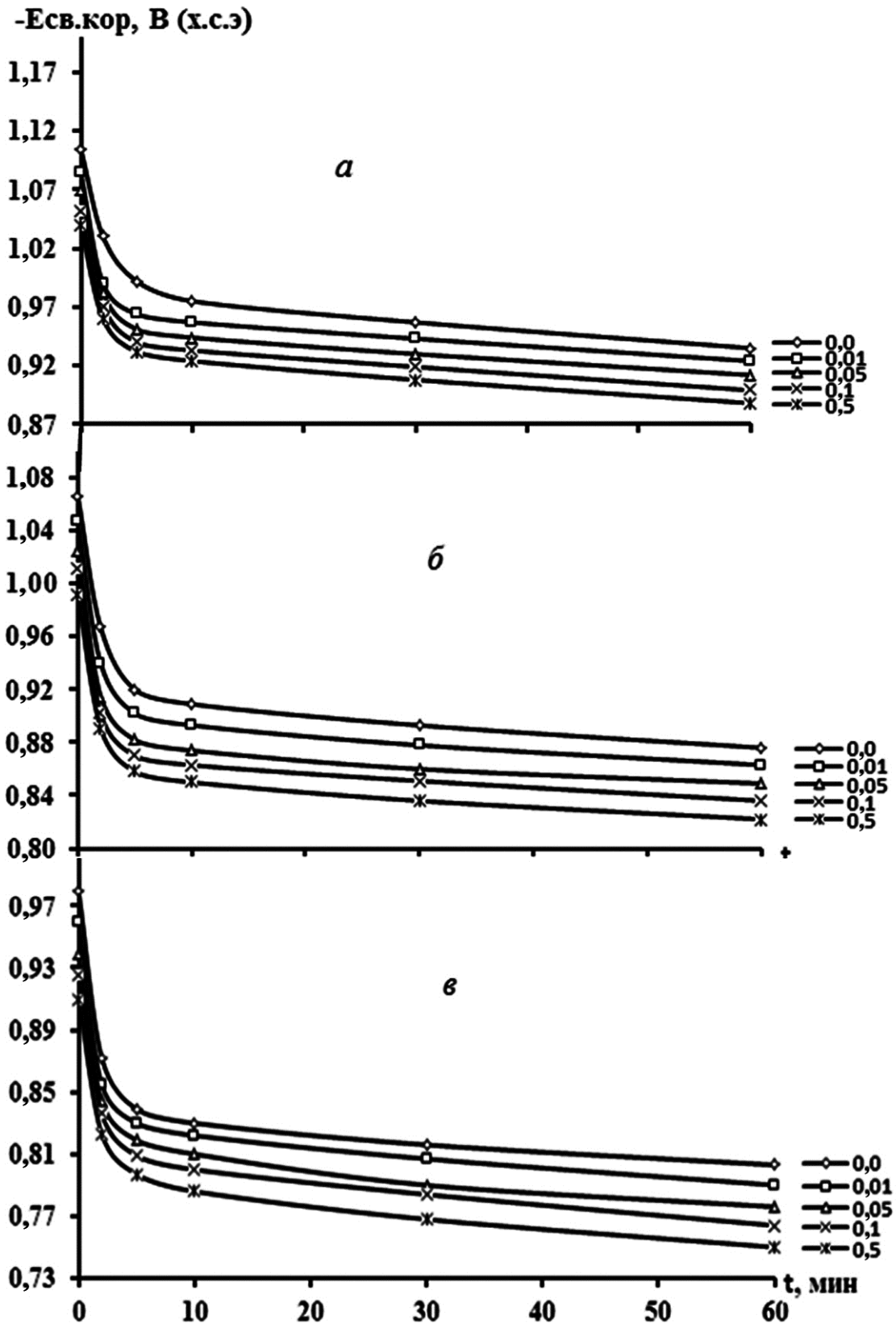


Рис. 2. Временная зависимость потенциала свободной коррозии сплава Al+1,0 % Si (1), содержащего бериллий, мас. %: в среде: *а* – 3,0, *б* – 0,3 и *в* – 0,03 %-го NaCl

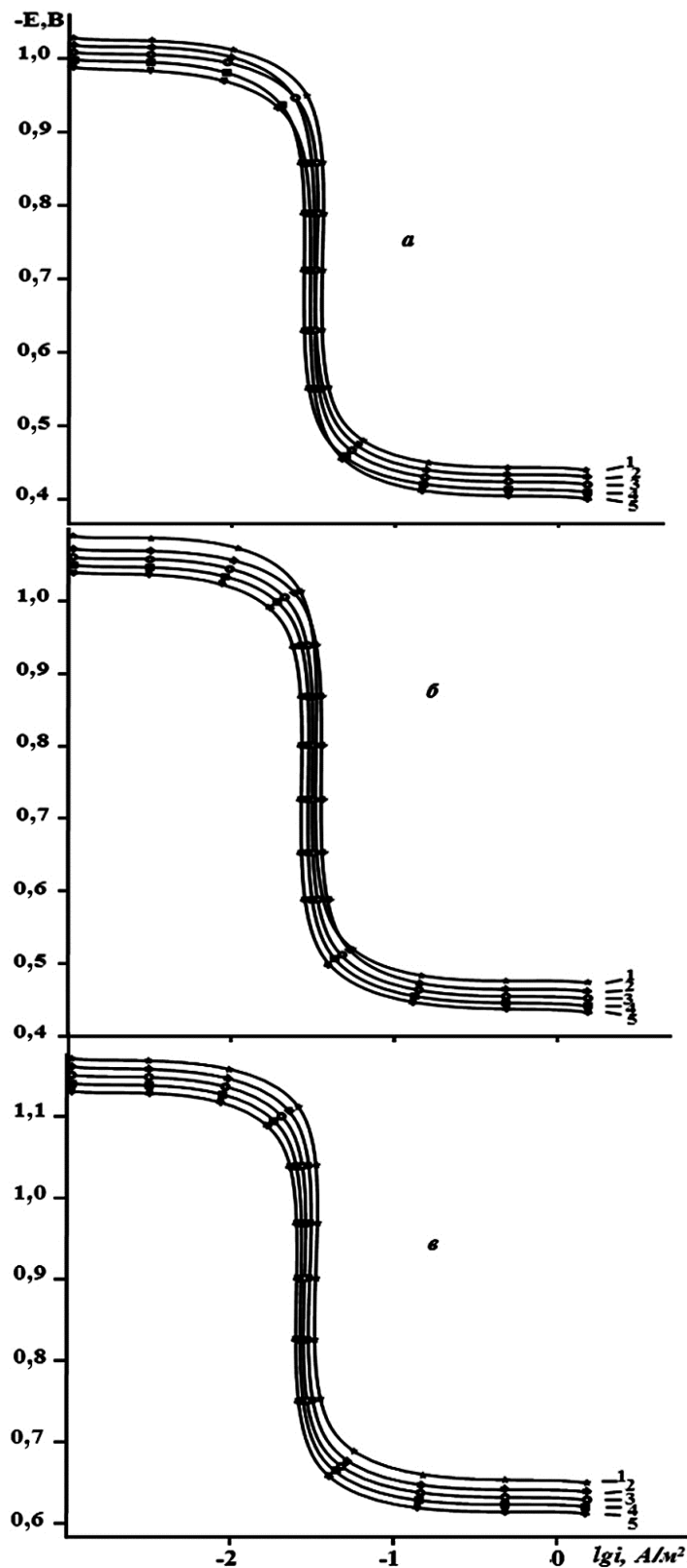


Рис. 3. Потенциодинамические анодные поляризационные (2 мВ/с) кривые сплава Al+1,0 % Si (1), содержащего бериллий, мас. %: 0,01 (2), 0,05 (3), 0,1 (4), 0,5 (5), в среде а – 0,03, б – 0,3 и в – 3,0 %-го NaCl

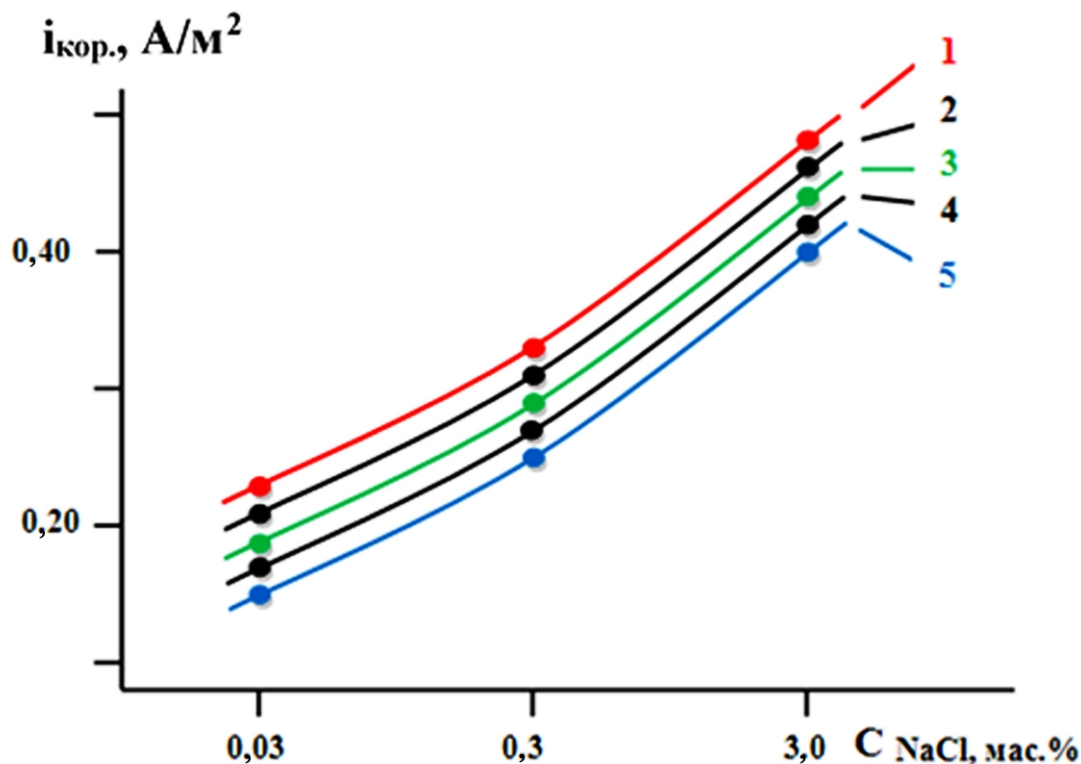


Рис. 4. Зависимость плотности тока коррозии сплава Al+1,0 % Si (1) с бериллием, мас. %: 0,01 (2); 0,05 (3); 0,1 (4); 0,5 (5) от концентрации NaCl

ВЫВОДЫ

1. На основе проведенных исследований установлено, что добавки бериллия в количествах 0,01 ÷ 0,05 мас. % повышают коррозионную стойкость сплава Al+1,0 % Si на 15-20 %, что сопровождается сдвигом основных электрохимических потенциалов в область положительных значений.

2. Показано, что рост концентрации хлорид-иона в электролита NaCl способствует увеличению скорости коррозии сплавов и смещению электрохимических потенциалов в область отрицательных значений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алюминиевые сплавы: свойства, обработка, применение / пер. с нем. под ред. М.А. Дрица, Л.Х. Райтбарга. 13-е изд., перераб. и доп. Москва: Металлургия, 1979. 678 с.
2. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение): справочник / под ред. И.Н. Фридляндера. Киев: КОМИТЕХ, 2005. 365 с.
3. Вол А.Е. Строение и свойства двойных металлических систем. Т. 1. Москва: Физматгиз, 1959. 755 с.

4. Луц А.Р., Суслина А.А. Алюминий и его сплавы. Самара: Самарский государственный технический университет, 2013. 81 с.

5. Вахобов А.В., Обидов Ф.У., Вахобова Р.У. Особый чистый алюминий и его сплавы. Душанбе: Дониш, 1999. Т. 1, 2. 535 с.

6. Свойства сплавов особочистого алюминия АК1 АК1М2 с щелочноземельными металлами / С.Э. Отажонов, И.Н. Ганиев, М.М. Махмудов, М.М. Махмадизода. Худжанд: Нури маърифат, 2019. 216 с.

7. Курбонова М.З., Ганиев И.Н., Эшов Б.Б. Коррозия алюминиево-бериллиевых сплавов с щелочноземельными металлами. Германия, Берлин: Изд. дом LAP LAMBERT Academic Publishing. 2012. 87 с.

8. Сафаров А.М., Ганиев И.Н., Одинаев Х.О. Физикохимия алюминиевых сплавов с бериллием и редкоземельными металлами. Душанбе: ТТУ им. М.С. Осими. 2011. 284 с.

9. Ганиев И.Н., Умарова Т.М., Обидов З.Р. Коррозия двойных сплавов алюминия с элементами периодической системы. Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. 208 с.

10. Ниёзов Х.Х., Ганиев И.Н., Бердиев А.Э. Сплавы особочистого алюминия с редкоземельными металлами. Душанбе: ООО «Сармад Компания», 2017. 146 с.

11. Влияние добавок индия на коррозионную устойчивость, теплоемкость и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава АБ1 / Р.Д. Исмонов, И.Н. Ганиев, Х.О. Одиназова, А.М. Сафаров, Ф.А. Алиев // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 3 (94). С. 81-92.

12. Электрохимия сплава Al+1%Be, легированного празеодимом и неодимом / Р.Д. Исмонов, И.Н. Ганиев, А.М. Сафаров, К.А. Самиев // Вестник ТТУ им. М.С. Осими. 2015. № 2 (25). С. 16-21.

13. Анодное поведение сплава Al+1%Be, легированного празеодимом, в среде электролита 3 %-ного NaCl / Р.Д. Исмонов, И.Н. Ганиев, Х.О. Одинаев, А.М. Сафаров // Докл. АНРТ. 2016. Т. 59. № 1-2. С. 67-72.

14. Анодное поведение сплава АБ1, легированного галлием, в среде электролита NaCl / Ш.А. Назаров, И.Н. Ганиев, А.М. Сафаров, К.А. Самиев // Вестник ТТУ им. М.С. Осими. 2017. № 2 (29). С. 7-10.

15. Курбонова М.З., Ганиев И.Н., Эшов Б.Б. Электрохимическое поведение сплавов системы алюминий – бериллий – стронций // Перспективы развития науки и образования: материалы 4-й Междунар. науч.-практ. конф. ТТУ им. М.С. Осими, 2010. С. 147-149.

16. Effect of Titanium Additions on the Corrosion and Electrochemical Properties of Aluminum Alloy AB1 / I.N. Ganiev, N.O. Rakhimova, M.Z. Kurbonova, F.S. Davlatzoda, U.Sh. Yakubov // Inorganic Materials. 2022. Vol. 58. № 8. pp. 893-897.

17. Коррозионно-электрохимическое поведение цинкового сплава ЦАМСВ4-1-2,5, легированного калием, в среде электролита NaCl / И.Н. Ганиев, Л.З. Алиева, А.Э. Бердиев, С.Д. Алихонова // Вестник Санкт-Петербургского университета технологии и дизайна. Сер. 1: Естественные и технические науки. 2021. № 3. С. 55-60.

18. Влияние стронция на анодное поведение сплава АК1М2 / С.Э. Отаджонов, И.Н. Ганиев, М. Махмудов, Дж.Х. Джайлоев, М.М Сангов. // Известия АНРТ. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. 2019. № 3 (176). С. 43-49.

19. Коррозия алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (Алдрей), легированного индием / И.Н. Ганиев, Ф.А. Алиев, Х.О. Одиназода, А.М. Сафаров, Р.И. Усмонов // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2020. Т. 23. № 2. С. 151-161.

20. Анодное поведение алюминиево-железного сплава АЖ2, 18 с иттрием, гадолинием и эрбием в среде электролита 0,3 %-ного NaCl / А.Х. Хакимов, Т.М. Умарова, И.Н. Ганиев, Н.Р. Эсанов // Вестник горно-металлургической секции Российской академии наук. Отделение металлургии. 2020. № 43. С. 180-186.

21. Анодное поведение железо-алюминиевого сплава АЖ2.18, легированного церием, празеодимом и неодимом, в водном растворе NaCl / И.Н. Ганиев, Н.Р. Эсанов, А.Х. Хакимов, Т.М. Умарова // Коррозия: материалы, защита. 2022. № 3. С. 10-15.

22. Фрейман Л.И., Макаров В.А., Брыксин И.Е. Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите. Ленинград: Химия, 1972. 240 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ганиев Изатулло Наврузович – академик НАНТ, доктор химических наук, профессор Института химии имени В.И. Никитина НАН Таджикистана

Izatullo N. Ganiev – Academician of NAST, Dr. Sci. (Chemistry), Professor, V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan

Исмоилова Машхура Хуснидиновна – докторант PhD 3-го курса физико-технического факультета Худжандского государственного университета имени Б. Гафурова, Таджикистан

Mashhura H. Ismoilova – PhD student, Department of Physics and Technology Khujand State University named after B. Gafurov, Tajikistan

Отаджонов Сухроб Эргашалиевич –
доктор философии (PhD), старший
преподаватель кафедры общей физики
и твердого тела Худжандского
государственного университета имени
Б. Гафурова, Таджикистан

Sukhrob E. Otajonov –
PhD, Senior Lecturer
Department of General
and Solid State Physics, B. Gafurov
Khujand State University, Tajikistan

Рахимов Мардонкул Рахимкулович –
ассистент кафедры методика преподавания
физики Худжандского государственного
университета имени Б. Гафурова,
Таджикистан

Mardonkul R. Rakhimov –
Assistant Lecturer, Department of
Methods in Teaching Physics,
B. Gafurov Khujand State University,
Tajikistan

Статья поступила в редакцию 25.07.2022, принята к опубликованию 06.12.2022

И.Н. Ганиев, М.Ч. Ширинов, Н.С. Олимов, Н.Ф. Иброхимов

**МОДИФИЦИРУЮЩЕЕ ВЛИЯНИЕ КАЛЬЦИЯ, СТРОНЦИЯ И БАРИЯ
НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЕМКОСТИ
И ИЗМЕНЕНИЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК9**

Аннотация. В режиме «охлаждения» исследована температурная зависимость теплоемкости, коэффициента теплоотдачи и изменений термодинамических функций (энтальпия, энтропия, энергии Гиббса) алюминиевого сплава АК9, модифицированного щелочноземельными металлами. Проведенные исследования показали, что с ростом концентрации модифицирующего компонента и температуры удельная теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значение энергии Гиббса уменьшается. Энтальпия и энтропия сплавов при переходе от сплавов с кальцием к сплавам со стронцием увеличиваются и к сплавам с барием уменьшаются. Величина энергии Гиббса при этом имеет обратную зависимость.

Ключевые слова: алюминий, сплав АК9, магний, кальций, стронций, барий, теплоемкость, термодинамические функции, энтальпия, энтропия, энергия Гиббса

I.N. Ganiev, M.Ch. Shirinov, N.S. Olimov, N.F. Ibrokhimov

**MODIFYING EFFECT OF CALCIUM, STRONTIUM, AND BARIA
ON THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF HEAT CAPACITY
AND CHANGES IN THERMODYNAMIC
FUNCTIONS OF THE AK9 ALUMINUM ALLOY**

Abstract. In the «cooling» mode, the temperature dependence of the heat capacity, heat transfer coefficient and changes in thermodynamic functions (enthalpy, entropy, Gibbs energy) of the AK9 aluminum alloy modified with alkaline earth metals was studied. The research has shown that with an increase in the concentration of the modifying component and temperature, the specific heat capacity, enthalpy, and entropy of the alloys increase, whereas the value of the Gibbs energy decreases. The enthalpy and entropy of the alloys increase in the transition from alloys with calcium to alloys with strontium, and decrease to alloys with barium. The value of the Gibbs energy in this case has an inverse relationship.

Keywords: aluminum, AK9 alloy, magnesium, calcium, strontium, barium, heat capacity, thermodynamic functions, enthalpy, entropy, Gibbs energy

ВВЕДЕНИЕ

Силумины, которые являются алюминий-кремниевыми сплавами, широко применяются во многих литейных композициях на основе алюминия, их применяют в качестве конструкционных материалов для фасонного литья в различных отраслях промышленности: авиастроении, транспорте, строительстве, производстве тракторов и др. Однако по характеристикам прочности и пластичности силумины уступают другим сплавам, так как в их составе отмечаются интерметаллические фазы, а также грубые хрупкие включения кремния, что является характерным для структурных особенностей литых сплавов. Для промышленных литейных алюминиевых сплавов возможно улучшение структуры и механических свойств за счёт регулирования режимов плавления и литья, а также условий кристаллизации отливок (литьё под давлением, в металлические или песчаные формы и т. п.) [1, 2].

Однако одним из наиболее результативных факторов, который способствует благоприятному структурообразованию силуминов, является метод модифицирования, то есть измельчение структуры заданного расплава путём введения в него перед заливкой незначительных количеств модифицирующих компонентов. Самым распространённым в настоящее время модификатором доэвтектических и эвтектических силуминов является металлический натрий или его соединения, надёжно обеспечивающие измельчение важнейшей структурной составляющей этих сплавов – алюминиево-кремниевой эвтектики [3]. В последние годы в качестве модификатора структуры силуминов нашли применение щёлочноземельные металлы [4]. В работе измерение теплоемкости сплавов в режиме «охлаждения» производилось на установке, в основу работы которой положен метод С-калориметра с тепломером и адиабатической оболочкой.

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СХЕМА УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ СПЛАВОВ

Для измерения удельной теплоемкости металлов использован закон охлаждения Ньютона – Рихмана. Всякое тело, имеющее температуру выше окружающей среды, будет охлаждаться, причем скорость охлаждения зависит от величины теплоемкости тела и коэффициента теплоотдачи.

Если взять два металлических стержня определенной формы, то сравнивая кривые охлаждения (температуры как функции времени) этих образцов, один из которых служит эталоном (его теплоемкость и скорость охлаждения должна быть известна), можно определить теплоемкость другого, определив скорости их охлаждений.

Следовательно, зная массы образцов m_1 и m_2 , скорости их охлаждения $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)$ и удельную теплоемкость эталона $C_{P_1}^0$, можно вычислить теплоёмкость другого вещества $C_{P_2}^0$ по формуле

$$C_{P_2} = C_{P_1} \frac{m_1 \left(\frac{dT}{d\tau} \right)_1}{m_2 \left(\frac{dT}{d\tau} \right)_2} \quad (1)$$

Правомочность использования данного уравнения для определения теплоемкости сплавов представлена в работах [5-9].

Для оправданности такого допущения экспериментально были установлены зависимости температуры образцов от времени охлаждения для алюминия и меди. Полученные значения теплоемкости хорошо согласуются с литературными данными. Температурный диапазон измерения составил до 800 К. Погрешность измерения теплоемкости по данной методике не превышает 4 %.

В рамках данной работы исследовано влияние кальция, стронция и бария (ШЗМ) на теплоемкость, коэффициент теплоотдачи и изменений термодинамических функций литейного алюминиевого сплава АК9.

Для приготовления сплавов были использованы алюминий марки А7 (ГОСТ 4784-2019), кремний – кристаллический КРОО (ГОСТ 19014.1-73), кальций металлический марки КМ1 (ТУ 48-40-215-72), стронций металлический марки СтМ1 (ТУ48-4-173-72), барий металлический марки БаМ1(ТУ 48-4-465-85).

Синтез сплавов осуществлен в лабораторных шахтных печах сопротивления марки СШОЛ при температуре 750-850° С с использованием лигатуры алюминий-кремний (9 % Si), лигатур алюминия с 10 мас.% ШЗМ. Из синтезированных сплавов в графитовые изложницы отливали цилиндрические образцы высотой 30 мм и диаметром 16 мм. Шихтовка сплавов проводилась с учётом угара металлов. Дальнейшим исследованиям подвергались сплавы, масса которых отличалась от массы шихты не более чем на 1-2 % отн.

Измерение теплоемкости проводилось на установке, схема которой представлена на рис. 1. Установка состоит из следующих узлов: электропечь (3) смонтирована на стойке (6), по которой она может перемещаться вверх и вниз (стрелкой показано направление перемещения). Образец (4) и эталон (5) (тоже могут перемещаться) представляют собой цилиндр длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термопары (4) и (5). Концы термопар подведены к цифровым многоканальным термометрам (7, 8, 9), которые подсоединены к компьютеру (10).

Включаем электропечь (3) через автотрансформатор (1), установив нужную температуру с помощью терморегулятора (2). По показаниям цифрового многоканального термометра отмечаем значение начальной температуры. Вдвигаем измеряемый образец и эталон в электропечь и нагреваем до нужной температуры, контроли-

руя температуру по показаниям цифрового многоканального термометра на компьютере. Далее измеряемый образец и эталон одновременно выдвигаем из электропечи. С этого момента фиксируем снижение температуры. Записываем показания цифровых термометров на компьютере через фиксированное время 10 с. Охлаждаем образец и эталон ниже 30° С.

Исследование теплоемкости алюминиевого сплава АК9 с щелочноземельными металлами проводилось по методике, описанной в работах [10-15].

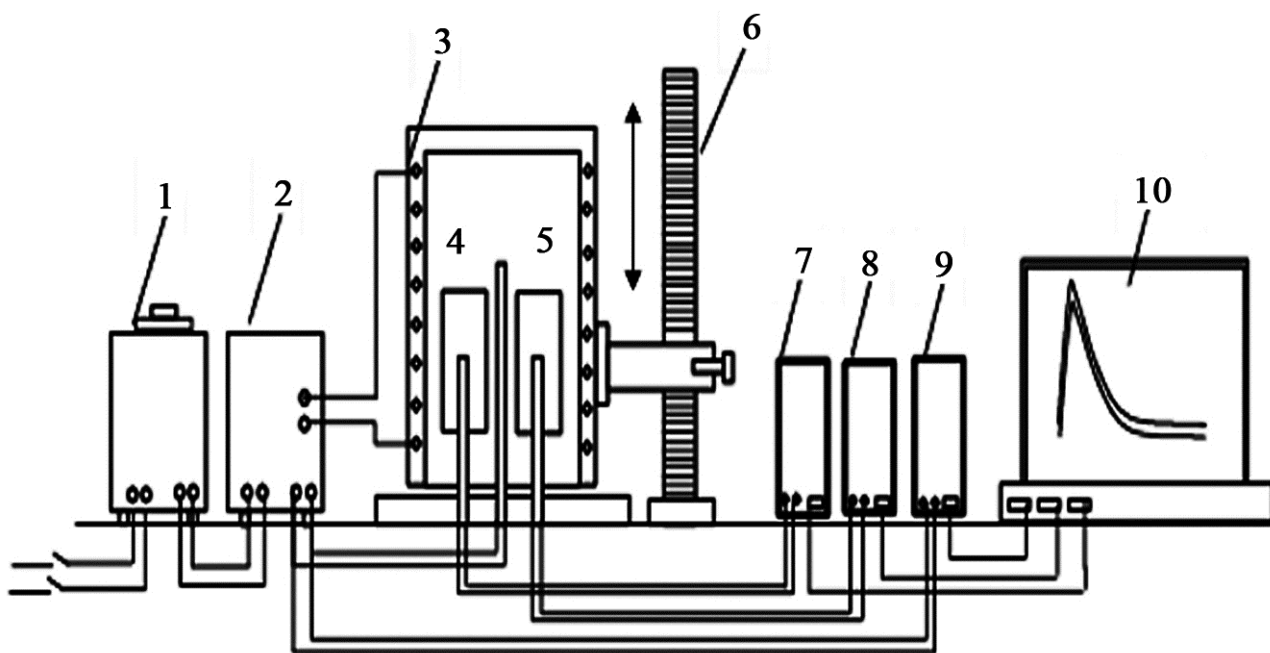


Рис. 1. Установка для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения» [16]

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температурную зависимость теплоемкости алюминиевого сплава АК9, модифицированного кальцием, стронцием и барием, изучали в режиме «охлаждения» в интервале температур 298,15-800 К. На рис. 2 в качестве примера представлены экспериментально полученные зависимости температуры образцов из сплава АК9, модифицированного кальцием, которые описываются уравнением

$$T = T_0 + \frac{1}{2} \left[(T_1 - T_0) e^{-\tau/\tau_1} + (T_2 - T_0) e^{-\tau/\tau_2} \right]. \quad (2)$$

Проводя дифференцирование уравнения (2) по τ , получим уравнение для определения скорости охлаждения образцов из сплава АК9 с кальцием вида

$$\frac{dT}{d\tau} = - \left(\frac{T_1 - T_0}{\tau_1} \right) e^{-\tau/\tau_1} - \left(\frac{T_2 - T_0}{\tau_2} \right) e^{-\tau/\tau_2}. \quad (3)$$

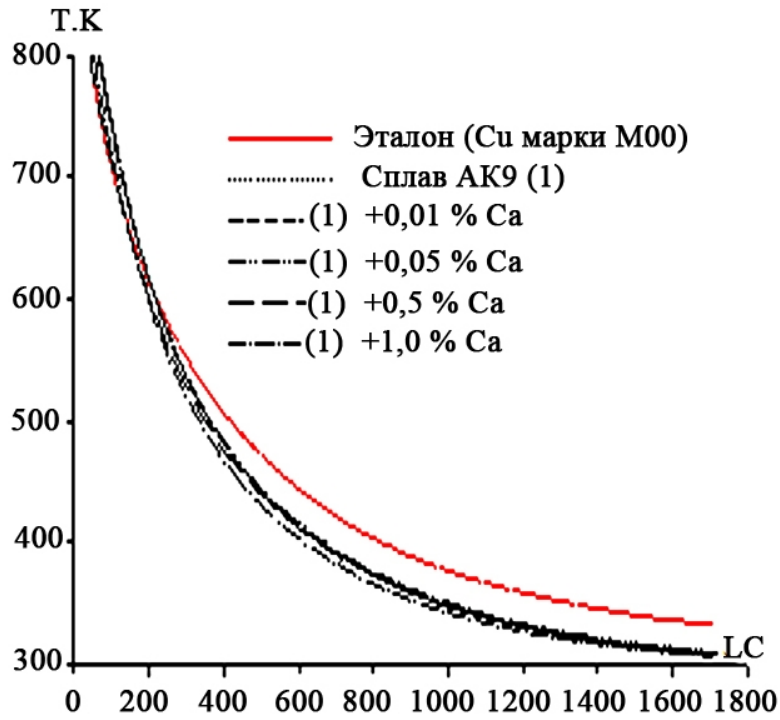


Рис. 2. Кривые зависимости температуры образцов из сплава АК9, модифицированного кальцием, от времени охлаждения

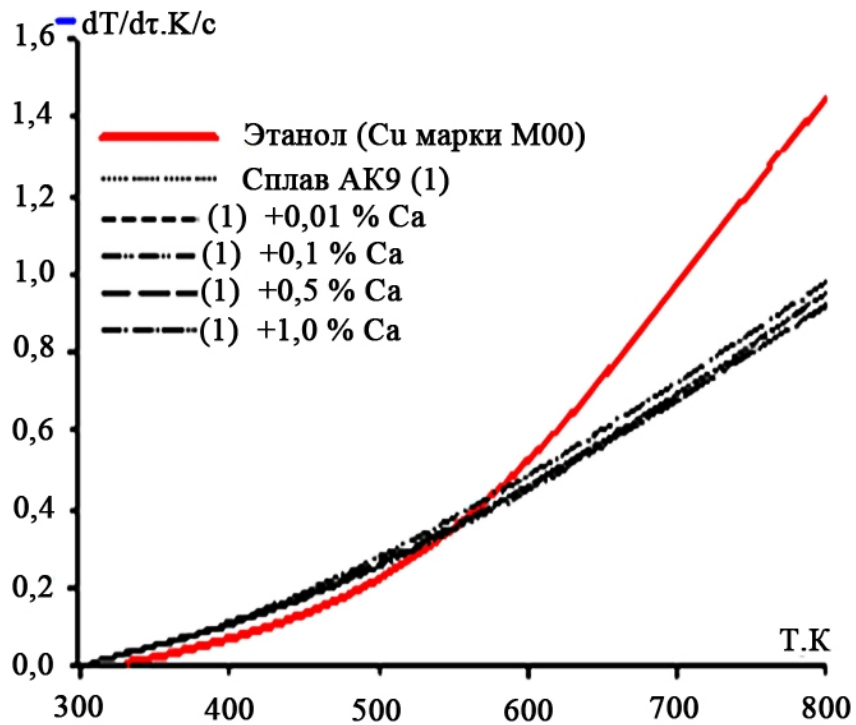


Рис. 3. Зависимость скорости охлаждения образцов из сплава АК9, модифицированного кальцием, от температуры

По дифференцированному уравнению (3) были рассчитаны скорости охлаждения образцов из сплавов, которые графически представлены на рис. 3. В табл. 1 для исследованных сплавов представлены экспериментальные значения коэффициентов ΔT_{01} , τ_1 , ΔT_{02} , τ_2 в уравнении (3). Результаты экспериментов обработаны по программе MS Excel, графики построены с помощью программы Sigma Plot. При этом коэффициент корреляции составлял не менее 0,9989.

Таблица 1

Значения коэффициентов ΔT_1 , τ_1 , ΔT_2 , τ_2 в уравнении (3) для алюминиевого сплава АК9, модифицированного кальцием, стронцием, барием, и эталона (Cu марки М00)

Содержание кальция, стронция и бария в сплаве АК9, мас.%	$T_1 - T_0$, К	τ_1 , с	$T_2 - T_0$, К	τ_2 , с	$(T_1 - T_0) / \tau_1$, К/с	$(T_2 - T_0) / \tau_2$, К/с	T_0 , К
0,0	387,96	128,89	377,66	465,55	3,01	0,81	293,30
0,01 Ca	305,90	147,95	356,59	524,93	2,07	0,68	293,95
0,1 Ca	305,00	153,63	345,70	543,60	1,99	0,64	294,52
0,5 Ca	306,53	152,87	347,43	540,89	2,01	0,64	295,99
1,0 Ca	295,38	150,91	332,50	510,49	1,96	0,65	294,62
0,01 Sr	233,07	142,64	338,96	523,07	1,63	0,65	310,51
0,1 Sr	231,00	143,92	335,94	527,79	1,60	0,64	307,74
0,5 Sr	231,20	143,79	336,24	527,31	1,61	0,64	308,01
1,0 Sr	231,42	133,37	315,28	492,54	1,74	0,64	295,09
0,01 Ba	204,53	151,82	358,05	546,48	1,35	0,66	294,52
0,1 Ba	196,65	151,82	344,26	546,48	1,30	0,63	293,70
0,5 Ba	200,34	155,73	331,58	559,03	1,29	0,59	292,17
1,0 Ba	200,34	155,73	331,58	559,03	1,29	0,59	293,51
Эталон	388,04	129,62	376,28	466,72	2,99	0,81	298,83

Для вычисления удельной теплоемкости алюминиевого сплава АК9, модифицированного кальцием, стронцием и барием, использовали значения скоростей охлаждения и эталона (Cu марки М00) и образцов из сплавов по уравнению (3).

Температурная зависимость теплоемкости алюминиевого сплава АК9 с щелочноземельными металлами описывается общим уравнением вида

$$C_p^0 = a + bT + cT^2 + dT^3. \quad (4)$$

Обработкой уравнения (4) были получены нижеследующие коэффициенты уравнения температурной зависимости удельной теплоемкости (10) алюминиевого сплава с щелочноземельными металлами (табл. 2).

Таблица 2

Значения коэффициентов a , b , c , d в уравнении (4) для образцов из алюминиевого сплава АК9 с ЦЗМ и эталона (Cu марки М00)

Содержание кальция, стронция и бария в сплаве, АК9 мас. %	a , Дж/(кг·К)	$b \cdot 10^{-2}$, Дж/(кг·К ²)	$c \cdot 10^{-5}$, Дж/(кг·К ³)	$d \cdot 10^{-8}$, Дж/(кг·К ⁴)	Коэффициент корреляции R
0,0	-1,066	1,07	-1,70	0,978	0,9948
0,01 Ca	-0,9692	1,01	-1,57	0,882	0,9947
0,1 Ca	-1,8375	1,49	-2,39	1,36	0,9935
0,5 Ca	-1,9241	1,56	-2,54	1,48	0,9939
1,0 Ca	0,28090	0,50	-0,75	0,48	0,9929
0,01 Sr	-0,634	0,694	-7,46	0,373	0,9988
0,1 Sr	-0,645	0,707	-0,759	0,380	0,9988
0,5 Sr	-0,794	0,835	-1,00	0,521	0,9986
1,0 Sr	-0,0114	0,581	-0,532	0,193	0,9994
0,01 Ba	0,3245	$2,75 \cdot 10^{-4}$	$-2,87 \cdot 10^{-7}$	$1,42 \cdot 10^{-10}$	1,00
0,1 Ba	-0,664	0,665	-0,616	0,345	0,9988
0,5 Ba	-1,1532	0,972	-1,14	0,663	0,9984
1,0 Ba	-1,1532	1,02	-1,19	0,693	0,9984
Эталон	0,3245	$2,75 \cdot 10^{-4}$	$-2,87 \cdot 10^{-7}$	$1,42 \cdot 10^{-10}$	1,00

Расчитанные значения удельной теплоемкости для алюминиевого сплава АК9, модифицированного щелочноземельными металлами, через 100 К приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения удельной теплоёмкости (кДж/(кг·К) модифицированного щелочноземельными металлами алюминиевого сплава АК9 и эталона (Cu марки М 00) от температуры

Содержание кальция в сплаве АК9, мас. %	T, К					
	300	400	500	600	700	800
0,0	0,8750	1,1148	1,2490	1,3364	1,4358	1,6065
0,01 Ca	0,8895	1,1296	1,2683	1,3583	1,4527	1,6047
0,1 Ca	0,8523	1,1759	1,3495	1,4549	1,5739	1,7881
0,5 Ca	0,8705	1,2003	1,3767	1,4883	1,6237	1,8715
1,0 Ca	1,2555	1,4141	1,5375	1,6545	1,7940	1,9843
0,01 Sr	0,8784	1,1887	1,436	1,6533	1,8522	2,0589
0,1 Sr	0,8938	1,2097	1,4649	1,6824	1,8849	2,0952
0,5 Sr	0,9477	1,2733	1,5234	1,7291	1,9217	2,1325
1,0 Sr	1,3051	1,5850	1,8048	1,9761	1,1103	2,2192
0,01 Ba	0,8482	1,1903	1,4950	1,7803	2,0642	2,3647
0,1 Ba	0,8694	1,2308	1,5519	1,8532	2,1556	2,4796
0,5 Ba	0,9158	1,3351	1,6856	2,0069	2,3389	2,7214
1,0 Ba	0,9562	1,6856	1,7714	2,1130	2,4661	2,8723
Эталон	0,3850	0,3977	0,4080	0,4169	0,4251	0,3850

Далее по рассчитанным данным теплоемкости и экспериментально полученным величинам скоростей охлаждения образцов из сплавов была рассчитана температурная зависимость коэффициента теплоотдачи (α , Вт/К·м²). Результаты расчёта представлены в табл. 4.

Значения коэффициента теплоотдачи ($\text{Вт/К}\cdot\text{м}^2$) алюминиевого сплава АК9, модифицированного щелочноземельными металлами, и эталона (Cu марки М 00) от температуры

Содержание кальция, стронция и бария в сплаве, АК9, мас.%	Т, К					
	300	400	500	600	700	800
0,0	0,0003	0,0028	0,0059	0,0095	0,0134	0,0170
0,01 Ca	0,0003	0,0028	0,0059	0,0095	0,0134	0,0170
0,1 Ca	0,0003	0,0027	0,0059	0,0095	0,0134	0,0171
05 Ca	0,0003	0,0029	0,0062	0,0105	0,0151	0,0205
1,0 Ca	0,0003	0,0032	0,0067	0,0105	0,0150	0,0191
0,01 Sr	0,0003	0,0026	0,0061	0,0107	0,0157	0,0207
0,1 Sr	0,0003	0,0028	0,0066	0,0117	0,0171	0,0225
0,5 Sr	0,0003	0,0029	0,0068	0,0119	0,0175	0,0230
1,0 Sr	0,0003	0,0037	0,0084	0,0138	0,0192	0,0238
0,01 Ba	0,0003	0,0026	0,0060	0,0105	0,0161	0,0221
0,1 Ba	0,0003	0,0028	0,0065	0,0117	0,0180	0,0237
0,5 Ba	0,0003	0,0029	0,0067	0,0118	0,0182	0,0250
1,0 Ba	0,0003	0,0029	0,0067	0,0118	0,0182	0,0240
Эталон	0,0003	0,0019	0,0049	0,0095	0,0152	0,0205

Для расчета температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по (5)-(7) были использованы интегралы от удельной теплоемкости по (4) для алюминиевого сплава АК9 с ЩЗМ:

$$[H^0(T) - H^0(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (5)$$

$$[S^0(T) - S^0(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (6)$$

$$[G^0(T) - G^0(T^0)] = [H^0(T) - H^0(T^0)] - T[S^0(T) - S^0(T^0)], \quad (7)$$

где $T_0 = 298,15 \text{ К}$.

Результаты расчёта температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для алюминиевого сплава АК9, модифицированного ЩЗМ, на примере сплавов, содержащих 1,0 мас.% модифицирующего компонента и эталона (Cu марки М00), через 100 К представлены в табл. 5.

Таблица 5

Величины изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса от температуры для алюминиевого сплава АК9, модифицированного щелочноземельными металлами, и эталона (Cu марки М 00)

Т, К	Эталон	Сплав АК9 (1)	(1)+1,0 % Ca	(1)+1,0 % Sr	(1)+1,0 % Ba
	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$, кДж/кг, для сплавов				
300	0,712	1,611	2,320	2,409	1,761
400	39,869	102,059	136,214	147,448	120,323
500	80,168	220,571	283,966	317,361	279,295
600	121,419	349,463	443,501	506,706	473,589
700	163,517	486,921	615,623	711,193	702,274
800	206,442	636,998	804,013	927,691	968,576
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$, кДж/(кг • К), для сплавов					
300	0,002	0,005	0,008	0,008	0,006
400	0,115	0,293	0,392	0,423	0,344
500	0,206	0,557	0,721	0,802	0,697
600	0,282	0,791	1,012	1,146	1,050
700	0,347	1,003	1,277	1,461	1,402
800	0,406	1,203	1,528	1,750	1,757
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов					
300	-0,004	-0,005	-0,007	-0,008	-0,005
400	-6,278	-15,026	-20,528	-21,902	-17,243
500	-22,727	-57,737	-76,555	-83,446	-69,260
600	-47,562	-125,366	-163,451	-181,108	-156,655
700	-79,588	-215,239	-278,024	-311,724	-279,286
800	-117,957	-325,595	-418,320	-472,503	-437,202

Видно, что с ростом температуры энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а величина энергии Гиббса уменьшается.

Энтальпия и энтропия сплавов при переходе от сплава АК9 кальцием к сплавам стронцием растут, далее к сплавам с барием уменьшаются. Зависимость величины энергии Гиббса имеет обратный характер. Изменение термодинамических функций алюминиевого сплава АК9 в результате модифицирования ЩЗМ объясняется ростом степени гетерогенности структуры сплавов в результате модификации их структуры ЩЗМ.

ВЫВОДЫ

Исследованы температурная зависимость удельной теплоемкости, коэффициент теплоотдачи и термодинамических функций сплава АК9, модифицированного кальцием, стронцием и барием. Показано, что значения удельной теплоёмкости, энтальпии и энтропии изученных сплавов с ростом температуры увеличиваются, а величина энергии Гиббса снижается. Теплоёмкость сплава АК9 при модифицировании щёлочноземельными металлами увеличивается.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Альтман М.Б. Металлургия литейных алюминиевых сплавов. Москва: Металлургия, 1972. 153 с.
2. Залинова И.М., Гудченко А.П., Панкова Л.Е. Кинетика окисления стронция в Al-Si-расплаве // Литейное производство. 1974. № 10. С. 20-21.
3. Мальцев М.В. Модифицирование структуры металлов и сплавов Москва: Металлургия, 1964. 214 с.
4. Модифицирование силуминов стронцием / Ганиев И.Н., Пархутик П.А., Вахобов А.В., Купрянова И.Ю. Минск: Наука и техника, 1985. 143 с.
5. Иванцов Г.П. Нагрев металла (теория и методы расчёта) / Свердловск-Москва: Гос. науч.-техн. изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1948. 191 с.
6. Багницкий В.Е. Обратные связи в физических явлениях (продолжение книги Новая физика электронных приборов). Германия: Изд. Дом LAB LAMBERT Academic Publishing, 2014. 196 с.
7. Измерение теплоемкости и теплоты плавления методом охлаждения: учеб. пособие / С.А. Киров, А.В. Козлов, А.М. Салецкий, Д.Э. Харабадзе. Москва: ООП Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. 52 с.
8. Ерёмина Р.М., Скворцов А.И., Мутыгуллина А.А. Экспериментальные задачи общего физического практикума по молекулярной физике и термодинамике. Процессы переноса. Жидкости и твердые тела. Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2015. 42 с.
9. Рогачев Н.М., Гусева С.И. Определение удельной теплоемкости твердых тел: метод. указания к лаб. работам № 1-23. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва, 2012. 14 с.
10. Влияние церия на теплофизические свойства сплава АМг2 / Н.Ф. Иброхимов, И.Н. Ганиев, З. Низомов, Н.И. Ганиева, С.Ж. Иброхимов // Физика металлов и металловедение. 2016. Т. 117. № 1. С. 53-58.

11. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АК1, легированного стронцием / И.Н. Ганиев, С.Э. Отаджонов, Н.Ф. Иброхимов, М. Махмудов // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57. № 1. С. 26-31.

12. Влияние скандия на физико-химические свойства сплава АМг4 / С.Ж. Иброхимов, Б.Б. Эшов, И.Н. Ганиев, Н.Ф. Иброхимов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 4. С. 256-260.

13. Иброхимов Н.Ф., Низомов З. Исследование температурной зависимости теплоемкости сплава АМГ6 методом охлаждения // Вестник Таджикского технического университета. 2013. № 3 (23) С. 61-65.

14. Теплоемкость особоистого алюминия в зависимости от температуры / Х. Маджидов, Б. Аминов, М. Сафаров, А. Вахобов, Ф.У. Обидов // Докл. АН Тадж. ССР. 1990 Т. 33. № 6. С. 380-383.

15. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АК1, легированного стронцием / И.Н. Ганиев, С.Э. Отаджонов, Н.Ф. Иброхимов, М. Махмудов // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57. № 1. С. 26-31.

16. Малый патент № ТJ 877. Республика Таджикистан. Установка для определений теплоемкости и теплопроводности твердых тел / Ганиев И.Н., Иброхимов Н.Ф., Зокиров Ф.Ш. Приоритет изобретения от 09.01.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ганиев Изатулло Наврузович – академик НАНТ, доктор химических наук, профессор кафедры «Технология химического производства» Таджикского технического университета имени М.С. Осими, Таджикистан

Izatullo N. Ganiev – Academician of NAST, Dr. Sci. (Chemistry), Professor, Department of Chemical Production Technology, Tajik Technical University named after M.S. Osimi, Tajikistan

Олимов Насруддин Солихович – кандидат химических наук, заведующий кафедрой «Общетехнические дисциплины и машиноведение» Таджикского государственного педагогического университета имени С. Айни, Таджикистан

Nasruddin S. Olimov – Ph.D. (Chemistry), Head: Department of General Technical Disciplines and Engineering Science, Tajik State Pedagogical University named after S. Aini, Tajikistan

Химические технологии, науки о материалах, металлургия

Ширинов Миркурбон Чилаевич –

кандидат технических наук, доцент
Таджикского государственного
педагогического университета
имени С. Айни, Таджикистан

Mirkurbon C. Shirinov –

Ph.D., Associate Professor,
Tajik State Pedagogical
University S. Aini,
Tajikistan

Иброхимов Насимжон Файзуллоевич –

кандидат технических наук, доцент
кафедры «Материаловедение,
металлургические машины и оборудование»
Таджикского технического университета
имени М.С. Осими, Таджикистан

Nasimjon F. Ibrohimov –

Ph.D., Associate Professor, Department of
Materials Science, Metallurgical Machines
and Equipment, Avicenna Tajik
Technical University M.S. Osimi,
Tajikistan

Статья поступила в редакцию 19.09.2022, принята к опубликованию 20.12.2022

УДК 621.9.047/048

**И.В. Злобина, Д.И. Кузнецов, А.Д. Лысов,
Р.Н. Шамсутдинов, Н.В. Бекренев**

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ЧАСТОТ
НАГРУЖЕНИЯ НА ИЗГИБНУЮ ПРОЧНОСТЬ
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Аннотация. Выполнены испытания образцов угле-, стекло- и органопластика по схеме трехточечного изгиба после воздействия на них малоамплитудного нагружения с ультразвуковой частотой при различном числе циклов. Установлено, что для всех исследованных материалов наблюдается значительное снижение предельных напряжений изгиба после превышения определенного (критического) числа циклов: для углепластика – 6×10^6 , стеклопластика и органопластика – 3×10^6 . При этом в докритической области для стеклопластика установлено повышение напряжений более чем на 19 %. Ультразвуковое кратковременное нагружение может быть использовано для упрочнения отвержденных стеклопластиков в составе конечного изделия простой геометрической формы.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, ультразвук, малоамплитудное нагружение, прочность, предельные напряжения, изгиб, температура, число циклов нагружения

**I.V. Zlobina, D.I. Kusnetsov, A.D. Lysov,
R.N. Shamsutdinov, N.V. Bekrenev**

**AFFECT OF ULTRASONIC LOADING FREQUENCIES
ON THE BENDING STRENGTH OF POLYMER
COMPOSITE MATERIALS**

Abstract. Carbon, glass and organoplastics samples were tested according to a three-point bending scheme after exposure to a low-amplitude loading with an ultrasonic

frequency at various number of cycles. It has been established that for all the materials under study, there is a significant decrease in the bending stress limit after exceeding a certain (critical) number of cycles: for carbon fiber – 6×10^6 , fiberglass and organoplastics – 3×10^6 . At the same time, a stress increase by more than 19 % was found in the subcritical region for the fiberglass. Ultrasonic short-term loading can be used to harden cured fiberglass as part of the final product with a simple geometric shape.

Keywords: *polymer composite materials, ultrasound, low-amplitude loading, strength, ultimate stress, bending, temperature, number of loading cycles*

ВВЕДЕНИЕ

В современной технике получили широкое распространение армированные волокнами различной природы и тканями на их основе полимерные композиционные материалы (ПКМ). Это обосновано их более высокими удельной прочностью и коррозионной стойкостью по сравнению с известными металлами и сплавами, а также однокомпонентными полимерами.

К 2026 году прогнозируется рост рынка качественного углеволокна с 3,9 млрд долл. в 2019 г. до 8,0 млрд долл., а ежегодный прирост производства стеклопластиков составляет в настоящее время 8-10 % ежегодно. Также аналитиками прогнозируется рост объема потребления ПКМ с 12,3 млн т в 2020 г. до 14 млн т в 2024 г. [1, 2]. В общем объеме производства композитных конструкций ПКМ на термореактивной матрице занимают примерно 2/3 от всего объема.

Особенностью термореактивной матрицы является необратимый характер изменений в ней при повторном нагревании, что определяет повышенную температурную стойкость данных материалов по сравнению с ПКМ на термопластичной матрице. Также очень важное значение имеет лучшая смачиваемость термореактивными смолами армирующих волокон.

Высококачественные углепластики наиболее широко используются в авиации, причем с резким увеличением производства малоразмерных беспилотных летательных аппаратов эта тенденция будет усиливаться [3-5].

Наряду со стекло- и углепластиками в ряде конструктивных элементов летательных аппаратов (лопасти несущих винтов вертолетов, оболочки турбореактивных двигателей и т. п.), где важны эрозионная стойкость и сопротивление высокоэнергетическим ударным воздействиям, применяются органопластики, армированные различными арамидными тканями или волокнами [6-8].

Целью работы явилось изучение прочности угле-, стекло- и органопластика при трехточечном изгибе после нагружения с ультразвуковой частотой воздействия.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Первостепенное значение при обосновании требований к изделиям из ПКМ придается эксплуатационным характеристикам. При этом в производстве авиационной техники основными являются следующие требования: теплостойкость, водо- и атмосферостойкость, прочность при растяжении вдоль волокон, прочность при сжатии вдоль волокон, трансверсальная (поперек волокон) прочность, межслоевой сдвиг, ударная вязкость, технологичность [9, 10]. При этом ПКМ характеризуются резким различием значений прочностных параметров в зависимости от ориентации действующих нагрузок относительно изделия и схемы армирования. Наиболее опасными с точки зрения повреждаемости изделий из ПКМ являются напряжения межслоевого сдвига, величина которых для большинства ПКМ на 1-2 порядка ниже, чем напряжения растяжения-сжатия. Этот факт, а также значительно меньшая по сравнению с металлами и сплавами вязкость разрушения при действии динамических нагрузок делают необходимым при проектировании и изготовлении новых конструкций из ПКМ проведение ряда материаловедческих, технологических и конструкторских мероприятий.

При прогнозировании и экспериментальной оценке надежности конструкций, находящихся под действием динамических, в частности циклических, нагрузок, широко используется понятие усталостной прочности или предела усталости – уровня напряжений, ниже которого материал изделия длительное время не будет подвергаться разрушению. Однако данный параметр не может являться объективной характеристикой в случае высоко- и сверхвысокочастотного воздействия. Экспериментально и путем моделирования показано [11-14], что в данных условиях повреждения материала начинают развиваться, а конструкция разрушаться при уровне напряжений ниже предела усталости. В ходе серии испытаний образцов из титанового сплава ВТЗ-1 и алюминиевого сплава Д16Т на специальной установке, реализующей нагружение при ультразвуковых частотах, установлено, что усталостное разрушение происходит при долговечностях более чем 10^7 циклов для данных материалов при уровнях напряжений, существенно меньших классического предела усталости на базе 10^6 - 10^7 циклов. Для некоторых конструктивных элементов высокоскоростных и маневренных объектов типа летательных аппаратов различного типа весьма вероятно возникновение сверхвысокочастотных вибраций, которые могут вызвать разрушение до появления значительного уровня напряжений. Поэтому рекомендуется снижать допустимый уровень циклических напряжений и в процессе проектирования и испытания изделий осуществлять моделирование воздействия на них высоко- и сверхвысокочастотных нагрузок [11-14].

Установлено положительное влияние ультразвука на снижение дефектообразования при обработке материалов с неоднородной структурой [15]. В то же время эти ре-

зультаты получены при воздействии на твердые хрупкие материалы, возможные эффекты при воздействии на композиты на полимерном связующем не исследованы.

С учетом изложенного представляет научный и практический интерес исследование изменения прочности ПКМ после большого числа циклов нагружения с высокой частотой, что в первую очередь определяется отмеченными выше отличиями свойств данной группы материалов от металлов и их сплавов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В экспериментах использовали образцы в виде балок размерами $75 \times 10 \times 5$ мм из угле- и стеклопластика производства ООО «Еврокомплект», г. Калуга, и органопластика производства АО ЦВМ «Армоком», г. Хотьково Московской обл. Образцы разделяли на контрольную и опытную группы. Опытные образцы перед испытаниями подвергали воздействию ультразвука частотой 24,8 кГц с амплитудой 6 мкм при статическом нагружении 20 Н в течение 1, 2, 4 и 5 минут. При каждом условии нагружения обрабатывали по 5 образцов. Образец в держателе ультразвуковой установки (рис. 1 а) закрепляли консольно так, что длина вылета балки составляла $2/3$ ее длины (рис. 1 б). Ультразвуковое нагружение прикладывали на $1/2$ длины образца.

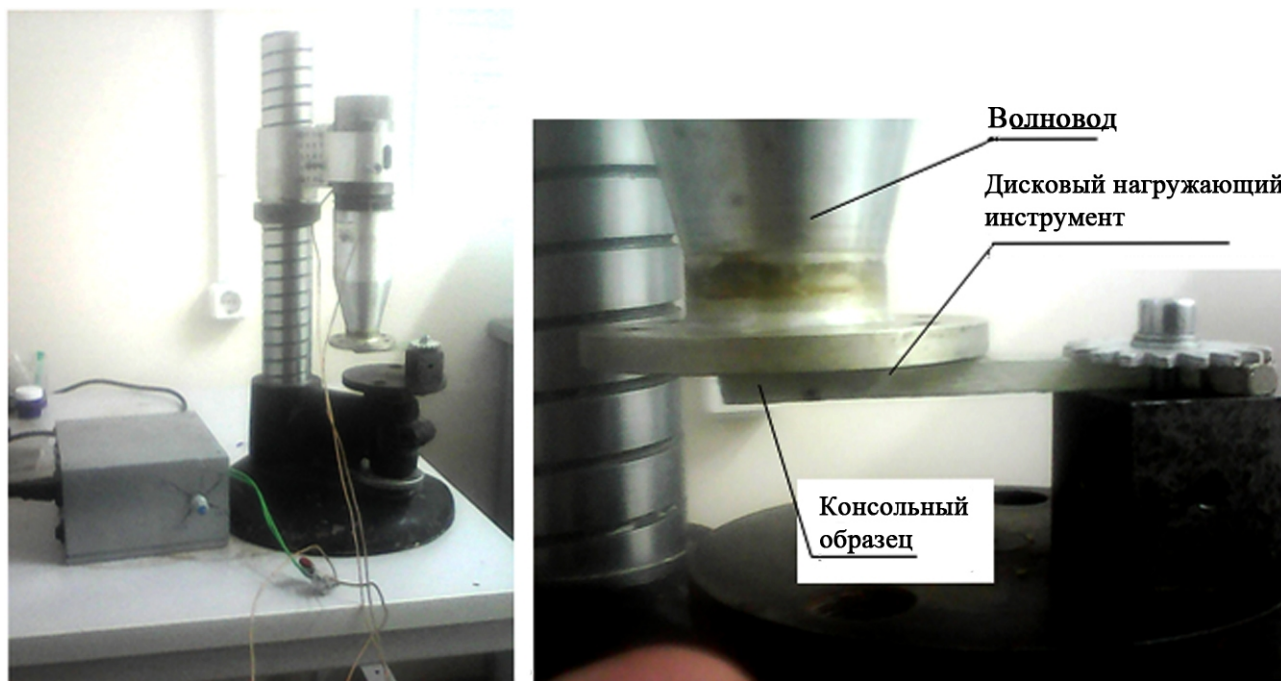


Рис. 1. Экспериментальная установка. Общий вид (а), рабочая зона (б)

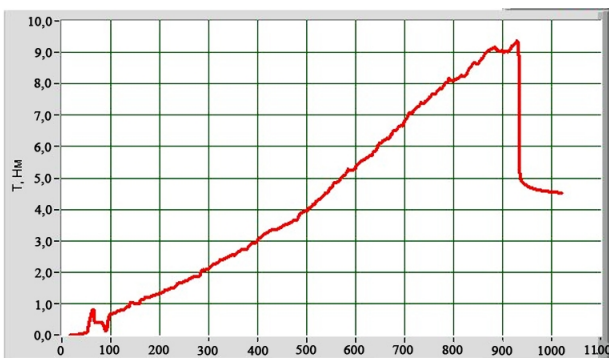
Использован волновод с дисковым излучающим торцом диаметром 50 мм из сплава Д16Т. В процессе ультразвукового нагружения осуществляли измерение температуры поверхности образца при помощи цифрового пирометра Testo 830-T1. Затем образцы

подвергали испытанию по схеме трехточечного изгиба на модернизированном компьютерном лабораторном комплексе с программным обеспечением LabView, ИП «Майоров», г. Орел.

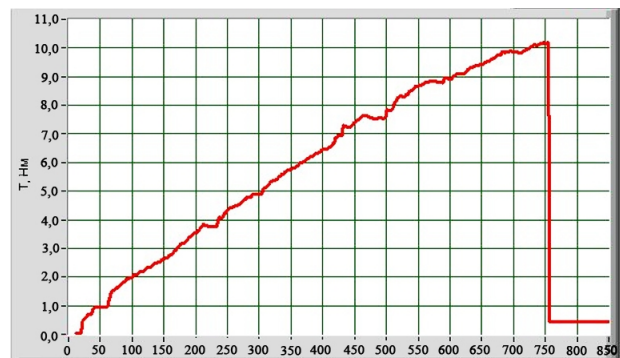
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Типичные графики, отражающие кинетику нагружения образцов стеклопластика, представлены на рис. 2. Зависимость максимальных напряжений изгиба и температуры от числа циклов нагружения, определяемого частотой ультразвука и временем воздействия, представлена в табл. 1, 2 и на рис. 3.

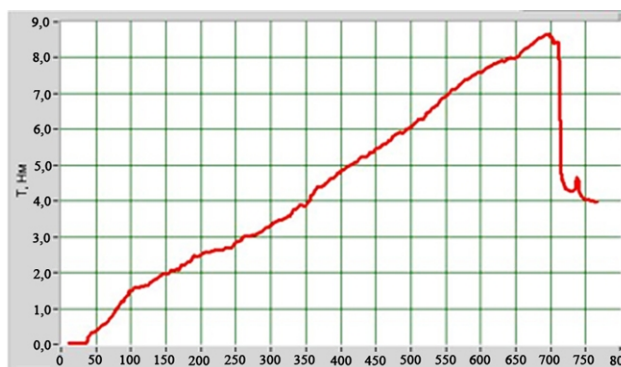
Изменение как прочности образцов, так и их температуры удовлетворительно (с точностью 0,85-0,95) описывается полиномами 2-й степени. Исключение составляет углепластик, для которого аппроксимирующая функция представляет собой полином 3-й степени при указанной точности. Сопоставляя графики и полиномы, можно отметить, что критическое число циклов, при превышении которого начинается снижение прочности материала, для стекло- и органопластика находится в области 2900000-3000000, для углепластика – 6000000.



а



б



в

Рис. 2. Типичные графики нагружения образцов при трехточечном изгибе (стеклопластик). Исходный образец (а), после ультразвукового нагружения в докритической области циклов (б), после нагружения с максимальным числом циклов (в)

Таблица 1

Число циклов нагружения, температура и прочность при трехточечном изгибе ПКМ в зависимости от времени ультразвукового воздействия

Время воздействия, мин	0	1	2	4	5
Число циклов	0	1488000	2976000	5952000	7440000
Пределные напряжения σ , МПа					
Углепластик	106,8	100,4	97	107,3	76,6
Стеклопластик	66,6	74,3	79,5	72,5	49,4
Органопластик	34,5	35,9	34,8	32,8	31,1
Температура образцов, °С					
Углепластик	18,7	20,6	23,8	37,5	38
Стеклопластик	17,5	34,3	45,2	50	75
Органопластик	18,4	34	32,5	38	42

При этом закономерность изменения прочности от числа циклов для стеклопластика значительно отличается от других испытываемых ПКМ. Если в докритической области напряжения в угле- и органопластике практически не изменяются (наблюдается малозначимое повышение на 2-4 %), то для стеклопластика отмечается увеличение значения предельных напряжений относительно исходных образцов на 18-20 %. С дальнейшим ростом числа циклов начинается снижение прочности при изгибе, выраженное в уменьшении предельных напряжений для угле-, стекло- и органопластика на 28, 26 и 10 %, соответственно.

Таблица 2

Аппроксимирующие функции зависимостей предельных напряжений изгиба и температуры от времени ультразвукового воздействия

Материал	Пределные напряжения	Температура
Углепластик	$y = -2,275x^3 + 15,043x^2 - 24,46x + 108$	$y = 0,204x^2 + 3,353x + 17,794$
Стеклопластик	$y = -3,525x^2 + 14,975x + 64,95$	$y = -0,0812x^2 + 10,117x + 20,866$
Органопластик	$y = -0,9545x^2 + 8,6545x + 20,991$	$y = -0,3089x^2 + 0,78x + 34,789$

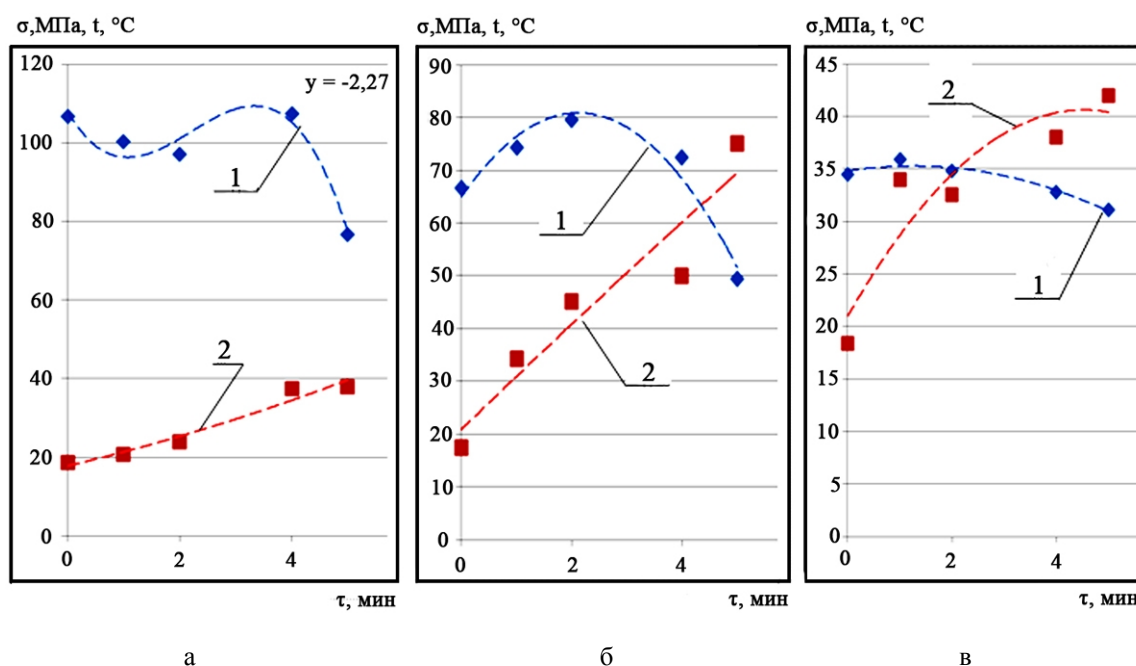
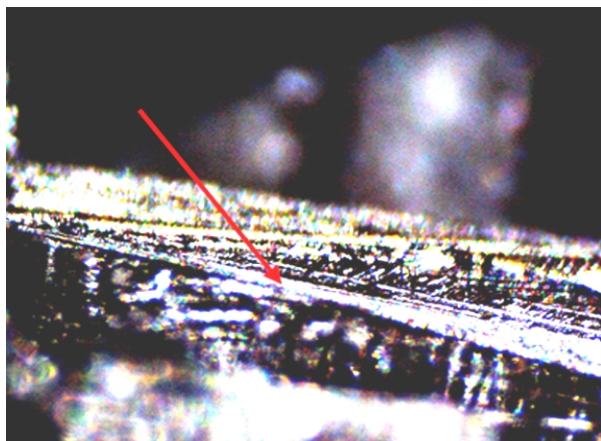
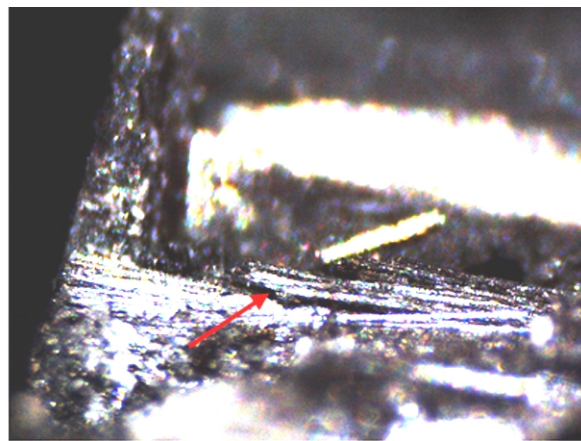


Рис. 3. Зависимость предельных напряжений σ (1) и температуры t (2) угле- (а), стекло- (б) и органопластика (в) от времени ультразвукового воздействия

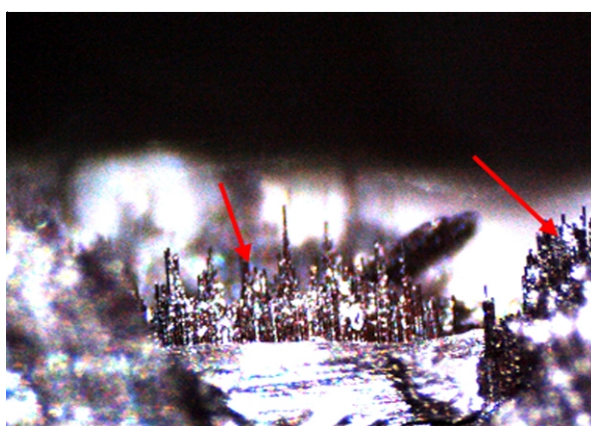
Анализ состояния поверхности образцов ПКМ при малом увеличении (рис. 4 и 5) позволил выявить следующие особенности. Для органопластика как в докритической, так и в послекритической областях нагружения каких-либо изменений относительно исходного состояния не отмечается.



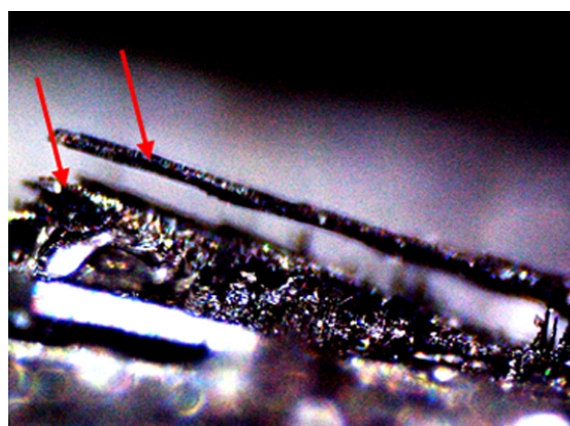
а



б



в



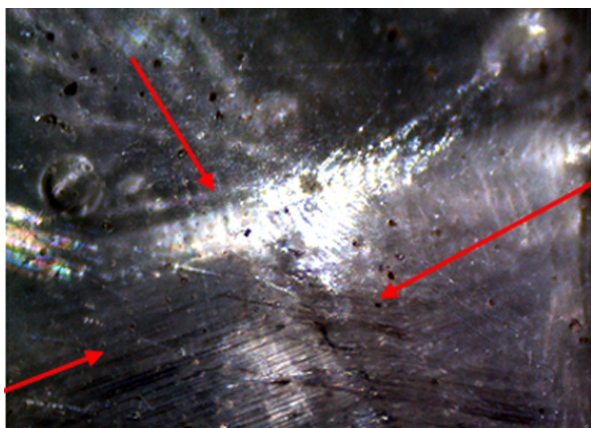
г

Рис. 4. Внешний вид ($\times 40$) поверхности углепластика после докритического числа циклов нагружения (а, б) и поверхности разрушения после максимального числа циклов (в, г)

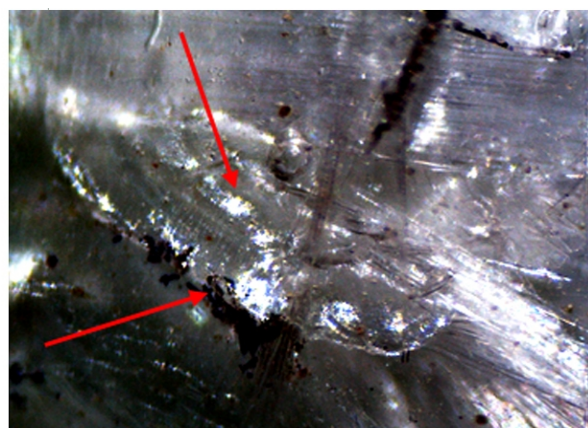
Поверхность повреждения при испытаниях по схеме трехточечного изгиба угле- и стеклопластика после сверхкритического числа циклов ультразвукового нагружения имеет вид, характерный для разрушения ПКМ при действии трансверсальных нагрузок: имеют место расслоения и множественные обрывы волокон, составляющих армирующую ткань (рис. 4 и 5 в, г). В то же время на поверхности и в плоскости разрушения стеклопластика присутствуют волокна и их объединения с измененным цветом (рыжий, бурый), что может являться следствием локального термического

повреждения и подтверждается зафиксированными значениями температур, превышающих 70°C . Основное отличие между угле- и стеклопластиком отмечается в области докритического для каждого материала числа циклов нагружения. Поверхность углепластика мало отличается от исходной, отмечаются отдельные смещения групп волокон с образованием небольших трещин и углублений (рис. 4 а, б) вследствие разрыва самых слабых механических связей.

Поверхность стеклопластика, подвергнутая ультразвуковому воздействию, отличается от исходной. Отмечаются симметричные волнообразные структуры (рис. 5 а) и участки с нарушением направления укладки волокон в виде хаотично переплетенных структур, имеющих также вид сплюснутых пятен (рис. 5 б). Данным изменениям соответствует отмеченное выше увеличение прочности стеклопластика при трехточечном изгибе.



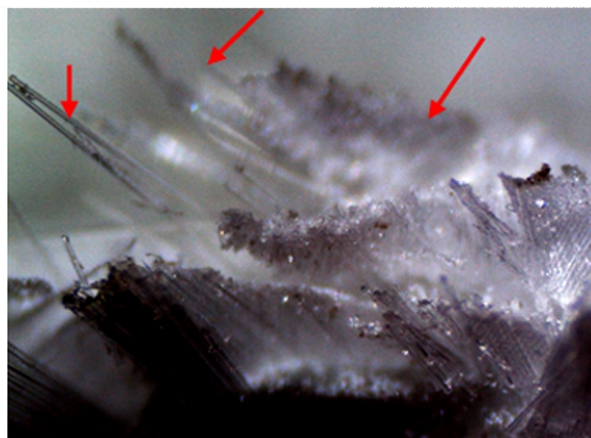
а



б



в



г

Рис. 5. Внешний вид ($\times 40$) поверхности стеклопластика после докритического числа циклов нагружения (а, б) и поверхности разрушения после максимального числа циклов (в, г)

Может быть предложено следующее объяснение полученным результатам. Отверждение связующего ПКМ происходит при повышенной температуре, что вызывает деформации как армирующих структур наполнителя, так и самого связующего. При этом коэффициенты теплового расширения компонентов ПКМ значительно различаются (для связующего в несколько раз больше), что приводит к различной степени деформации. При отверждении происходит усадка связующего, которая по указанной выше причине вызывает возникновение внутренних напряжений, приводящих к образованию структурных и поверхностных микродефектов в виде пустот (пор) и трещин.

Также во время пропитки вследствие неудовлетворительной смачиваемости наполнителя возможно образование непроклеев, что также способно привести к образованию пустот при отверждении, снижающих прочность материала [16].

Особенностью термореактивной матрицы в ПКМ является необратимый характер изменений в ней при повторном нагревании, что определяет повышенную температурную стойкость данных материалов по сравнению с ПКМ на термопластичной матрице. В то же время известно [17, 18], что при нагреве отвержденной эпоксидной матрицы до температуры порядка $(40-50)^\circ\text{C}$ повышается ее пластичность без деструктивных изменений, а минимальная плотность достигается при температуре 80°C .

Ультразвуковые колебания излучателя распространяются в виде волнового процесса в структуре материала, вызывая трение армирующих волокон между собой и волокон и отвержденного связующего. При этом энергия колебаний преобразуется частично в тепловую и вызывает разогрев наполнителя и матрицы. По достижении температур порядка 40°C начинается повышение пластичности, первоначально мало выраженное, тем не менее акустические волны способствуют возникновению течений в связующем и его перемещению в межслоевом пространстве ПКМ. С течением времени происходит «залечивание» дефектов (заполнение пустот и закрытие трещин), а также релаксация напряжений за счет проявления пластичности матрицы. Вследствие этого формируются новые области контактного взаимодействия «матрица – волокно» в межслоевом пространстве при повторном отверждении. В результате происходят увеличение площади контакта между слоями и соответствующее повышение прочности ПКМ. Очевидно, особенности поверхности углеродных, стеклянных и арамидных волокон являются причиной различных величин коэффициентов трения при контакте с отвержденной матрицей. Поэтому нагрев угле-, стекло- и органопластика до температур, при которых становятся возможными повышение пластичности матрицы и перемещение ее объемов с заполнением усадочных дефектов, достигаются при числе циклов, близком к критическому для данных волокон и матрицы. Поэтому происходит быстрое накопление внутренних повреждений в виде обрывов волокон, расщепления еще хрупкой матрицы или разрывов в пластичных ее участках в областях

с повышенной температурой. В результате запас прочности материала оказывается сниженным и его разрушение в процессе последующих за ультразвуковым нагружением испытаний происходит при пониженных относительно исходного материала напряжениях. В стеклопластике вследствие повышенного трения между волокнами при введении ультразвуковых колебаний начинается интенсивное выделение теплоты, приводящее к повышению температуры до $(40-50)^\circ\text{C}$ ранее достижения критического числа циклов, вследствие чего проявляются описанные выше эффекты текучести связующего и заполнение пустот в межслоевом пространстве и, соответственно, увеличение прочности материала. При дальнейшем ультразвуковом нагружении рост температуры продолжается и достигает значений высокой текучести матрицы, что значительно облегчает «залечивание» дефектов и формирование новых поверхностей контакта. Однако при этом предел выносливости армирующих волокон стеклопластика оказывается исчерпанным и они перестают выполнять в полном объеме функцию восприятия нагрузок вследствие различного вида повреждений. В результате в процессе испытаний на трехточечный изгиб происходит снижение значений предельных напряжений относительно исходного материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что ультразвуковые частоты нагружения ПКМ даже с малыми амплитудами смещения (порядка нескольких мкм) вызывают в течение малого времени воздействия значительное (от 10 до 28 %) уменьшение прочности материалов в зависимости от вида наполнителя. При этом наибольшее снижение прочности отмечается у углепластика. В то же время критическое число циклов, после достижения которого начинается снижение прочности, у углепластика примерно в 2 раза выше, чем у стекло- и органопластика. Наименьшее влияние на снижение прочности ультразвуковое малоамплитудное нагружение оказывает на органопластик, что определяется низким коэффициентом трения арамидных нитей и особенностями заполнения данного материала связующим при формовании.

Ультразвуковое нагружение ПКМ сопровождается локальным повышением температуры с максимумом в области приложения нагрузки и составляющем при критическом числе циклов соответственно для угле-, стекло- и органопластика 38, 75 и 42°C .

Стеклопластик характеризуется экстремальной зависимостью прочности от числа циклов ультразвукового нагружения: в докритической области отмечается повышение прочности на (18-20) %. При этом температура поверхности образцов в зоне контакта с ультразвуковым излучателем составляет более 45°C . Изложенное позволяет предложить ультразвуковое воздействие с числом циклов не более 3000000 как ме-

тод повышения изгибной прочности изделий из стеклопластика простой геометрической формы (пластины, стержни, балки и т. п.).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. <http://xn--80aplem.xn--plai/analytics/Mirovoj-rynok-uglerodnogo-voлокna/>
2. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6-7 (89). С. 29-37.
3. Кошкин Р.П. Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем: URL: <http://spmagazine.ru/420> (дата обращения: 28.01.2017 г.)
4. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520-530.
5. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов / Г.М. Гуняев, Кривонос В.В., Румянцев А.Ф. и др. // Конверсия и машиностроение. 2004. № 4. URL: www.viam.ru/public.
6. Кан А.Ч., Железина Г.Ф., Соловьева Н.А. Арамидные органопластики для повышения птицестойкости элементов авиационных конструкций // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95) С. 77-84. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-77-84.
7. Bhatnagar Ashok Lightweight ballistic composites. Woodhead Publishing Limited, Cambridge England, 2006. 416 p.
8. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования / В.А. Григорян, В.Ф. Кобылкин, В.М. Маринин, Е.Н. Чистяков; под ред. В.А. Григоряна. Москва: РадиоСофт, 2008. 406 с.
9. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 822 с.
10. Brinkmann S. at al. International Plastics Handbook the Resource for Plastics Engineers / Ed. Hanser. 2006. 920 p.
11. Shanyavskiy A.A., Nikitin A.D., Palin-Luc T., Very High Cycle Fatigue of D16T Aluminum Alloy // Physical Mesomechanics. 2021. Vol. 24. № 1. Pp. 77-84. URL: <https://doi.org/10.1134/S1029959921010112>.
12. Shanyavskiy A.A., Soldatenkov A.P., Nikitin A.D. Effect of Wave Process of Plastic Deformation at Forging on the Fatigue Fracture Mechanism of Titanium Compressor Disks of Gas Turbine Engine // Materials. 2021. Vol. 14. № 8. 1851. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14081851>.
13. Шанявский А.А., Никитин А.Д., Палин-Люк Т. Сверхмногоцикловая усталость алюминиевого сплава Д16Т // Физическая мезомеханика. 2020. Т. 23. № 3. С. 43-53. URL: <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2020-13005>.

14. Nikitin A., Stratula B., Volkov B., Modern and future schemes of very-high cycle fatigue tests // Journal of Physics: Conference Series J. Phys.: Conf. Ser. 1479 012074 URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1479/1/012074> (2020).

15. Бекренев Н.В., Злобина И.В., Петровский А.П. Малодефектная ультразвуковая обработка деталей навигационных приборов из неоднородных по структуре твердых, хрупких материалов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2014. № 4 (77). С. 97-103.

16. Влияние химической усадки связующего в процессе отверждения на образование остаточных напряжений в цилиндрических оболочках из композита / Ю.В. Василевич, К.А. Горелый, С.В. Сахоненко и др. // Теоретическая и прикладная механика: межведомственный сборник научно-методических статей / Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет. 2016. Вып. № 31. С. 67-72.

17. Гаврилов М.А. Особо плотные эпоксидные композиты на основе отходов производства: монография. Пенза: ПГУАС, 2014. 132 с.

18. Мошинский Л. Эпоксидные смолы и отвердители. Тель-Авив: Аркадия-Пресс ЛТД., 1995. 371 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Злобина Ирина Владимировна –

кандидат технических наук, доцент кафедры
«Техническая механика и мехатроника»
Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Zlobina –

PhD (Technical Sciences), Associate
Professor, Department of Technical
Mechanics and Mechatronics
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Кузнецов Дмитрий Игоревич –

студент Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Dmitriy I. Kusnetsov –

Undergraduate,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Лысов Алексей Дмитриевич –

студент Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Aleksey D. Lysov –

Undergraduate,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Шамсутдинов Руслан Наилевич –
студент Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Ruslan N. Shamsutdinov –
Undergraduate,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Бекренев Николай Валерьевич –
доктор технических наук, профессор
кафедры «Техническая механика
и мехатроника» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Nikolay V. Bekrenev –
Dr. Sci. Tech., Professor,
Department of Technical
Mechanics and Mechatronics
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Статья поступила в редакцию 24.10.2022, принята к опубликованию 20.12.2022

УДК 539.193

В.Ф. Пулин, Е.В. Рыжова, Т.Ю. Суринская, О.В. Пулин, П.М. Элькин

**КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ
БОРАЗИНА И БОРАЗОТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТОЙКИХ ПОЛИМЕРОВ**

Аннотация. Впервые проведены квантово-химические исследования динамики боразина и боразотных соединений в ангармоническом приближении, используемых для получения стойких полимеров.

Ключевые слова: циклические соединения, ангармонизм, динамика, боразины, полимеры

V.F. Pulin, E.V. Ryzhova, T.Yu. Surinskaya, O.V. Pulin, P.M. Elkin

**QUANTUM CHEMICAL STUDIES OF THE DYNAMICS OF BORAZINE
AND BORAZOTE COMPOUNDS USED IN THE PRODUCTION
OF RESISTANT POLYMERS**

Abstract. It has been for the first time that quantum chemical research into dynamics of borazine and borazote compounds in the anharmonic approximation has been conducted to produce resistant polymers.

Keywords: cyclic compounds, anharmonicity, dynamics, borazines, polymers

ВВЕДЕНИЕ

Молекулярная спектроскопия – это одно из приоритетных направлений в современной науке. Она решает актуальные задачи не только теоретической физики, но и физической химии, в частности при исследовании структуры вещества и кинетики химических реакций [1-7].

Следует сказать, что боразины и боразотные соединения представляют как научный интерес, так и практическую значимость. Например, нитрид бора используется для получения стойких полимеров, для создания тугоплавких, термостойких материалов, в полупроводниках, в медицине. Известно, что для полимеров характерны два агрегатных

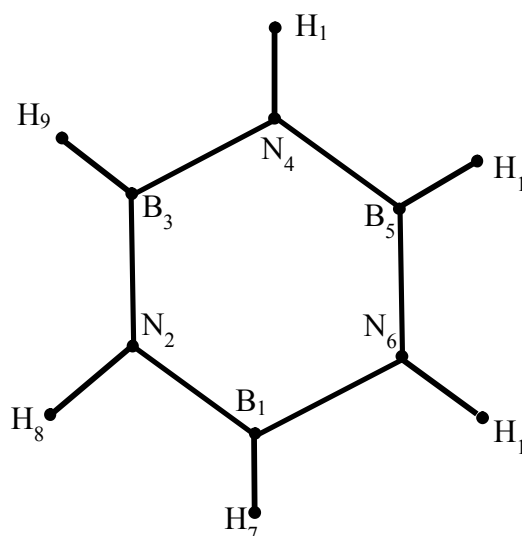
состояния – кристаллическое и аморфное и особые свойства – эластичность (обратимые деформации при небольшой нагрузке – каучук), малая хрупкость (пластмассы), ориентация при действии направленного механического поля, высокая вязкость, а также растворение **полимера** происходит посредством его набухания.

В перспективе боразотные соединения могут быть использованы при создании источников высоких энергий и открываются возможности для пленочного синтеза новых перспективных материалов.

Целью данной работы является углубленное исследование в ангармоническом приближении квантовыми методами физико-химических свойств боразотных соединений. применяемых для получения стойких полимеров, на атомно-молекулярном уровне, и такие исследования проведены впервые.

Достоинства квантовых методов исследования состоят в том, что они могут предсказывать результаты экспериментов.

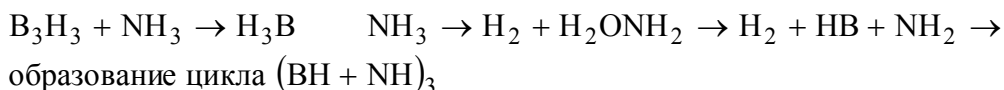
Боразотные соединения занимают видное место в неорганической химии. Фундаментальным представителем боразотных соединений является молекула боразина. Он был получен в 1926 году [5] при реакции диборана и аммиака. Это вещество ($B_3N_3H_3$) имеет циклическую структуру и сходство с бензолом (рисунок).



Боразин с симметрией D_{3h}

Для решения вопроса о равновесной конфигурации боразина необходимы теоретические исследования колебательных спектров.

Синтез протекал по следующей схеме:



Экспериментальные исследования в гармоническом приближении проводились в работах [1-7], а теоретические – в работе [3], также в гармоническом приближении.

Адиабатическое приближение гамильтониана системы можно записать в следующем виде:

$$H = \sum \left(-\frac{\pi^2}{2} \nabla_i^2 \right) - \sum_{ik} \frac{Zke^2}{rik} + \sum_k \sum_{ij} \frac{e^2}{rij},$$

где первое слагаемое – сумма кинетической энергии электронов; второе – потенциальная энергия притяжения ядер; третье – потенциальная энергия взаимного отталкивания; i – расстояние электрона до k -ядра; Z – порядковый номер элемента в таблице Менделеева.

Впервые проведены квантово-химические исследования расчетных параметров и сравнение с экспериментом (табл. 1-4), дана интерпретация их параметров, которая используется для расшифровки колебательно-вращательных спектров.

Квантово-химические исследования боразина и боразотных соединений представляют научный интерес.

Молекула – это динамическая система, состоящая из атомов, электронное взаимодействие которых обусловлено силами квантового характера [7].

Проведены фрагментарные расчеты молекулярных параметров боразина с симметрией $D3h$, C_2 , C_{3v} и геометрических параметров (R , Å).

Таблица 1

Геометрические параметры	Эксперимент	$D3h$	C_2	C_{3v}
R(2.1)	1,4355	1,44	1,44	1,62
R(2.3)	1,4355	1,44	1,44	1,62
R(4.3)	1,4355	1,44	1,44	1,62
R(5.4)	1,4355	1,44	1,44	1,62
R(6.5)	1,4355	1,44	1,44	1,62
R(1.6)	1,435	1,44	1,44	1,62
R(7.1)	1,2258	1,1892	1,193	1,18
R(8.2)	1,08	1,0019	1,0015	1,02
R(9.3)	1,2258	1,1892	1,193	1,18
R(10.4)	1,08	1,0019	1,0015	1,02
R(11.5)	1,2215	1,1892	1,193	1,18
R(12.6)	1,08	1,0019	1,0015	1,02
A (1.2.3)	121,1	117,59	122,44	64,097
A (2.3.4)	117,7	122,4	117,57	95,945
A (3.4.5)	121,1	117,59	122,4	64,027

Окончание табл. 1

Геометрические параметры	Эксперимент	D3h	C ₂	C _{3v}
A (4.5.6)	117,7	122,4	117,57	95,945
A (5.6.7)	121,1	118,79	122,44	115,77
A (6.7.8)	117,7	121,2	117,56	126,92
A (1.6.7)	119,45	118,79	118,8	115,77
A (2.1.8)	121,15	121,2	121,2	126,92
A (1.2.9)	119,45	118,79	118,8	115,77
A (2.3.10)	121,15	121,2	121,2	126,92
A (3.4.11)	119,45	118,79	118,8	115,77
A (4.5.12)	121,5	121,2	121,2	1,2692

В табл. 1 символами R, Å обозначаются значения равновесных длин связей и валентных углов.

Имеются отклонения вычисленных параметров от экспериментальных для модели с симметрией C_{3v}, а для моделей C₂ и D3h отклонения не превышают ошибки метода. Это можно объяснить тем, что программа не смогла переопределить симметрию молекулы C_{2v} в плоскую D3h. Модель D3h имеет лучшее согласие с экспериментом. Следует заметить, что модели с симметрией – C₂ и D3h – близки, также близки их частоты.

Таблица 2

Фрагменты силовых постоянных, полученные разными методами при решении обратной колебательной задачи (всего силовых постоянных – 43)

Интервал изменения значений силовых постоянных				
Силовые постоянные 10 ⁶ см ⁻¹	ПЗ _{min}	ПЗ _{max}	ОЗ _{min}	ОЗ _{max}
A 1				
K 11	10,526	11,709	10,142	10,472
K 22	6,497	6,999	5,934	5,973
K 24	0,296	0,374	0,281	0,332
K 33	11,653	14,190	11,311	11,381
K 34	0,639	-0,479	0,629	-0,415
K 44	3,973	4,651	3,878	4,010
A 2				
K 11	6,450	7,749	7,143	7,315
K 13	-0,338	-0,261	-0,372	-0,319
K 22	0,769	0,870	0,787	0,814
K 33	0,787	-0,922	0,744	0,780

Таблица 3

Сравнение фундаментальных частот боразина (квантовый анализ, фрагментарный подход)

Номер колебания	Форма колебания	ν (см ⁻¹) эксперимент.	ν (см ⁻¹) расчёт
1	χ (β , N, N-e)	280	281
2	ρ (β , N, N-e)	727	730
3	β (NCH)	967	1016

Таблица 4

Центробежные искажения боразина (МГц) (квантово-химический анализ)

T	min значение	max значение
Txxxx	0,004	-0,004
Tuuu	0,000	0,000
Txxuu	0,001	0,000
Txuuu	0,004	0,004

Расчетный материал может быть использован экспериментаторами в качестве эталона. Выявлены особенности силового поля, что дает право делать оценку особенностей электронной структуры. Боразин имеет плоскую симметрию D3h (плоская модель).

При моделировании электронной структуры адиабатического потенциала использовалась программа Gaussian 2004, а при расчете молекулярных параметров использовалась программа Vibration 2001.

Следует заметить, что связь электронов с ионами обусловлена силами электронного взаимодействия квантового характера, что представляет научный интерес. Спектральные методы устанавливают связь между строением вещества и его физическими параметрами.

Экспериментально боразин исследовался в работе [7].

Для решения прямых и обратных задач использовались программы Gaussian и Vibration.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования в ангармоническом приближении квантовыми методами физико-химических свойств боразотных соединений, применяемых для получения стойких полимеров, на атомно-молекулярном уровне, и такие исследования проведены впервые. Выполнены моделирование электронной структуры адиабатического потенциала с использованием программы Gaussian 2004, расчет молекулярных параметров с использованием программы Vibration 2001.

Выявлено, что связь электронов с ионами обусловлена силами электронного взаимодействия квантового характера, что представляет научный интерес.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Грибов Л.А. Введение в молекулярную спектроскопию. Москва: Наука, 1977. 399 с.
2. Браун П.А., Киселев А.А. Введение в теорию молекулярных спектров. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983. 300 с.
3. Рихтер Л.Я. Теоретическое исследование колебательных спектров боразина и его производных различных классов: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.05. Саратов, 1973. 188 с.
4. Watson I.K. Simplification of the molecular vibration – rotation on Hamiltonian // *Molecular Physics: An International Journal at the Interface Between Chemistry and Physics*. 1968. V. 5. № 15. P. 479-490.
5. Фудзинага С. Метод молекулярных орбиталей. Москва: Мир, 1986. 461 с.
6. Ниденцу К., Даусон Дж. Химия боразотных соединений. Москва: Мир, 1968. 240 с.
7. Свердлов Л.М., Ковнер М.А., Крайнов Е.П. Колебательные спектры многоатомных молекул. Москва: Наука, 1970. 560 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Пулин Виктор Федотович –

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Физика» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Viktor F. Pulin –

PhD, Associate Professor,
Department of Physics,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Рыжова Елена Владимировна –

старший преподаватель Саратовского
государственного университета
генетики, биотехнологии и инженерии
имени Н.И. Вавилова

Elena V. Ryzhova –

Senior Lecturer,
Saratov State Vavilov
Agrarian University

Сурина Татьяна Юрьевна –

старший преподаватель Саратовского
государственного университета
генетики, биотехнологии и инженерии
имени Н.И. Вавилова

Tatiana Yu. Surinskaya –

Senior Lecturer,
Saratov State Vavilov
Agrarian University

Химические технологии, науки о материалах, металлургия

Элькин Павел Михайлович –

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Физика» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Pavel M. Elkin –

PhD, Associate Professor,
Department of Physics,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Пулин Олег Викторович –

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Физика» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Oleg V. Pulin –

PhD, Associate Professor,
Department of Physics,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.09.2022, принята к опубликованию 20.12.2022

Правила оформления и представления статей

1. Статья, направляемая в редакцию журнала «Вестник СГТУ», 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 (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 СГТУ»		
Фамилия	Имя	Отчество
Полное название статьи		
Ученая степень	Ученое звание	Должность с указанием кафедры, отдела, лаборатории
Электронная почта	Служебный телефон/факс	Домашний адрес и телефон
Наименование направляющей статью организации		
Группа специальностей, к которой относится статья		