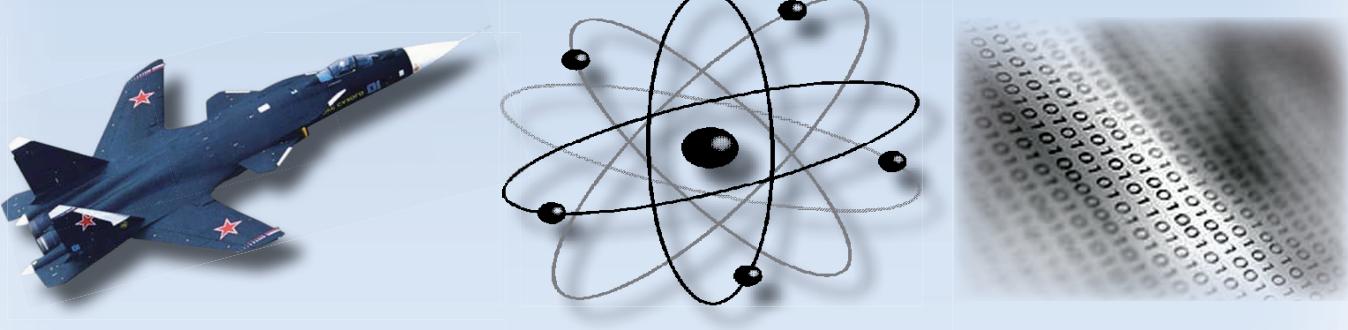


ISSN 2076-4359

№ IV-1 (40)  
2019

# Учёные записки

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



Науки о природе и технике

16+



Рукописи проходят обязательное рецензирование.  
Редакция не возвращает рукописи авторам.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых периодических изданий ВАК РФ

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций России. Свидетельство ПИ № ФС7738212 от 30.11.2009.

ISSN 2076-4359 = Ученые записки Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta

Уважаемые авторы, пожалуйста, прсылайте свои материалы по адресу электронной почты:  
journal@knastu.ru

Правила оформления материалов размещены на странице журнала «Ученые записки КнАГТУ», находящейся на сайте <http://www.knastu.ru>

Материалы, оформленные с нарушением данных правил, к рассмотрению не принимаются.

Адрес учредителя и редакции:  
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,  
ул. Комсомольская, д. 50, ауд.

508

Телефон для справок: (4217)  
201082

Подписаться на журнал можно в любом отделении Почты России;  
индекс журнала в каталоге Роспечать: 66090.

Цена свободная.

© Все права на опубликованные материалы принадлежат учредителю журнала – ФГБОУ ВО «КнАГУ», при цитировании их ссылка на журнал обязательна.

**Учредитель:**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»**

Журнал основан в 2010 году

**Редакционная коллегия:**

Главный редактор журнала: **Алексей Иванович Евстигнеев**, доктор технических наук, профессор

Заместитель главного редактора журнала, главный редактор серии «Науки о человеке, обществе и культуре» **Илья Игоревич Докучаев**, доктор философских наук, профессор

Ответственный секретарь серии «Науки о человеке, обществе и культуре»

**Татьяна Анатольевна Яковлева**, кандидат экономических наук, доцент

Ответственный секретарь серии «Науки о природе и технике» **Владислав Викторович Куриный**, кандидат технических наук, доцент

Литературный редактор: **Александр Альфредович Шунейко**, доктор филологических наук, доцент

Корректор: **Оксана Геннадьевна Реброва**

Технический редактор: **Анатолий Андреевич Раку**

Администратор сайта: **Анатолий Андреевич Раку**

Перевод на английский язык: **Галина Алексеевна Шушарина**

**Серия: «Науки о природе и технике»**

Отделы:

1. Авиационная и ракетно-космическая техника (**Сергей Иванович Феоктистов**, доктор технических наук, профессор)

2. Энергетика (**Сергей Николаевич Иванов**, доктор технических наук, профессор)

3. Управление, вычислительная техника и информатика (**Вячеслав Алексеевич Соловьев**, доктор технических наук, профессор, **Сергей Иванович Феоктистов**, доктор технических наук, профессор, **Сергей Николаевич Иванов**, доктор технических наук, доцент, **Николай Алексеевич Тарануха**, доктор технических наук, профессор, **Анатолий Александрович Буренин**, доктор технических наук, профессор)

4. Математика и механика (**Анатолий Александрович Буренин**, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН)

5. Машиностроение (**Михаил Юрьевич Сарилов**, доктор технических наук, доцент, **Борис Николаевич Марьин**, доктор технических наук, профессор, **Анатолий Михайлович Шпилев**, доктор технических наук, профессор, **Сергей Иванович Феоктистов**, доктор технических наук, профессор, **Анатолий Александрович Буренин**, доктор технических наук, профессор)

6. Металлургия и металловедение (**Борис Николаевич Марьин**, доктор технических наук, профессор)

7. Флот и кораблестроение (**Николай Алексеевич Тарануха**, доктор технических наук, профессор)

8. Науки о земле и безопасности жизнедеятельности человека (**Ирина Павловна Степанова**, доктор технических наук, профессор)

9. Строительство и архитектура (**Николай Петрович Крадин**, доктор архитектуры, профессор, член-корреспондент РААСН)

**Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»**

Отделы:

1. Философия, социология и культурология (**Татьяна Алексеевна Чабанюк**, доктор культурологии, профессор, **Виктория Юрьевна Прокофьева**, доктор филологических наук, профессор, **Вера Ивановна Юдина**, доктор культурологии, доцент, **Надежда Юрьевна Костюрина**, доктор культурологии, доцент, **Илья Игоревич Докучаев**, доктор философских наук, профессор)

2. Филология и искусствознание (**Олег Александрович Бузуев**, доктор филологических наук, профессор)

3. Психология и педагогика (**Татьяна Евгеньевна Наливайко**, доктор педагогических наук, профессор)

4. Политология и право (**Владимир Александрович Смоляков**, доктор политических наук, доцент)

5. История (**Жанна Валерьевна Петрунина**, доктор исторических наук, профессор)

6. Экономика (**Виктор Владимирович Литовченко**, доктор экономических наук, профессор)

Периодичность: два раза в квартал (один номер каждой серии в квартал)

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА  
«УЧЁНЫЕ ЗАПИСКИ КОМСОМОЛЬСКОГО-НА-АМУРЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»**

**СЕРИЯ: «НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ»**

**АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА**

ВЯЧЕСЛАВ ИВАНОВИЧ ШПОРТ, доктор технических наук

ЦҮЙ СЮЙ, профессор Шенъянского аэрокосмического университета (КНР)

**ЭНЕРГЕТИКА**

АЛЕКСАНДР ЛООС, доктор философии, профессор Академии Грюндига в Нюрнберге (Германия)

ИШТВАН ВАЙДА, доктор технических наук, профессор, директор Института автоматики Будапештского университета технологии и экономики (Венгрия)

ШАНДОР ХАЛАС, доктор технических наук, профессор Будапештского университета технологии и экономики (Венгрия)

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА**

ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ КУЛЫИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, директор Института автоматики и процессов управления ДВО РАН

ТАКАО ИТО, доктор технических наук, профессор факультета бизнес-управления Университета Мицуми (Япония)

**МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА**

НИКИТА ФЁДОРОВИЧ МОРОЗОВ, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теории упругости Санкт-Петербургского государственного университета

ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ ЛЕВИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом математического моделирования, механики и мониторинга природных процессов Института автоматики и процессов управления ДВО РАН

БОРИС ДМИТРИЕВИЧ АННИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом механики деформируемого твёрдого тела Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

ЭДУАРД СТЕПАНОВИЧ ГОРКУНОВ, академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Института машиноведения УрО РАН

АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ ХОЛЬКИН, академик РАН, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник Института общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова

СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ГРИГОРЬЕВ, доктор технических наук, профессор, ректор Московского государственного технологического университета «Станкин»

**МЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ**

ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ КАБЛОВ, академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Всероссийского института авиационных материалов

КОНСТАНТИН ВСЕВОЛОДОВИЧ ГРИГОРОВИЧ, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией диагностики материалов Института металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН

**ФЛОТ И КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ**

ЛЕОНИД АНАТОЛЬЕВИЧ НАУМОВ, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, директор Института проблем морских технологий ДВО РАН

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНEDЕЯТЕЛЬНОСТИ**

ЕВГЕНИЙ ПЕТРОВИЧ КИСЕЛЕВ, академик РАСХН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ведущий научный сотрудник Дальневосточного ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института сельского хозяйства РАСХН

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

ШИ ТИЕМАО, доктор философии, профессор, проректор Шенъянского архитектурно-строительного университета (КНР)

**СЕРИЯ: «НАУКИ О ЧЕЛОВЕКЕ, ОБЩЕСТВЕ И КУЛЬТУРЕ»**

**ФИЛОСОФИЯ, СОЦИОЛОГИЯ И КУЛЬТУРОЛОГИЯ**

ДАВИД ИЗРАИЛЕВИЧ ДУБРОВСКИЙ, доктор философских наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института философии РАН

КИРИЛЛ ЭМИЛЬЕВИЧ РАЗЛОГОВ, доктор искусствоведения, профессор, президент АНО «Новый институт культурологии»

**ФИЛОЛОГИЯ И ИСКУССТВОЗНАНИЕ**

СВЕТЛНА ГРИГОРЬЕВНА ТЕР-МИНАСОВА, доктор филологических наук, профессор, президент факультета иностранных языков и регионоведения Московского государственного университета

ВАН ЦЗИНЬЛИН, доктор философии, профессор, директор Института международного образования Чанчуньского университета (КНР)

**ПСИХОЛОГИЯ И ПЕДАГОГИКА**

ЕКАТЕРИНА ИОСИФОВНА АРТАМОНОВА, доктор педагогических наук, профессор кафедры педагогики высшей школы Московского педагогического государственного университета им. В. И. Ленина

**ПОЛИТОЛОГИЯ И ПРАВО**

НИКОЛАЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ МЕРЕЦКИЙ, доктор юридических наук, профессор, заведующий кафедрой уголовно-правовых дисциплин Дальневосточного государственного университета путей сообщения

**ИСТОРИЯ**

АЛЕКСАНДР МАНУЭЛЬЕВИЧ РОДРИГЕС-ФЕРНАНДЕС, доктор исторических наук, профессор, заведующий кафедрой новой и новейшей истории Московского педагогического государственного университета им. В. И. Ленина

**ЭКОНОМИКА**

АЛЕКСАНДР ЕВСТРАТЬЕВИЧ ЗУБАРЕВ, доктор экономических наук, профессор, первый проректор по стратегическому развитию и международному сотрудничеству Тихоокеанского государственного университета

# ЭНЕРГЕТИКА

# ENERGETICS

**Шаломов В. И., Коблов А. Ю.**  
**V. I. Shalomov, A. Yu. Koblov**

## **ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ НА ДОКРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА МОЩНОСТЬЮ 180-230 МВт (ОБЗОР)**

## **BASIC DIRECTIONS OF THE DEVELOPMENT OF THERMAL POWER UNITS FOR SUBCRITICAL PARAMETERS OF STEAM WITH 180-230 MW (REVIEW)**

**Шаломов Вячеслав Иванович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: shalomov2012@yandex.ru.

**Mr. Vyacheslav I. Shalomov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Thermal Power Plants Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: shalomov2012@yandex.ru.

**Коблов Андрей Юрьевич** – магистрант факультета энергетики, транспорта и морских технологий Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: andrew.koblov.2018@yandex.ru.

**Mr. Andrei Yu. Koblov** – Master's Degree Student, Faculty of Energy, Transport and Marine Technologies, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: andrew.koblov.2018@yandex.ru.

**Аннотация.** Представлен обзор научных работ, раскрывающих основные направления развития теплофикационных энергоблоков с паровыми турбинами на докритических начальных параметрах пара с промежуточным перегревом.

**Summary.** The authors present the review of scientific works revealing main directions of development of thermal power units with steam turbines at subcritical initial parameters of steam with intermediate overheating.

**Ключевые слова:** энергоблок, паровая турбина, докритические начальные параметры пара, промежуточный перегрев, бездеаэраторная тепловая схема, скользящее давление, циркулирующий кипящий слой, коэффициент полезного действия.

**Key words:** power unit, steam turbine, subcritical initial parameters of steam, intermediate overheating, non-aerating thermal scheme, sliding pressure, circulating fluidized bed, efficiency.

УДК 621.311

АО «Дальневосточная генерирующая компания» филиал «Хабаровская генерация» использует шесть энергоблоков с паровыми турбинами Т-180/210-130 Ленинградского металлического завода (ЛМЗ). Четыре энергоблока находятся в составе Хабаровской ТЭЦ-3 с установленной мощностью 720 МВт и два – в составе Комсомольской ТЭЦ-3 с установленной мощностью 360 МВт. Энергоблоки спроектированы на докритические начальные параметры перед турбиной:  $p_0 = 12,8$  МПа,  $t_0 = 540$  °С с давлением и температурой промежуточного перегрева пара  $p_{пп} = 2,49$  МПа,  $t_{пп} = 540$  °С. Паровой котёл ТПГЕ-215 – однобарабанный, газоплотный с естественной циркуляцией, Т-образной компоновки. Паропроизводительность котла 670 т/ч. Паровая турбина Т-180/210-130 представляет собой одновальный трёхцилиндровый агрегат с промежуточным перегревом пара и двумя регулируемыми теплофикационными отборами (верхним и нижним) для ступенчатого подогрева сетевой воды. Основные технические данные турбины: электрическая мощность номинальная – 180 МВт, максимальная – 210 МВт, тепловая нагрузка – 260 Гкал/ч.

Продольный разрез паровой турбины Т-180/210-130 представлен на рис. 1.

Базовым топливом Комсомольской ТЭЦ-3 (КТЭЦ-3) является Сахалинский природный газ, Хабаровской ТЭЦ-3 (ХТЭЦ-3) – уголь Нерюнгринского месторождения для энергоблоков № 1-3 и уголь или природный газ для энергоблока № 4.

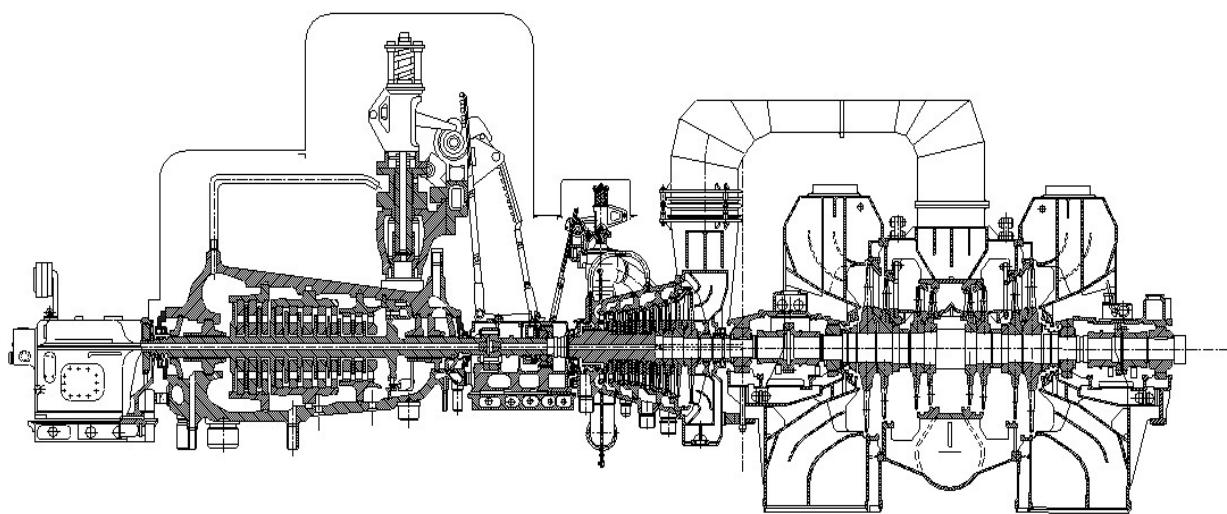


Рис. 1. Паровая турбина Т-180/210-130

Комсомольскую ТЭЦ-3 предполагалось в перспективе расширять строительством третьего энергоблока. Однако, несмотря на высокую надёжность турбоагрегатов Т-180/210-130, целесообразней рассматривать для использования в составе нового энергоблока более мощные паровые турбины с повышенной тепловой экономичностью.

Развитие перспективных паровых турбин с промежуточным перегревом пара на докритические начальные параметры осуществляется по нескольким направлениям. Но прежде чем их рассматривать, приведём данные, отражающие состояние экономичности электростанций в последние десятилетия [1], в частности, средний удельный расход топлива на выработку электроэнергии (нетто)  $b_3$  составляет 343,7 г/(кВт·ч), что соответствует КПД нетто энергоблока  $\eta_3 = 35,8\%$ . Авторы отмечают, что с учётом того, что половина выработки электроэнергии на органическом топливе относится к агрегатам с комбинированной выработкой тепла и электроэнергии, установленным на ТЭЦ, для конденсационных энергоблоков КПД будет ещё ниже.

**Повышение начальных параметров пара.** По мнению специалистов Научного производственного объединения «Центральный котлотурбинный институт» им. И. И. Ползунова (НПО ЦКТИ) [2], для реконструкции ТЭС с начальными параметрами пара 12,8 МПа и 540...555 °C, а также для расширения экспортного потенциала отечественного энергетического машиностроения в новых экономических условиях нужно проанализировать возможность и экономическую обоснованность разработки и создания оборудования для энергоблоков мощностью 100...220 МВт на начальное давление 17...19 МПа. Целесообразность его использования подтверждается опытом зарубежных стран и ведущих производителей энергетического оборудования, а также длительным опытом эксплуатации паровых котлов на 16,66 МПа Черепетской ГРЭС.

В работе [3] авторы пишут, что в настоящее время ведущие мировые энергокомпании строят угольные энергоблоки с температурой перегретого пара 600...620 °C. Опыт их эксплуатации насчитывает уже много лет, оборудование – котлы и турбины – освоено и коммерчески производится. Повышение температуры свежего пара касается и турбоустановки (ТУ) с докритическими параметрами. Исследователи приводят пример разработки теплофикационного энергоблока нового поколения без промежуточного перегрева пара конденсационной мощностью 150 МВт на базе турбоустановки Т-110/120-130, в котором температура свежего пара перед турбиной повышена с 555 до 580 °C. При работе энергоблока в теплофикационном режиме удельный расход топлива на выработку электроэнергии понизился с 197 до 185,4 г/(кВт·ч). Другим примером [4] является использование повышенной температуры свежего пара в энергоблоке № 3 Харанорской ГРЭС, построенном и введённом в эксплуатацию в 2013 году. Его основные параметры и сравнительные показатели приведены в табл. 1.

Технические показатели энергоблоков Харанорской ГРЭС

Технические показатели энергоблоков	Номер энергоблока	
	1 и 2	3
Электрическая мощность, МВт	215	225
Расход свежего пара, т/ч	650	602,8
Давление свежего пара, МПа	12,8	12,8
Температура свежего/промперегретого пара, °C	545/545	565/565
Давление в конденсаторе, кПа	4,0	2,85
Расчётный КПД энергоблока, %	36	41

С учётом снижения давления в конденсаторе до 2,85 кПа удалось достичь мощности энергоблока 225 МВт. Разработчиками предложен ещё целый комплекс других усовершенствований, позволивших получить расчётный КПД 41 %. При этом удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии нового энергоблока составил 310,2 г/(кВт·ч), тогда как тот же проектный показатель энергоблоков № 1 и 2 равнялся 342 г/(кВт·ч) [5]. В 2016 году энергоблок находился ещё в стадии наладки и доводки и его среднемесячный КПД составлял 37...37,5 %.

**Совершенствование тепловых схем энергоблоков.** В отечественной теплоэнергетике в последнее 20-летие, как отмечают в своей работе [6] представители Всероссийского теплотехнического института (ВТИ), наблюдается отличный от зарубежного путь совершенствования тепловой схемы турбоустановок мощностью от 200 до 800 МВт, особенностью которого является стремление к её максимальному упрощению. При этом авторы выделяют три характерных этапа развития тепловых схем. Первый этап касается замены поверхностных подогревателей, установленных на вакуумных отборах, подогревателями смешивающего типа. Они не имеют трубной системы, работают без подогрева конденсата, менее чувствительны к присосам воздуха и значительно дешевле поверхностных. На втором этапе реализуются предложенные ВТИ бездеаэраторные тепловые схемы (БТС). Переход к БТС, помимо повышения экономичности на 0,5...1 %, способствует значительному упрощению тепловой схемы, повышению надёжности эксплуатации энергоблока и снижению ремонтных затрат.

К третьему этапу совершенствования тепловой схемы можно отнести переход к так называемой «двуухподъёмной» бездеаэраторной схеме. При такой схеме подогреватели высокого давления (ПВД) устанавливаются между питательными насосами первого и второго подъёмов, которые могут иметь либо общий, либо раздельный привод. Применение двухподъёмной бездеаэраторной схемы обеспечивает дополнительное повышение экономичности энергоблока и практически исключает работу с отключёнными ПВД. Безусловно, использование такой схемы необходимо при сооружении энергоблоков суперсверхкритических параметров.

В работе [7] авторы утверждают, что опыт эксплуатации БТС подтвердил их эффективность, надёжность и простоту. При разработке технических решений следует использовать уже накопленный опыт модернизации, проектирования и эксплуатации БТС на существующих энергоблоках.

На экономичность паровых энергоблоков большое влияние оказывает глубина вакуума в конденсаторе. Повышение его на 1 кПа увеличивает мощность паровой турбины и уменьшает удельный расход теплоты примерно на 1 % [8]. Но такая возможность реализована только в Дании, где для охлаждения конденсаторов паровых турбин используются воды холодного морского течения. В настоящее время в России при проектировании и строительстве новых ТЭС использование открытых систем технического водоснабжения запрещено законом. Комсомольская ТЭЦ-3 оснащена оборотной системой технического водоснабжения с башенными градирнями. В этих условиях давление в конденсаторе даже в зимний период практически не уменьшается ниже 8 кПа.

Особенностью тепловых схем теплофикационных энергоблоков мощностью 180...200 МВт является наличие промежуточного перегрева пара после цилиндра высокого давления (ЦВД) турбины. Его роль в повышении технико-экономических показателей теплофикационной турбины наглядно продемонстрировали в своей работе [9] специалисты ЗАО «Уральский турбинный завод» (УТЗ). Они провели расчётное исследование возможности создания турбин номинальной мощностью 130 МВт с промежуточным перегревом на параметры пара 12,8 МПа, 540/540 °C на базе серийно выпускаемой турбины Т-110/120-12,8-5М. Результаты исследования показали, что вводимый газовый промперегрев пара после ЦВД позволяет не только получить 130 МВт мощности в теплофикационном и конденсационном режимах, но и повысить тепловую нагрузку турбины в относительном выражении на 9,3 % для варианта новой турбины с тремя цилиндрами и на 12,3 % для варианта двухцилиндровой турбины.

Авторы работы [10] предлагают технические мероприятия по совершенствованию теплообменного оборудования тепловой схемы, заключающиеся в устраниении недогрева в подогревателях низкого давления ПНД-1 и 2, модернизации конструкции ПНД-4(5) для повышения эффективности работы пароохладителя, реконструкции ПВД для снижения гидравлического сопротивления пароохладителя и охладителя конденсата, в применении работы деаэраторов на скользящем давлении и отказе от ПНД-4 для энергоблоков с поверхностными ПНД.

**Развитие основного оборудования ТЭС.** В статье [11] доктор технических наук А. Г. Тумановский показывает, что совершенствованием оборудования турбинной и котельной установок, снижением расходов на собственные нужды можно поднять КПД энергоблока с 37 до 42 % (см. рис. 2). Дальнейшее повышение КПД энергоблока до 43...46 % достижимо путём увеличения параметров пара.



Рис. 2. Влияние совершенствования оборудования ТЭС на КПД энергоблоков

**Котельные агрегаты.** Одной из основных целей модернизации котельных установок является повышение их КПД до 92...95 %. Это достигается путём снижения температуры уходящих газов и присосов воздуха в котле, реконструкции топочных и горелочных устройств, оптимизации тепловой схемы котельной установки, снижения потерь давления в пароводяном тракте. Одним из способов снижения температуры уходящих газов является включение в схему блока между подогревателями низкого давления ПНД-2 и ПНД-3 котельного экономайзера низкого давления, как это было сделано при техническом перевооружении Харанорской ГРЭС [4]. Температуру уходящих газов удалось снизить до 128 °C.

Для угольных ТЭЦ разработано использование котла с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС), обеспечивающего большую свободу в выборе топлива и меньшие концентрации вредных соединений в уходящих газах. Основные преимущества технологии ЦКС определяются длительным временем пребывания циркулирующих частиц топлива в реакционной зоне при стабильной и относительно низкой температуре в топке для связывания оксидов серы известняком. В 2017 году введен в эксплуатацию энергоблок мощностью 330 МВт на Новочеркасской ГРЭС [4]. Опыт его

сооружения и эксплуатации создаст условия для широкого использования технологии ЦКС в России.

**Паровые турбины.** В работе [12] авторы приводят результаты исследований эффективности мер по усовершенствованию турбоустановок и турбин класса 200 МВт. Все варианты турбины рассчитывались на температуры свежего пара и пара промперегрева  $t_0 = t_{\text{пп}} = 540, 565$  и  $575^{\circ}\text{C}$ . Для всех вариантов рассчитывались и оптимизировались тепловые схемы паротурбинных установок (ПТУ). Исследователями предложена концептуальная модель турбоустановки. Турбина должна иметь регулирующую ступень, дроссельное парораспределение. При этом увеличивается число ступеней ЦВД. При меньших расходах пара используется скользящее начальное давление. Тепловая схема трёхцилиндровой турбины номинальной мощностью 225 МВт на параметры пара 12,8 МПа и  $575/575^{\circ}\text{C}$  представлена на рис. 3. На схеме изображены: питательный насос с электроприводом и обязательно с переменной частотой вращения для обеспечения более эффективного режима работы на скользящем давлении; деаэратор – скользящего давления, ПНД-2 – смешивающего типа; ПНД-1 размещается в патрубке конденсатора. Присутствуют современные методы сепарации влаги.

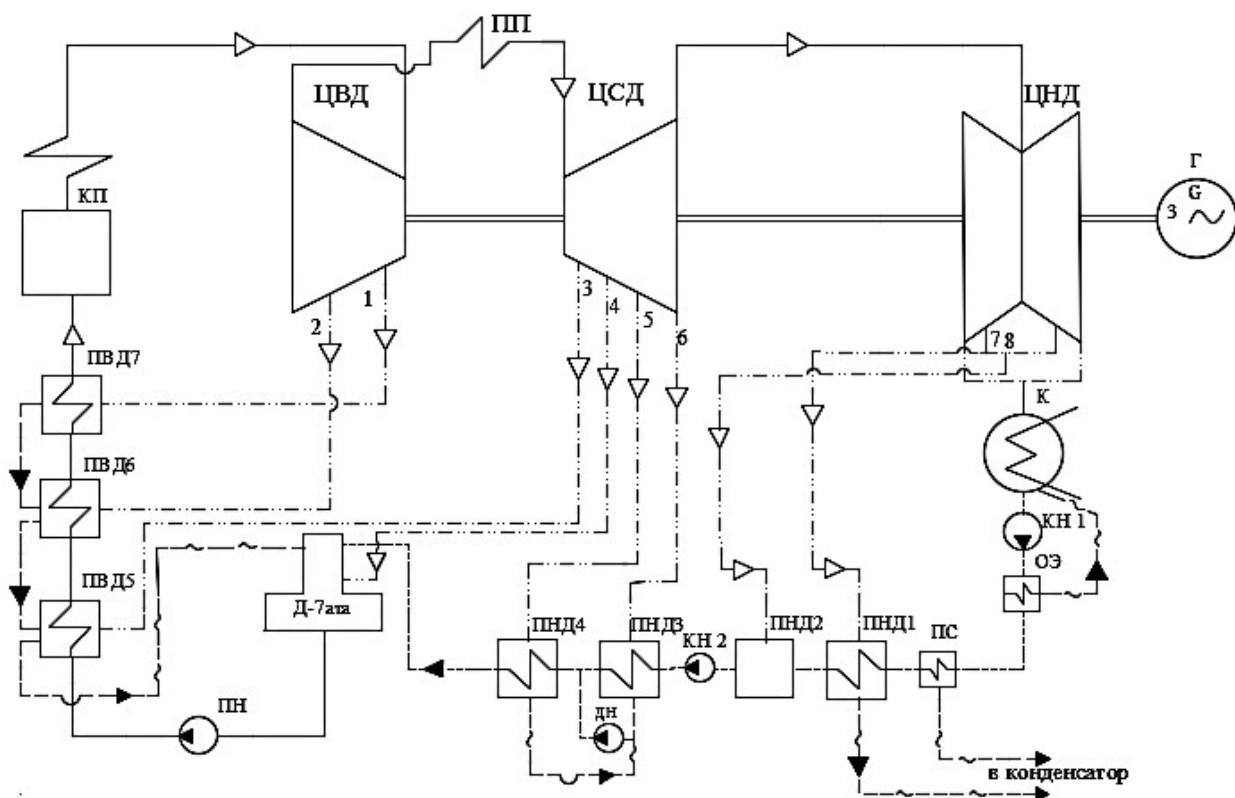


Рис. 3. Принципиальная тепловая схема турбоустановки мощностью 225 МВт

Усовершенствование энергоблоков позволяет получить КПД на уровне 39,5...40,7 %, причём использование повышенных параметров пара (начальной температуры) даёт рост КПД около 1 %.

В работе [13] исследователи НПО ЦКТИ предложили к внедрению теплофикационную турбину нового поколения на повышенные параметры пара с увеличенными не менее чем на 12 % отборами на теплофикацию типа Т-200/250-12,8 для замещения турбоустановки Т-180/210-12,8. У теплофикационной турбины с докритическими параметрами пара и промперегревом Т-200/250-12,8 ЛМЗ предлагается размещать оба отопительных отбора в цилиндре среднего давления (ЦСД), что даёт возможность при использовании расцепной муфты или прецизионных конических болтов в муфте отключать цилиндр низкого давления (ЦНД) при переходе на теплофикационный режим.

В научной публикации [14] учёные и инженеры из ОАО «Турбоатом» представили результаты анализа эффективности технических решений по усовершенствованию элементов проточных частей ЦВД, ЦСД и ЦНД паровой турбины К-220-130. При параметрах пара за статорным клапаном 12,75 МПа, 540 °C КПД цилиндров получились следующими: ЦВД – 88,1 %, ЦСД – 94,3 % и ЦНД – 84,9 % при давлении в конденсаторе  $p_k = 4$  кПа и 87 % при  $p_k = 6,5$  кПа.

Для повышения экономичности и продления срока службы основных элементов паровых турбин мощностью 200...800 МВт специалистами НПО ЦКТИ разработаны и внедрены системы принудительного парового охлаждения роторов высокого и среднего давления.

**Перспективы применения органического топлива.** По данным работы [15], в настоящее время, в ближайшей и достаточно отдалённой перспективе на тепловых электрических станциях на органическом топливе (газ, мазут, уголь) вырабатывается и будет вырабатываться в России примерно 70 % электроэнергии (остальная часть – на ГЭС и АЭС). По оценкам на 2005 г., доли видов топлива на ТЭС составляют: газа и мазута – несколько менее 70 %, твёрдого топлива – несколько более 30 %. При этом естественным является стремление в дальнейшем уменьшать долю газа и мазута и увеличивать долю твёрдого топлива для производства электрической энергии и тепла, хотя бы потому, что запасы газа и нефти в земной коре по теплотворности в сотни раз меньше запасов твёрдого топлива. Вследствие этого переход на всё большее использование последнего в теплоэнергетике является неизбежным.

В России уголь как основное топливо, отмечают в своей работе представители ВТИ [16], сжигается на 87 ТЭС с установленной единичной электрической мощностью от 12 до 3800 МВт (27 ГРЭС и 60 ТЭЦ). Суммарная мощность этих ТЭС составляет около 49 ГВт, в том числе установленная «чисто» угольная мощность – 40,4 ГВт.

Суммарная установленная мощность оборудования ТЭС, работающего только на угле (и торфе с углём), составляет 36,6 ГВт (почти 75 % общей мощности рассматриваемых ТЭС), сжигающего совместно уголь и газ – 7,8 ГВт (чуть больше 15 % общей мощности ТЭС). Остальное оборудование рассматриваемых ТЭС (примерно 10 %) работает только на газообразном топливе. Следует отметить, что большинство ТЭС расположено рядом с угольными месторождениями.

В России продолжаются строительство и модернизация угольных электростанций. Реализованы проекты на Новочеркасской ГРЭС (с технологией сжигания угля с циркулирующим кипящим слоем) и на Троицкой ГРЭС (с паросиловой установкой со сверхкритическими параметрами пара). Введены в эксплуатацию два новых угольных энергоблока 225 МВт на Черепетской ГРЭС. Идёт строительство Приморской ГРЭС в Калининградской области, а также Сахалинской ГРЭС-2, второй очереди Благовещенской ТЭЦ и ТЭЦ в г. Советская Гавань на Дальнем Востоке.

**Выходы.** Обзор опубликованных в периодической печати научных работ, посвящённых основным направлениям развития паросиловых теплофикационных энергоблоков с промежуточным перегревом пара на докритические начальные параметры мощностью 180...230 МВт, показывает, что расширение возможностей теплофикационного энергоблока нового профиля на базе ТУ Т-180/210-130 целесообразно осуществлять с учётом применения:

1. скользящего давления в деаэраторе при снижении нагрузки ТУ (если он будет оставлен в составе новой тепловой схемы);

2. скользящего начального давления пара на частичных режимах работы энергоблока, чему должны способствовать внедрение частотно-регулирующих приводов питательных насосов и дроссельного регулирования пара в турбине;

3. повышенной температуры свежего пара (и температуры промперегрева), а при развитии котельных агрегатов с рабочим давлением пара 18...20 МПа и увеличенных параметров свежего пара в целом;

5. повышенной теплофикационной нагрузки за счёт уплотнения диaphragмы ЦНД или применения расцепной муфты для отключения ЦНД (с отказом от пиковых водогрейных котельных);

6. бездеаэраторной тепловой схемы со смешивающими подогревателями низкого давления.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Трухний, А. Д. Основные научные проблемы создания паротурбинных установок для энергоблоков нового поколения / А. Д. Трухний, Б. М. Трояновский, А. Г. Костюк // Теплоэнергетика. – 2000. – № 6. – С. 13-19.
2. Петреня, Ю. К. Роль НПО ЦКТИ в стратегии развития энергомашиностроения России / Ю. К. Петреня, П. А. Кругликов, Л. Н. Моисеева // Теплоэнергетика. – 2003. – № 2. – С. 4-8.
3. Тумановский, А. Г. Пути совершенствования угольных ТЭС России / А. Г. Тумановский, Г. Г. Ольховский // Теплоэнергетика. – 2015. – № 1. – С. 67-73.
4. Ольховский, Г. Г. К 95-летию ВТИ / Г. Г. Ольховский, Б. Ф. Реутов, А. Г. Тумановский // Теплоэнергетика. – 2016. – № 6. – С. 2-13.
5. Вербовецкий, Э. Х. Разработка современного энергоблока мощностью 225 МВт для расширения Харанорской ГРЭС / Э. Х. Вербовецкий, Г. Д. Авруцкий, Ю. Г. Тихомиров // Теплоэнергетика. – 2006. – № 7. – С. 14-21.
6. Ефимочкин, Г. И. Совершенствование тепловых схем энергоблоков / Г. И. Ефимочкин, Б. И. Шмуклер, Г. Л. Авруцкий // Теплоэнергетика. – 2000. – № 4. – С. 48-53.
7. Трифонов, Н. Н. Опыт и предложения по выбору технических решений при разработке и модернизации бездеаэраторных тепловых схем современных энергоблоков / Н. Н. Трифонов, Ю. Г. Сухоруков, В. Ф. Ермолов // Теплоэнергетика. – 2009. – № 10. – С. 74-77.
8. Тумановский, А. Г. Пути совершенствования угольных ТЭС России / А. Г. Тумановский, Г. Г. Ольховский // Электрические станции. – 2015. – № 1. – С. 67-73.
9. Баринберг, Г. Д. Теплофикационные паровые турбины Т-130/130-12,8 с промежуточным перегревом пара / Г. Д. Баринберг, А. Е. Валамин // Теплоэнергетика. – 2008. – № 8. – С. 9-12.
10. Загретдинов, И. Ш. Повышение располагаемой мощности, надёжности и экономичности действующего оборудования в энергодефицитных системах / И. Ш. Загретдинов // Теплоэнергетика. – 2008. – № 1. – С. 7-10.
11. Тумановский, А. Г. Перспективы развития угольных ТЭС России / А. Г. Тумановский // Теплоэнергетика. – 2017. – № 6. – С. 3-13.
12. Трухний, А. Д. Технические предложения по созданию паротурбинной установки для замены устаревших энергоблоков 150...200 МВт / А. Д. Трухний, А. Г. Костюк // Теплоэнергетика. – 2000. – № 2. – С. 2-10.
13. Концепция турбин на суперсверхкритические, сверхкритические и докритические параметры пара / В. Е. Михайлов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2017. – № 11. – С. 5-12.
14. Повышение эффективности турбинных установок тепловых электростанций / В. Г. Субботин [и др.] // Теплоэнергетика. – 2009. – № 9. – С. 50-54.
15. Костюк, А. Г. Некоторые насущные проблемы проектирования и модернизации паровых турбин / А. Г. Костюк // Теплоэнергетика. – 2005. – № 4. – С. 16-27.
16. Тугов, А. Н. Угольная электроэнергетика в России: состояние и перспективы / А. Н. Тугов, М. Н. Майданник // Электрические станции. – 2017. – № 12. – С. 2-9.

**Посвящается памяти  
КУВШИНОВА  
ГЕННАДИЯ  
ЕВГРАФОВИЧА**



**Бурков А. Ф.  
A. F. Burkow**

## **КРАТКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ДО КОНЦА XIX ВЕКА**

## **BRIEF EVOLUTION OF ELECTRIC MACHINES TILL THE END OF THE XIXth CENTURY**

**Бурков Алексей Федорович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Судовая энергетика и автоматика» Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); 690091, Россия, г. Владивосток, ул. Суханова, 8; тел. 8(423)265 24 29. E-mail: rectorat@dvfu.ru.

**Mr. Aleksey F. Burkow** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Ship Power Engineering and Automation Department, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanov str., 8; tel. 8(423)265 24 29. E-mail: rectorat@dvfu.ru.

**Аннотация.** Разработка и модернизация электрических машин, используемых в современных системах электродвижения судов, невозможны без анализа их эволюции в процессе развития судовой энергетики. В данной статье рассмотрен наиболее значимый исторический период, связанный с интенсивным совершенствованием систем электродвижения, затем нашедших применение на судах самого различного назначения. Приведённый материал позволяет проследить не только основные тенденции технической модернизации оборудования, но и наметить пути дальнейшего его улучшения. Статья является научной основой для начинающих исследователей, занимающихся вопросами проектирования и эксплуатации электромеханических преобразователей. Проанализированные информационные источники охватывают широкий диапазон отечественных и международных публикаций, начиная с самых первых сообщений о теоретических возможностях применения электроэнергии до практических реализаций, появившихся в конце XIX века и связанных с именем М. О. Доливо-Добровольского, который предложил первый трёхфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором в виде беличьей клетки.

**Summary.** Development and modernization of electric machines used in modern systems of electric propulsion of ships is impossible without an analysis of their evolution in the development of marine energy. This article describes the most significant historical period associated with the intensive improvement of electric propulsion systems, then found application on ships of various purposes. The given material allows to trace not only the main tendencies of technical modernization of the equipment, but also to outline ways of its further improvement. The article is a scientific basis for beginning researchers dealing with the design and operation of Electromechanical converters. The analyzed information sources cover a wide range of domestic and international publications, from the very first reports on the theoretical possibilities of using electricity to practical implementations that appeared at the end of the XIXth century and associated with the name of M. O. Dolivo-Dobrovolsky, who proposed the 1st three-phase asynchronous motor with squirrel cage rotor.

**Ключевые слова:** электрическая энергия, электротехника, электромеханический преобразователь.

**Key words:** electrical energy, electrical engineering, electromechanical converter.



УДК 621.313

Современное общество тесно связано с использованием электрической энергии (ЭЭ) в различных областях его деятельности.

Термин «энергия» в современном его смысле ввёл в науку в 1860 г. английский физик Уильям Томсон (William Thomson) (1824–1907), получивший за научные заслуги титул лорда Кельвина (Kelvin) [1; 2].

Предысторией проблемы преобразования различных видов энергии в электрическую и наоборот, использования ЭЭ явились физические природные явления, проводимые опыты, теоретические разработки и их практическая реализация в виде создания опытных образцов, экспериментальных устройств и промышленных установок.

В литературе по истории техники развитие электротехники условно разделяется на несколько исторических периодов. Например, в [1; 3] приведено следующее разделение на условные периоды: до 1800 г. – становление электростатики; с 1800 по 1830 г. – период, в течение которого разрабатывались основы электродинамики, закладывался фундамент электротехники, её научные основы; с 1831 по 1870 г. – период, характеризующийся зарождением электротехники; с 1870 по 1891 г. – становление электротехники, как самостоятельной отрасли науки и техники; после 1891 г. – начало периода, когда решена проблема передачи ЭЭ переменного тока на расстояние.

Применительно к открытиям и исследованиям в области электротехники, касающимся создания и развития электрических машин (ЭМ), предлагается более тесно увязывать периоды открытий и исследований с историческими этапами общественного развития.

Середину 30-х гг. XIX в. можно отнести к объективным предпосылкам создания электромеханического преобразователя вращательного движения – электродвигателя (ЭД). Инспектор гавани в Пиллау Борис Семенович (Мориц Герман) Якоби (Moritz Hermann Jacobi) (1801–1874) обосновал преимущества такого преобразователя и обозначил контуры будущей машины, которую он первоначально называл магнитный аппарат [4]. Идя по пути усовершенствования магнитного аппарата 1834 г., Б. Якоби создал сдвоенный горизонтальный ЭД, достаточно полно описанный в литературе, например в [5; 6].

В начале 1837 г. американский изобретатель Томас Дэвенпорт (Tomas Davenport) (1802–1851) [7] создал конструкцию ЭД, подобную двигателю Б. Якоби и получил патент. Описание данного двигателя приведено в [6; 8]. Позднее Т. Дэвенпорт усовершенствовал свой ЭД, заменив неподвижные постоянные магниты неподвижными электромагнитами [9].

С учётом преимуществ конструкций двигателей Дэвенпорта Б. С. Якоби разработал ЭД с вертикальными валами [10]. Принцип действия его был аналогичен принципу действия двигателей, созданных Якоби в 1834 г., однако конструктивно двигатель претерпел большие изменения. Рисунков или чертежей этого ЭД обнаружить не удалось.

По данным, приведённым в [7], для практического применения ЭД в электроприводе (ЭП) Якоби, с учётом преимуществ конструкций двигателей Т. Дэвенпорта, разработал сдвоенный двигатель с вертикальными валами. В 1838 г. компоненты ЭД были готовы.

Общим недостатком ЭД Б. С. Якоби и Т. Дэвенпорта явилось изменение расстояния между подвижными и неподвижными полюсами электромагнитов в процессе работы. Таким образом, при значительных расстояниях между подвижными и неподвижными полюсами электромагнитов, несмотря на то, что по их обмоткам постоянно протекал электрический ток, сила взаимодействия между ними, зависящая от величины воздушного зазора, имела наименьшую величину.

Борис Николаевич Ржонсицкий (1909–1983) [11] так оценил деятельность Б. Якоби по созданию и развитию ЭД: «...Якоби в течение многих лет продолжал свои изыскания, побуждая трудиться над созданием нового двигателя многих русских исследователей и изобретателей, среди которых выделяются работы В. Кайданова...» [12].

В книге «Основы электропривода» Владимир Константинович Попов (1895–1948) [3] отметил: «...Первое применение электропривода имело место... на транспорте...» [13].

В 30-х гг. XIX в. Доминик Франсуа Жан Араго (Dominique François Jean Arago) (1786–1853) и Майкл Фарадей (Michael Faraday) (1791–1867) открыли и частично исследовали явление электромагнитного вращения [8].

Одной из основных причин, препятствующих развитию ЭД и ЭП в целом, являлось отсутствие экономически эффективных источников ЭЭ.

Б. Н. Ржонсницкий писал: «...Препятствием к широкому использованию электроэнергии для двигательных целей служили не недостатки в самих двигателях, а в источниках тока, расходовавших дорогостоящие цинк и электролиты и доводивших расходы на 1 л.с. до таких размеров, при которых “можно было считать, что электродвигатель обходится в 20-30 раз дороже паровой машины”...» [14].

Учитывая достоинства и недостатки основных электродвигательных устройств того времени, В. Кайданов предложил два варианта разработанного им ЭД [6; 8]. Эти ЭД, как и двигатели Б. Якоби и Т. Дэвенпорта, были первыми практически пригодными двигателями, которые представляли собой прототипы современных ЭД постоянного тока, принцип действия которых основан на взаимодействии магнитов. Вследствие больших потерь ЭЭ они имели низкий коэффициент полезного действия (КПД) и не имели постоянного момента вращения.

Английский физик Чарльз Уитстон (Charles Wheatstone) (1802–1875) [15] в 1841 г. сконструировал синхронный двигатель переменного тока [6] (термин синхронная машина был введён Чарльзом Протеусом Штейнмецем (Charles Proteus Steinmetz) (1865–1923) [16]). Принцип действия двигателя Ч. Уитстона был также основан на взаимодействии магнитов [6; 8]. ЭД Уитстона явился прообразом современных синхронных двигателей.

В 1853 г. Томасу Аллану в России была выдана привилегия на ЭД, конструкция которого в основном была заимствована у вертикальной компаундной паровой машины [6].

Электромеханические устройства с возвратно-поступательным движением, не дающие непосредственного вращения, явились неперспективными с точки зрения разработки и создания ЭД, не заслуживающими отдельного рассмотрения. Б. С. Якоби отмечал, что они будут «...не больше чем забавной игрушкой для обогащения физических кабинетов...», их «нельзя будет применять... с какой-нибудь экономической выгодой...» [17].

Дальнейшее развитие ЭД обусловлено изобретением кольцевого якоря.

Итальянский физик и изобретатель Антонио Пачинотти (Antonio Pacinotti) (1841–1912) [18] в 1860 г. впервые создал ЭД постоянного тока с кольцевым якорем [8; 19]. По результатам испытаний А. Пачинотти сделал вывод о возможности обратимости данной ЭМ [6].

В 1867 г. на Парижской выставке демонстрировался ЭД постоянного тока, сконструированный французским механиком Полем Густавом Фроманом (Paul-Gustave Froment) (1815–1865) [20]. Принцип действия этого двигателя был основан на притяжении железных полос электромагнитами, поочередно подключаемыми к гальванической батарее при помощи коммутатора [21]. Мощность ЭД достигала 0,74 кВт, а вес составлял около 75 кг [22].

В 1885 г. итальянский физик и электротехник Галилео Феррарис (Galileo Ferraris) (1847–1897) [23] открыл явление вращающегося магнитного поля, разработал и создал опытный образец двухфазного асинхронного двигателя (АД) [6; 8].

В 1887 г. сербский изобретатель Никола Тесла (Nikola Tesla) (1856–1943) [24], независимо от Г. Феррариса, открыл явление вращающегося магнитного поля и сконструировал несколько вариантов двухфазных и трёхфазных АД [6; 8]. В двухфазном двигателе обмотки статора были расположены в пространстве друг относительно друга на  $90^\circ$ . При подключении пар полюсных катушек индуктора двухфазного ЭД к переменному напряжению по ним протекали токи, сдвинутые по фазе на  $90^\circ$ . В этом случае появлялось вращающееся магнитное поле индуктора (статора). При взаимодействии вращающихся магнитных полей индуктора (статора) и ротора создавался вращающий момент. В трёхфазном АД обмотки статора были расположены в пространстве друг относительно друга на  $60^\circ$ .

Двигатели Тесла не нашли широкого применения даже после того, как была применена по-заимствованная у русского электротехника Михаила Осиповича Доливо-Добровольского (1862–

1919) [5] распределённая обмотка [6]. Лондонский журнал «Electrical Review» писал: «...Система электродвигателей Тесла, по-видимому, будет совершенно вытеснена трёхфазными электродвигателями...» [25].

В 1889 г. М. О. Доливо-Добровольский предложил первый трёхфазный АД с короткозамкнутым ротором в виде беличьей клетки, на конструкцию которого он сделал патентную заявку. Этот двигатель был построен на заводе АЭГ (AEG) в Берлине [26; 27]. Доливо-Добровольский отмечал: «...Уже при первом включении выявилось ошеломляющее... действие. Электродвигатель, якорь которого имел диаметр около 74 мм и длину также около 74 мм и не обладал никакими особыми присоединениями к сети, мгновенно стал вращаться на полное число оборотов, и был совершенно бесшумен. Попытка остановить его торможением за конец вала от руки блестяще провалилась. ...Электродвигатели постоянного тока имели КПД по крайней мере на 10 % меньше...» [6]. Мощность этого двигателя составляла около 100 Вт [27].

Необходимо отметить, что до этого двигателя М. О. Доливо-Добровольского известные ЭД переменного тока при включении в сеть нужно было разгонять внешними силами до определённой скорости.

Создание трёхфазного переменного тока обусловило дальнейшее совместное развитие теории и практики источников ЭЭ, преобразователей, ЭД и систем управления.

В начале 1890 г. с целью уменьшения магнитного рассеяния обмотки статора был построен трёхфазный АД с обмоткой статора типа барабанного якоря мощностью до 2,2 кВт [6]. В том же 1890 г. французскими электриками М. Ютеном и М. Лебланом был изготовлен двухфазный ЭД переменного тока, у которого разность фаз создавалась при помощи конденсаторов – конденсаторный двигатель (Патент № 3968 Швейцария, 1891 г.) [10].

В 1891 г. состоялась Международная электротехническая выставка во Франкфурте-на-Майне (Германия), для которой был изготовлен трёхфазный АД М. О. Доливо-Добровольского мощностью около 74 кВт. Двигатель имел четыре пары полюсов и был изготовлен на трёхфазные переменные напряжения 100 и 170 В частотой 40 Гц. Скорость вращающегося магнитного поля составляла 600 об/мин (62,8 рад/с) [6].

Несмотря на успешное испытание системы трёхфазного переменного тока, некоторые деловые круги, в первую очередь Европы и Америки, связанные с производством и использованием ЭЭ постоянного тока, пытались в силу своих возможностей препятствовать развитию переменного тока. Например, против внедрения переменного тока боролся в том числе и американский изобретатель Томас Алва Эдисон (Tomas Alva Edison) (1847–1931) [28]. Его фирма изготавливала электрическое оборудование постоянного тока и старалась доказать, что «...переменный ток противен божественной природе человека...» и что его действие смертельно опасно [29]. Однако все старания противников переменного тока оказались напрасными. Переменный ток стал быстро внедряться во всех отраслях промышленности.

В 1897 г. были разработаны и введены обмотки АД с переключением числа пар полюсов [30].

Таким образом, в статье на основании сбора и анализа исторических и технических сведений, предпринята попытка исследовать вопросы, связанные с возникновением и развитием ЭД до конца XIX в. С определённой степенью достоверности выделены основные предпосылки, оказавшие влияние на создание и развитие ЭД.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Веселовский, О. Н. Энергетическая техника и её развитие / О. Н. Веселовский, Я. А. Шнейберг. – М.: Высш. шк., 1976. – 304 с.
2. Кириллин, В. А. Страницы истории науки и техники / В. А. Кириллин. – М.: Наука, 1986. – 512 с.
3. История энергетической техники СССР / ред. комиссия Л. Д. Белькинд и др. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957. – Т. 1 – 3.
4. Радовский, М. И. Борис Семенович Якоби / М. И. Радовский. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1949. – 136 с.
5. Шателен, М. А. Русские электротехники XIX века / М. А. Шателен. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 449 с.

6. Гусев, С. А. Очерки по истории развития электрических машин / С. А. Гусев. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 216 с.
7. Яроцкий, А. В. Борис Семенович Якоби. 1801–1874 / А. В. Яроцкий. – М.: Наука, 1988. – 240 с.
8. Бурков, А. Ф. История электротехники до конца XIX века. Электрические машины / А. Ф. Бурков. – Владивосток: Мор. гос. ун-т им. адм. Г. И. Невельского, 2006. – 154 с.
9. Силиман, Б. О машине Дэвенпорта, 1838 / Б. Силиман // Электродвигатель в его историческом развитии: документы и материалы / Д. В. Ефремов, М. И. Радовский; под ред. В. Ф. Миткевича. – М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1936. – С. 261-262.
10. Кабинет физики СПбАППО – Биография физиков [Электронный ресурс]. – URL: <http://edu.delfa.net/Interest/biography/G/guericke>.
11. Ржонсницкий Борис Николаевич [Электронный ресурс]. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Ржонсницкий,\\_Борис\\_Николаевич](https://ru.wikipedia.org/wiki/Ржонсницкий,_Борис_Николаевич).
12. Ржонсницкий, Б. Н. Электромагнетическая машина В. Кайданова / Б. Н. Ржонсницкий // Электричество. – 1949. – № 1. – С. 73-75.
13. Попов, В. К. Основы электропривода / В. К. Попов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1945. – 672 с.
14. Ржонсницкий, Б. Н. Дмитрий Александрович Лачинов / Б. Н. Ржонсницкий. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1949. – 107 с.
15. Уитстон Чарльз [Электронный ресурс]. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Уитстон,\\_Чарльз](https://ru.wikipedia.org/wiki/Уитстон,_Чарльз).
16. Штейнмец Чарлз Протеус [Электронный ресурс]. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Штейнмец,\\_Чарлз\\_Протеус](https://ru.wikipedia.org/wiki/Штейнмец,_Чарлз_Протеус).
17. Якоби, Б. С. Памятная записка о применении электромагнитной силы для приведения в движение машин, 1835 / Б. С. Якоби // Электродвигатель в его историческом развитии: документы и материалы / Д. В. Ефремов, М. И. Радовский; под ред. В. Ф. Миткевича. – М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1936. – С. 148-209.
18. Пачинотти Антонио [Электронный ресурс]. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Пачи-нотти,\\_Антонио](https://ru.wikipedia.org/wiki/Пачи-нотти,_Антонио).
19. Краткая летопись радио. XVIII век [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.viol.uz/chronicle/part2>.
20. Paul-Gustave Froment [Электронный ресурс]. – URL: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Paul-Gustave\\_Froment](https://fr.wikipedia.org/wiki/Paul-Gustave_Froment).
21. Бооль, В. Г. Полный курс физики. По сочинениям Жамена и Вюльнера. Т. 3 / В. Г. Бооль. – СПб.: Изд-во М. О. Вольфа, 1867. – 628 с.
22. Лачинов, Д. А. Электромеханическая работа / Д. А. Лачинов // Электричество. – 1880. – № 1-7.
23. Храмов, Ю. А. Физики: биографический справочник / Ю. А. Храмов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Наука, 1983. – 400 с.
24. Загадки изобретений Николы Теслы [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.inventua.com/Public/RU/tesla\\_RU](http://www.inventua.com/Public/RU/tesla_RU).
25. Томпсон, С. Электротехническая библиотека. Т. 4. Многофазные электрические токи и двигатели переменного тока / С. Томпсон; под ред. М. А. Шателена. – СПб.: Электричество, 1898. – 251 с.
26. Веселовский, О. Н. Михаил Осипович Доливо-Добровольский [1862–1919] / О. Н. Веселовский. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 272 с.
27. Бурков, А. Ф. История отечественных судовых электроприводов / А. Ф. Бурков. – Владивосток: Дальневост. гос. техн. рыбохоз. ун-т, 2008. – 380 с.
28. Томас Алва Эдисон (Tomas Alva Edison) [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.peoples.ru/technics/designer/edison](http://www.peoples.ru/technics/designer/Edison) <https://www.peoples.ru/technics/designer/edison>.
29. Тихонов, В. В. История развития корабельного электропривода / В. В. Тихонов. – Л.: Высшее военно-морское инженерное ордена Ленина училище им. Ф. Э. Дзержинского, 1953. – 87 с.
30. Бурков, А. Ф. Судовые электроприводы / А. Ф. Бурков. – СПб.: Лань, 2019. – 372 с.

# УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

## MANAGEMENT, COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

**Зайченко И. В., Бажеряну В. В., Соколова В. С.**  
**I. V. Zaychenko, V. V. Bazheryanu, V. S. Sokolova**

### **УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ РЕМОНТА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СОСТАВЕ ИЗДЕЛИЯ И ОЦЕНКА ЭНЕРГОЗАТРАТ**

### **TECHNOLOGICAL CONTROL OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS PARTS REPAIR AS PART OF THE PRODUCT AND ESTIMATION OF ENERGY COSTS**

**Зайченко Илья Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: zaychenko@inbox.ru.

**Mr. Ilya V. Zaichenko** – PhD in Engineering, Associate Professor, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: zaychenko@inbox.ru.

**Бажеряну Виктория Васильевна** – студентка кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: bazherianu@mail.ru.

**Ms. Victoria V. Bazheryanu** – Student, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: bazherianu@mail.ru.

**Соколова Вера Сергеевна** – аспирантка Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sokolova.v.s@mail.ru.

**Ms. Vera S. Sokolova** – a Post-Graduate, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sokolova.v.s@mail.ru.

**Аннотация.** В статье представлен анализ проблем, возникающих при проведении ремонта на производственном участке изготовления деталей из ПКМ филиала ПАО «Компания “Сухой” “КнААЗ им. Ю. А. Гагарина”». Обосновано внедрение автоматизированной системы управления электротехнологическими установками нагрева Hot Bonder. Приведено описание состава оборудования, данные временных и энергетических затрат при автоматизации технологического процесса ремонта деталей из ПКМ в составе изделия на производственном участке.

**Summary.** The article presents an analysis of the problems that arise during repairs at the production site to produce parts from PCM of Branch of PJSC Sukhoi Company, KoAAP named after Yuri Gagarin. The introduction of an automated control system for electrotechnological heating installations Hot Bonder is justified. A description of the composition of the equipment, data on time and energy consumption for the automation of the technological process of repairing parts from PCM as part of the product at the production site.

**Ключевые слова:** автоматизация, технология локального нагрева, энергоэффективность, полимерные композиционные материалы.

**Key words:** automation, local exposure technology, energy efficiency, polymer composite materials.

УДК 004.001.12/.18

В конструкции современных изделий авиационной техники применяется большое количество крупногабаритных деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ), в том числе изготавливаемых по кооперации на других предприятиях. При сборке агрегатов происходят механические повреждения деталей и образуются дефекты, недопустимые в дальнейшей эксплуатации изделия [1; 3; 4; 5; 7].

Температура эксплуатации агрегатов с деталями из ПКМ, выходящими на теоретический контур (ТК) изделия, составляет не менее 150...175 °C. Поэтому проведение ремонта таких деталей kleями холодного отверждения недопустимо, т.к. рабочая температура kleёв не выше 125 °C [6; 7; 8].

Проведение ремонта на производственном участке изготовления деталей из ПКМ филиала ПАО «Компания “Сухой” “КнАЗ им. Ю. А. Гагарина”» невозможно по следующим причинам:

- отсутствие формообразующей оснастки для изготовления деталей из ПКМ, полученных по кооперации;
- внутренний диаметр автоклава «Шольц», применяемого для автоклавного формования деталей, меньше габаритных размеров деталей из ПКМ, получаемых по кооперации;
- нет возможности демонтажа детали или агрегата из ПКМ с изделия.

Длительную работоспособность деталей из ПКМ, получивших механические повреждения, при температурных режимах 150...175 °C можно обеспечить только проведением ремонта горячим способом с применением локального нагревательного элемента, вакуумного насоса и материалов, применяемых для изготовления данных деталей [2; 9; 10].

Преимущества технологии локального ремонта деталей из ПКМ с применением портативной системы управления горячей склейкой:

- возможность проведения ремонта непосредственно на изделии;
- проведение локального нагрева не вызывает поводок деталей;
- обеспечение прочностных характеристик деталей из ПКМ после проведения локального ремонта методом горячей склейки заданным значениям за счёт использования при ремонте материалов, применяемых в данной конструкции деталей из ПКМ;
- снижение затрат на электроэнергию при склеивании без использования энергоёмкого оборудования автоклава «Шольц»;
- сокращение времени ремонта (не требуется время на разогрев материала ёмкой формообразующей оснастки и внутреннего объёма автоклава).

Для локального ремонта крупногабаритных деталей из ПКМ и kleеных металлических конструкций в составе изделия необходимо специальное переносное оборудование. Принципиальная технологическая схема оборудования для локального ремонта представлена на рис. 1.

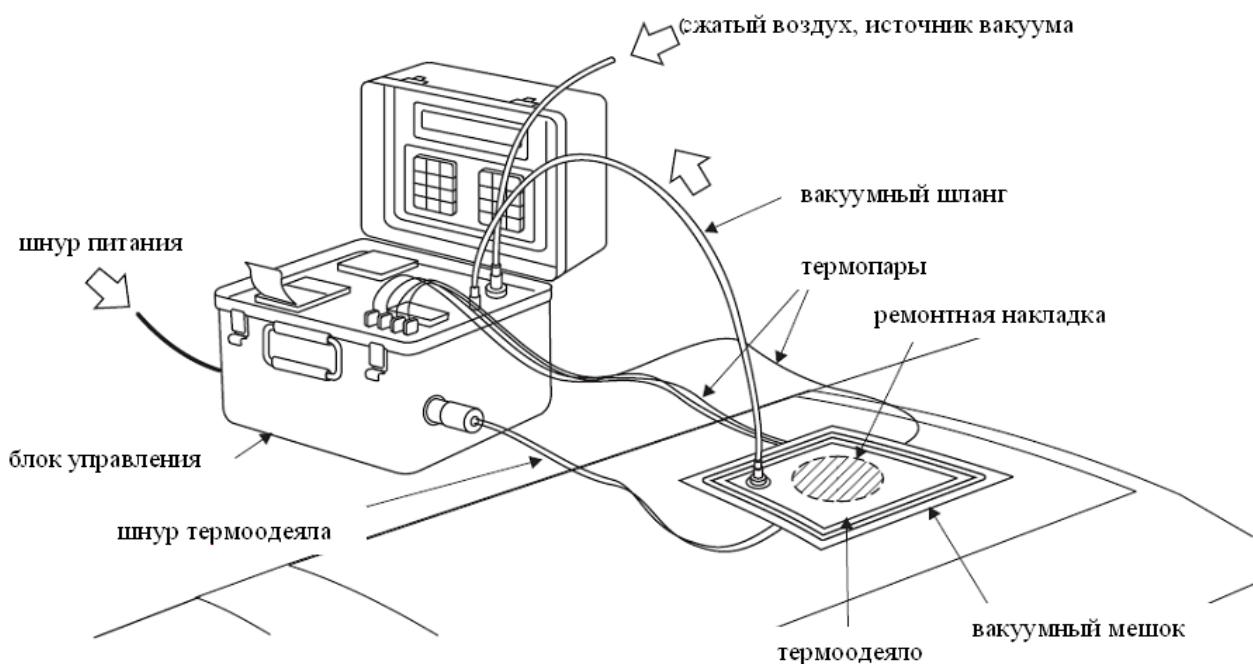


Рис. 1. Схема оборудования для локального ремонта

Производство установок для локального ремонта получило большое распространение и поддержку в связи с коммерческим успехом гражданских изделий компаний Boeing и Airbus, а также увеличением объёма деталей из ПКМ в изделиях военного назначения. Лидерами по производству подобных установок являются фирмы BriskHeat (США), Heatcon (США), WichiTech (США) и Aeroform (Великобритания).

Впервые технология ремонта с применением локального нагрева была опробована на образце детали по следующей технологии:

1. Вырезают внутреннюю обшивку панели и сотовый заполнитель (СЗ) до наружной обшивки панели диаметром 60 мм.
2. Устанавливают накладку из стеклоткани Т-10 на клее холодного отверждения без наполнителя.
3. Устанавливают в отверстие вставку СЗ с нанесённым по торцам плёночным kleem.
4. Поверх сот выкладывают фторопластовую плёнку, затем устанавливают цулагу.
5. Производят выдержку клея при температуре 18...35 °C под грузом в течение 24 ч.
6. Производят неразрушающий контроль образца со стороны внутренней обшивки на расслоения и непроклеи. Дефекты не должны быть обнаружены.
7. Изготавливают накладку из углепластика толщиной, равной толщине ремонтируемой обшивки.
8. На углепластиковую накладку выкладывают клеевой препрег. Нагрев клеевого препрега при выкладке производят феном ( $t = 60\ldots80$  °C).
9. Затем накладку устанавливают на СЗ.

Сборку технологического пакета производят по следующей схеме: фторопластовая плёнка; накладка для распределения температуры из алюминиевой фольги толщиной 0,5 мм размером 250×300 мм; локальный нагревательный элемент «термоодеяло», изготовленное из пропитанной герметиком ВИКСИНТ стеклоткани; дренаж из 3...4 слоёв стеклоткани Т-10; вакуумный мешок из плёнки полиамида, 2 слоя стекломата марки АТМ.

Температуру контролируют потенциометром «Диск-250». Регулирование температуры производят вручную при помощи ЛАТРа по тарировочному графику зависимости напряжения от времени. Склейивание производят под вакуумом от автоклава «Шольц» не менее 0,7 кгс/см<sup>2</sup> по следующему режиму: нагрев до (175±5) °C 1,5 ч (скорость нагрева 2 °C/мин), выдержка при температуре (175±5) °C 3 ч; затем постепенное охлаждение за счёт уменьшения напряжения в течение 1,5 ч до 75 °C (скорость охлаждения 2 °C/мин), снятие вакуума и отключение термоодеяла.

После ремонта расслоения и непроклея при неразрушающем контроле не обнаружено. При контроле геометрии панели в свободном состоянии без приложения усилия на болванке для выклейки после ремонта коробления не выявлены. Предел прочности на отрыв сотового заполнителя в зоне ремонта составил 38 кгс/см<sup>2</sup>, что соответствует НД и КД. По вышеуказанной технологии согласно рекомендациям успешно выполнен ремонт панели СЧФ самолёта.

По результатам опробования сделаны следующие выводы. Данное устройство для локального ремонта обеспечивает скорость нагрева не более 2 °C/мин в соответствии с НД, позволяет производить выдержку при температуре с погрешностью не более 5 °C. Градиент температур по толщине детали составляет не более 2 °C. В связи с низкой теплопроводностью детали ПКМ имеют малую инерционность при нагреве, поэтому при проведении ремонта с применением локального нагрева необходимо применять теплоизоляционные материалы, ремонт производить в помещении, исключающем перепады температур и сквозняки.

В результате анализа зарубежного оборудования для проведения локального ремонта деталей из ПКМ был выбран прибор горячей склейки ACR-3 Hot Bonder фирмы Briskheat. Было произведено опробование оборудования ACR-3 Hot Bonder. Состав прибора ACR-3 Hot Bonder однозонный: чемодан с ручками и колёсами для транспортировки; USB флэш-устройство, 2 вакуумных шланга; 10 термопар J-типа; 2 вакуумных штуцера; 1 шнур питания (3 м), 1 шнур для нагревателя (3 м), 5 стандартных соединительных адаптера термопар; 4 рулона чековой ленты для принтера и 4 картриджа для принтера; 3 силиконовых термоодеяла различного размера.

Краткое техническое описание прибора: универсальное вводимое напряжение 100...130 В или 200...240 В, цветной touch-screen экран 214 мм, специальное ПО для управления. Встроенное оборудование: электрический вакуумный насос ВЕНТУРИ. Сила тока не более 30 А на нагревательную зону. Сохранение информации о ремонтном процессе и USB-порт для использования флэш-устройства. Сохранение до 30 ремонтных программ. Система имеет высокий уровень защиты и пароль. Максимальная температура 232 °C, регистрирующая программа, звуковой и видимый сигналы тревоги и оповещения. Возможность подключения дополнительного источника вакуума, например, от автоклава «Шолыц» или сжатого воздуха от пневмосистемы цеха. Схема и технология ремонта с использованием прибора ACR-3 Hot Bonder аналогична вышеописанной. Для установки СЗ и приклейки накладки из углепластика использовали высокотемпературный плёночный клей для автоклавных процессов. Приклеивание СЗ и накладки производили за одно формование. Результаты испытаний соответствуют ТД и НД.

На основании опробования можно сделать следующие выводы:

1. Технология ремонта деталей из ПКМ с применением локального нагрева под вакуумом обеспечивает отверждение плёночного клея и качество склеивания с сотовым заполнителем и накладкой из углепластика с требуемой по КД прочностью. Необходимо изготавливать накладку, соответствующую по толщине ремонтируемой обшивке.

2. Устройство для локального ремонта обеспечивает скорость нагрева не более 2 °C/мин в соответствии с НД, позволяет производить выдержку при температуре с погрешностью 2,67 °C. Градиент температур по толщине детали составляет не более 2...3 °C (при установленном режиме).

В настоящее время указанный прибор рекомендован разработчиком для ремонта деталей из ПКМ и приобретён в двухзонной комплектации с расширенным количеством термоодеял различного размера и удлинёнными (до 10 м) вакуумными шлангами, термопарами, шнурами питания и подключения, что позволяет выносить прибор на значительное расстояние от зоны ремонта и обеспечивает взрыво- и электробезопасность при ремонте с ЛВЖ и материалами непосредственно на изделии. Прибор успешно применяют при ремонте деталей как на производственном участке изготовления деталей из ПКМ, так и в цехах окончательной сборки. Прибор аттестован на предприятиях, проведено обучение и аттестация исполнителей, разработан ТП по ремонту деталей из ПКМ.

В настоящее время проведены отработка и анализ опыта технологии ремонта с применением прибора на деталях и агрегатах в составе изделия в цехах АСП. Технология ремонта уточнена в части использования вспомогательных материалов, оптимального расположения термопар и нагревательного элемента. На основе опыта ремонта и статистики площадей повреждения подобраны и приобретены соответствующие по форме и площади термоодеяла.

Проведено опробование формования образцов пластика на основе kleевых препрегов КМКУ и КМКС под давлением и без избыточного давления с последующими сравнительными механическими и акустическими испытаниями образцов. Давление формования представлено в табл. 1.

Таблица 1

## Давление формования

Параметр	Автоклавное формование		Вакуумное формование	
Тип препрега	Соты	Монолит	Соты	Монолит
Давление, атм	2+0,25	5+0,5	0,8...0,9	0,8...0,9

Режим формования образцов:

- создать вакуум не менее 0,8 кгс/см<sup>2</sup>;
- поднять температуру до (125±5) °C со скоростью не более 2 °C/мин;
- выдержать при температуре (125±5) °C в течение (60+5) мин;
- поднять давление до требуемой величины, при достижении давления 1 кгс/см<sup>2</sup> отключить вакуумный насос, соединить вакуумный мешок с атмосферой;
- поднять температуру до (180±5) °C со скоростью не более 2 °C/мин;

- выдержать при температуре  $(180 \pm 5)$  °С в течение  $(5 \pm 0,5)$  ч;
- охладить под давлением до температуры не более 40 °С со скоростью не более 1 °С/мин.

Схемы выкладки выбраны типовыми для монолитных и сотовых конструкций на основе kleевых препрегов КМКС и КМКУ, изготавливаемых на предприятии.

Неразрушающий акустический контроль образцов проводили по соответствующим для данных конструкций методикам ВИАМ и НИАТ импедансным и эхо-теневым методом. При акустическом контроле расслоения, непроклеи и зоны затухания сигнала не обнаружены. Образцы соответствуют расчётной требуемой толщине.

По результатам акустических и механических испытаний образцов, а также после технологической отработки ремонта непосредственно на изделии можно сделать выводы, что технология ремонта деталей ПКМ с применением портативной системы управления:

- обеспечивает требуемые согласно КД прочностные характеристики деталей из ПКМ после проведения локального ремонта;
- позволяет использовать при ремонте материалы, применяемые в данной конструкции деталей или с температурой эксплуатации, соответствующей температуре эксплуатации данных деталей;
- позволяет проводить «горячий» ремонт непосредственно на изделии;
- не вызывает поводок и короблений ремонтируемой детали или агрегата после ремонта;
- позволяет устанавливать и формовать накладки из kleевых препрегов КМКУ и КМКС под вакуумом при требуемой температуре непосредственно в зоне ремонта без предварительного формования в автоклаве под давлением;
- позволяет снизить затраты на электроэнергию при склеивании без использования энергозатратного оборудования: автоклава «Шольц» и вакуумных термопечей.

Средняя мощность тенов при работе автоклавных установок по режиму на рис. 2 составляет 435 кВт. Как видно из диаграммы (см. рис. 2), тены автоклава работают 11 ч до начала охлаждения при каждом цикле формования.

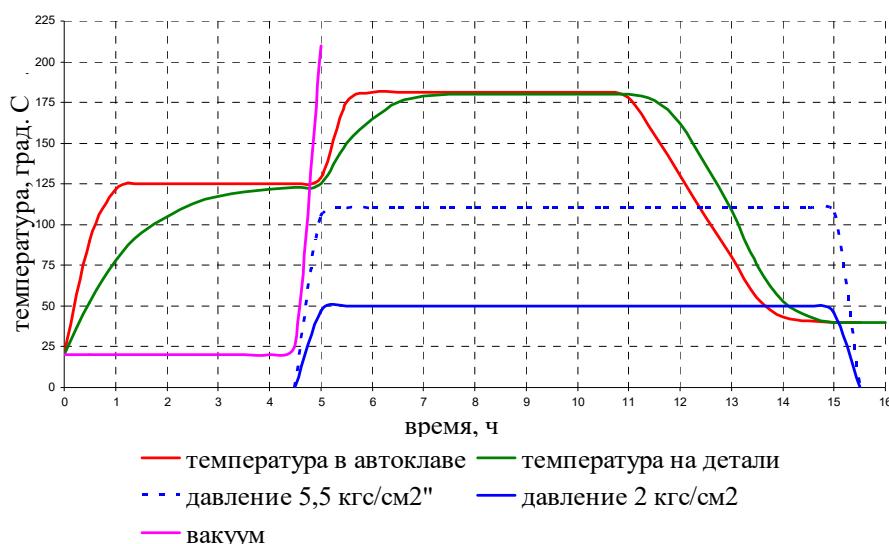


Рис. 2. Диаграмма формования деталей из kleевых препрегов

Из диаграммы на рис. 3 видно, что время работы термоодеяла Hot Bonder составляет 6...7 ч вместо 11 ч нагрева тэнов в автоклаве.

Анализ обработанных результатов измерений, приведённых на рис. 2 и 3, позволяет утверждать, что ремонт деталей без использования энергозатратного оборудования (автоклава «Шольц» и вакуумных термопечей) позволяет сократить время основного режима формования и снизить энергозатраты при ремонте.

При изготовлении деталей сокращена основная выдержка при температуре  $(180 \pm 5)$  °C с 5 до 3 ч. Кроме того, при использовании локального нагрева не требуется разогревать рабочее пространство автоклава или термопечи, таким образом, сокращается время нагрева детали и расход электроэнергии.

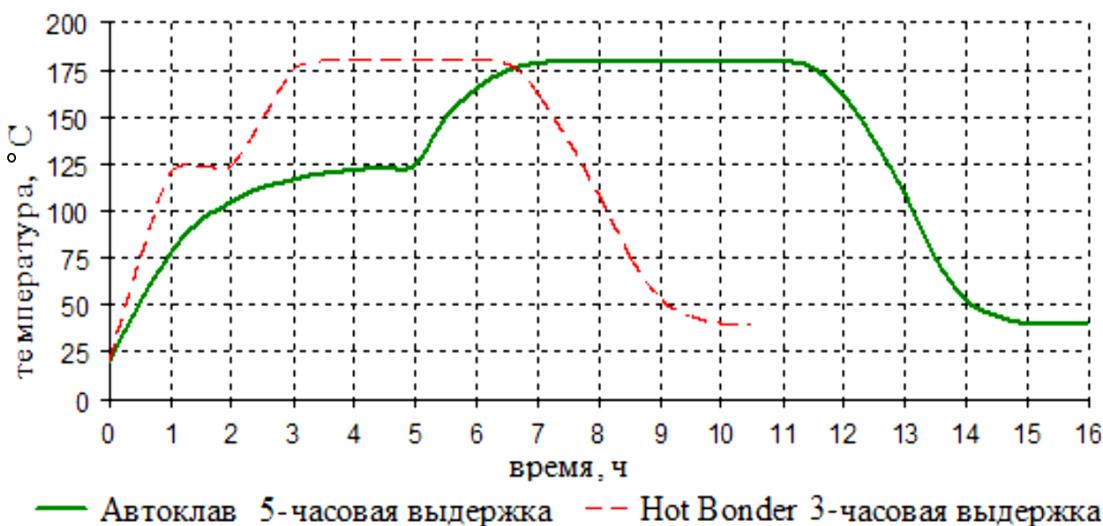


Рис. 3. Диаграммы формования выдержки при давлении в автоклаве и при помощи Hot Bonder

Также при использовании Hot Bonder по сравнению с полным режимом формования в автоклаве сокращаются затраты на работу вакуумного насоса за счёт использования небольшого встроенного электронасоса, кроме того сокращается время работы вентилятора, который постоянно работает в течение всего цикла в автоклаве.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Полимерные композиционные материалы / С. Л. Баженов, А. А. Берлин, А. А. Кульков, В. Г. Ошмян. – Долгопрудный: Интеллект, 2010. – 352 с.
2. Баурова, Н. И. Диагностирование и ремонт машин с применением полимерных материалов: моногр. / Н. И. Баурова. – М.: ТехПолиграфЦентр, 2008. – 280 с.
3. Баурова, Н. И. Особенности проектирования и применения композитных материалов и изделий из них в машиностроительной отрасли [Электронный ресурс] / Н. И. Баурова. – URL: <http://academyoftech.ru/courses/proektirovaniye-i-primenenie-kompozitov-v-mashinostroitelnoy-otrasli>.
4. Гращенков, Д. В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов / Д. В. Гращенков, Л. В. Чурсова // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № S. – С. 231-242.
5. Применение композиционных материалов на основе клеевых препрегов в машиностроении / Л. А. Дементьева, Н. Ф. Лукина, А. П. Петрова, К. Е. Куцевич // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2014. – № 8. – С. 11-17.
6. Особенности изготовления изделий из ПКМ методом пропитки под давлением / М. И. Душин, А. В. Хрульков, Р. Р. Мухаметов, Л. В. Чурсова // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 1. – С. 18-26.
7. Зорин, В. А. Опыт применения композиционных материалов в изделиях авиационной и ракетно-космической техники / В. А. Зорин // Конструкции из композиционных материалов. – 2011. – № 4. – С. 44-59.
8. Зорин, В. А. Моделирование свойств ремонтных материалов при длительном воздействии эксплуатационных факторов / В. А. Зорин, Н. И. Баурова // Механизация строительства. – 2012. – № 1. – С. 15-17.
9. Махутов, Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и технологическая безопасность. В 2 ч. Ч. 1. Критерии прочности и ресурса / Н. А. Махутов; под ред. К. В. Фролова, В. В. Москвичева. – Новосибирск: Наука, 2005. – 493 с.
10. Ривин, Г. Л. Ремонт конструкций из полимерных композиционных материалов летательных аппаратов: учеб. пособие / Г. Л. Ривин. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 75 с.



**Купова А. В., Лановенко Е. В., Соловьёв В. А. Гудим А. С.**  
**A. V. Kupova, E. V. Lanovenko, V. A. Solovyov, A. S. Gudim**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДУГОВОЙ ПЕЧИ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ В МАТЛАВ

## SIMULATION OF ELECTRIC ARC FURNACE WITH CONTROLLED ELECTRODE MEANS MATLAB

**Купова Анастасия Викторовна** – старший преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: avkupova@etu.ru.

**Mrs. Anastasia V. Kupova** – Senior Lecturer of Theoretical Bases of Electrical Engineering Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» (Russia, Saint Petersburg). E-mail: avkupova@etu.ru.

**Лановенко Елена Викторовна** – доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: elanovenko@mail.ru.

**Mrs. Elena V. Lanovenko** – PHD in Engineering, Assistant Professor of Theoretical Bases of Electrical Engineering Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» (Russia, Saint Petersburg). E-mail: elanova@mail.ru.

**Соловьёв Вячеслав Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

**Mr. Vyacheslav A. Solovyov** – Doctor of Engineering, Professor of Electric Drive and Industrial Plant Automation Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

**Гудим Александр Сергеевич** – декан электротехнического факультета Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. +7(4217)24-11-09. E-mail: Elf@knastu.ru.

**Mr. Alexander S. Gudim** – Dean of the Faculty of Electrical Engineering, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. +7(4217)24-11-09. E-mail: Elf@knastu.ru.

**Аннотация.** В статье рассмотрено моделирование дуговой сталеплавильной печи в системе MatLab. Данная модель предназначена для дальнейшей интеграции в общую модель системы энергоснабжения печи, в которой также содержится статический тиристорный компенсатор. Поэтому дуговая печь представляется как электротехнический объект, описываемый соответствующими параметрами. При моделировании учитывалось, что перемещение электродов в ванне печи оказывает влияние на переходные процессы в общей системе. В результате была получена модель дуговой печи с системой управления положением электродов.

**Summary.** This article discusses the simulation of an arc steel furnace in the MatLab system. This model is intended for further integration into the General model of the furnace power supply system, which also contains a static thyristor compensator. Therefore, the arc furnace is represented as an electrical object described by the corresponding parameters. When modeling, it was taken into account that the movement of electrodes in the furnace bath affects the transients in the overall system. As a result, a model of an arc furnace with an electrode position control system was obtained.

**Ключевые слова:** моделирование в MatLab, дуговая сталеплавильная печь, управление электродами печи.

**Key words:** simulation means MatLab, electric arc furnace, furnace electrode control.

УДК 519.876.5

В металургической промышленности для получения стали распространено применение дуговых сталеплавильных печей (ДСП). К основным достоинствам ДСП относятся возможность гибкого управления процессом плавки и, как следствие, получение сплавов более высокого каче-

ства. В то же время если рассматривать дуговые сталеплавильные печи как потребителя электрической энергии, то можно отметить, что такой электроприёмник существенно ухудшает показатели качества электроэнергии. Поэтому для компенсации негативного влияния ДСП на электрические сети используют статические тиристорные компенсаторы (СТК), в задачи которых входят поддержание необходимого уровня напряжения и коэффициента мощности, уменьшение несимметрии, несинусоидальности и фликера. За многие годы использования СТК хорошо зарекомендовали себя в системах с резкопеременной нагрузкой, к которым относится система энергоснабжения ДСП. Но в современных условиях увеличения требований к качеству технологических процессов практическую значимость имеет разработка новых алгоритмов работы системы управления компенсатором. При этом проведение исследований в реальной системе энергоснабжения не всегда возможно и ведёт к существенным затратам, поэтому актуально использование различных моделей.

Существенно облегчить процесс разработки моделей позволяет использование библиотек блочного моделирования в пакете MatLab. Например, моделирование системы энергоснабжения дуговой печи (см. рис. 1) в результате сводится к выбору соответствующих блоков [6], имитирующих работу реальных устройств (линии электропередачи, трансформаторов, реакторов и т.п.), и позволяет уделить большее внимание режимам работы компенсатора [4; 7] и дуговой сталеплавильной печи.

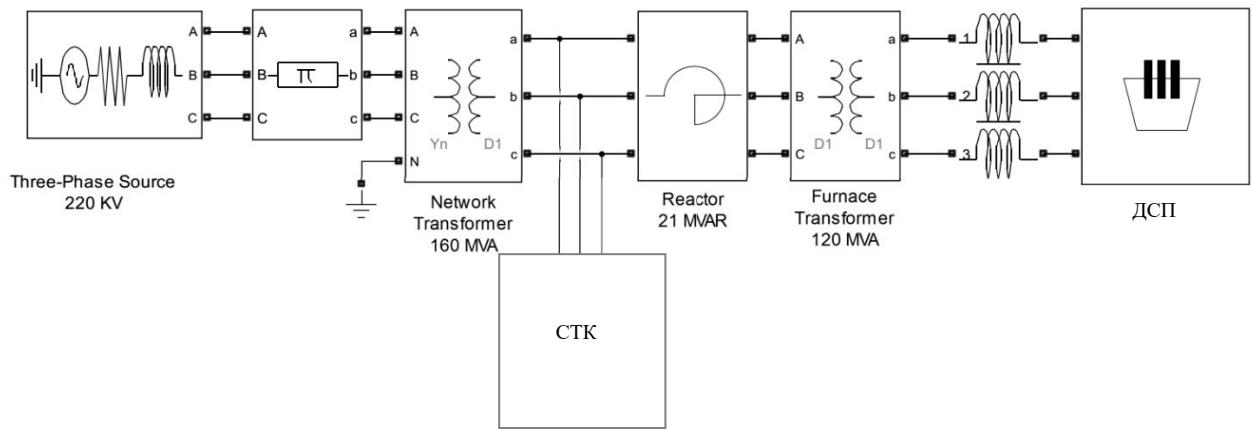


Рис. 1. Модель системы энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи в MatLab

В настоящее время технически невозможно составить модель дуговой печи, в которой будут учтены абсолютно все процессы (тепловые, химические и т.д.), т.к. это существенно увеличит время проведения расчётов и затруднит получение результатов исследований. Поэтому в зависимости от целей исследования принято выделять определённые параметры для моделирования. Для рассматриваемого случая целесообразно тем или иным образом реализовать вольт-амперную характеристику (ВАХ) электрической дуги [1; 3] и описать дуговую печь при помощи электрических параметров: тока дуги  $i_d$  и напряжения дуги  $u_d$ . Кроме того, при составлении модели следует учесть, что для коррекции имеющихся или разработки новых алгоритмов управления СТК важно выделить не только основные режимы работы печи, но и особенности переходов между этими режимами. Также при моделировании следует учитывать, что процессы нестабильного горения электрических дуг и их влияние на качество электроэнергии должны рассматриваться в совокупности с системой управления положением электродов печи, регулирующей длину электрической дуги.

Среди существующих способов моделирования ДСП как электротехнического объекта следует выделить три подхода:

1. моделирование на основе аналитических выражений, например, по уравнению Касси;
2. моделирование динамической ВАХ электрической дуги;

3. моделирование с заданием определённого значения параметра, характеризующего дуговой процесс, из множества возможных.

Первые два подхода, с одной стороны, позволяют получить более точные результаты, т.к. более полно отображают физические процессы, протекающие в печи. С другой стороны, эти подходы ограничивают возможности исследователя задавать изменения, характеризующие влияние реальной печи на систему энергоснабжения в процессе симуляции. В таких моделях также затруднительно оценить влияние системы управления положением электродов.

В качестве примера реализации второго подхода в MatLab можно привести модель вольт-амперной характеристики дуги, составленную по функциональной схеме, показанной на рис. 2. [2]. Кривые ВАХ задаются точками  $\{i_d, u_d\}$ , полученными в результате измерений в реальной системе. Результаты интеграции в модель системы энергоснабжения печи (см. рис. 1) можно увидеть на рис. 3. Кривая мгновенных значений и гармонический состав тока дуги подобны полученным на реальном объекте.

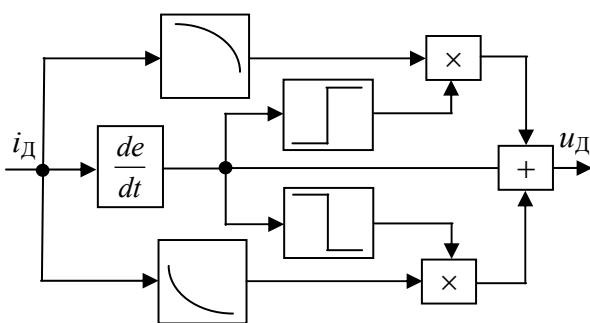


Рис. 2. Схема модели динамической ВАХ электрической дуги

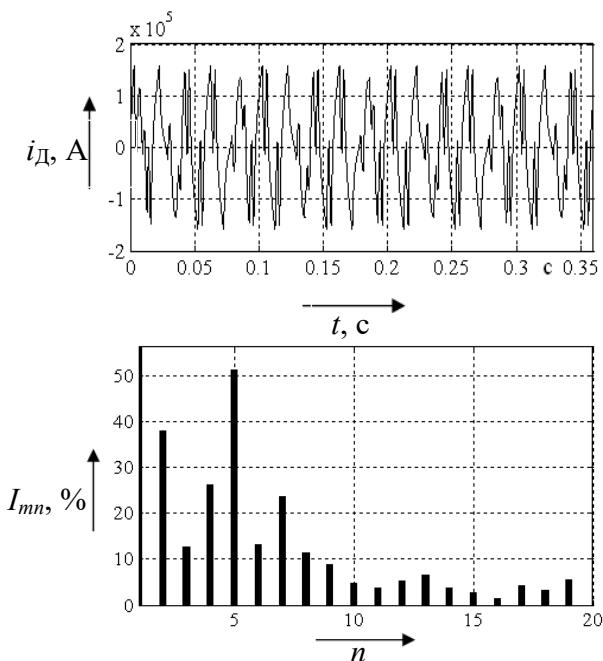


Рис. 3. Ток электрической дуги по модели динамической ВАХ дуги в MatLab

Для реализации третьего подхода удобно использовать электрическую схему замещения дуговой печи, учитывающую электрическое сопротивление дуги  $R_d$  и индуктивность контура печи  $L$  (см. рис. 4). Через величину электрического сопротивления  $R_d$  можно косвенно ввести в модель один из важных параметров: длину электрической дуги  $l_d$ . По формуле Айртона электрическую дугу можно описать как

$$u_d = \alpha + \beta l_d,$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, зависящие от состава газов внутри печи и от материалов электродов. При аналитических расчётах эти коэффициенты рассматриваются как некоторые постоянные величины. Тогда сопротивление дуги  $R_d$  можно определить следующим образом:

$$R_d = \frac{u_d}{i_d} = \frac{\alpha + \beta l_d}{i_d}.$$

Необходимо отметить, что сопротивление дуги  $R_d$  и индуктивность  $L$  являются переменными параметрами. Для моделирования в MatLab разложим сопротивление дуги на составляющие:

$$R_d = R_c + R_v,$$

где  $R_c$  – постоянная составляющая сопротивления дуги;  $R_v$  – переменная составляющая.

Тогда по теореме замещения переменное сопротивление  $R_v$  с напряжением  $u_v$  можно поменять на эквивалентный источник напряжения (см. рис. 5).

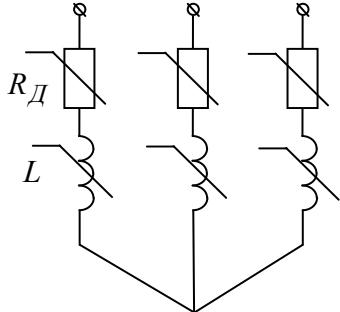


Рис. 4. Электрическая схема замещения дуговой сталеплавильной печи

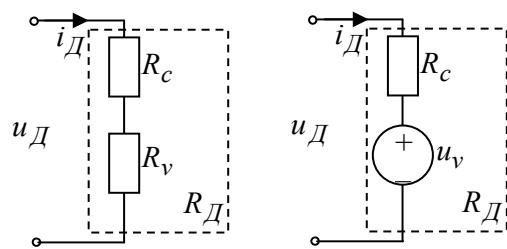


Рис. 5. Эквивалентная схема переменного сопротивления

Если задать  $R_D = kR_c$ , то

$$u_D = i_D R_D = i_D (R_c + R_v) = i_D R_c + u_v = \frac{u_D}{R_D} R_c + u_v = \frac{u_D}{kR_c} R_c + u_v,$$

тогда

$$u_v = \frac{k-1}{k} u_D.$$

Таким образом, при изменении значения  $k$  (задаётся с помощью входного сигнала, см. рис. 6) в модели будет изменяться значение сопротивления  $R_D$ . На рис. 7. показан график тока дуги при одном из значений  $k$ .

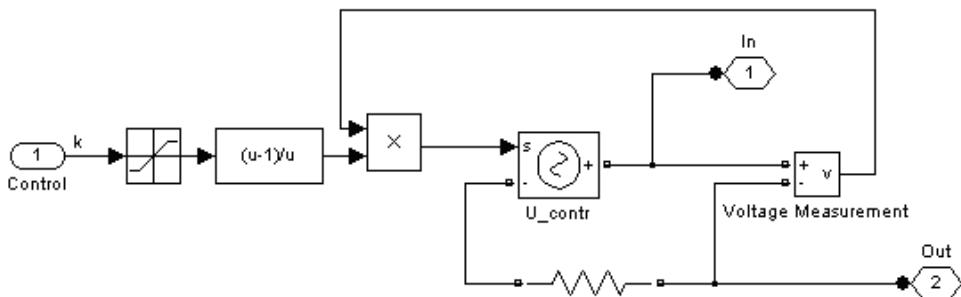


Рис. 6. Модель переменного сопротивления в MatLab

Система управления положением электродов используется для обеспечения стабильного горения электрической дуги. При этом требуется поддерживать большое число параметров в определённых пределах. Часть из них из-за особенностей процесса недоступна для измерения и контроля. В то же время эти параметры связаны между собой, и изменение одного из них приводит к изменениям остальных. Поэтому в качестве регулируемого параметра используют доступный для измерения сигнал напряжения на низкой стороне печного трансформатора. Для поддержания уровня напряжения, необходимого для оптимальной работы печи, регулятор вырабатывает сигнал, влияющий на перемещение электрода по вертикали. Перемещение электрода изменяет длину дуги  $l_D$  и, соответственно, изменяет напряжение  $u_D$  и ток  $i_D$  дуги. В имитационной модели эти изменения обусловлены изменением сопротивления дуги  $R_D$  (см. рис. 8).

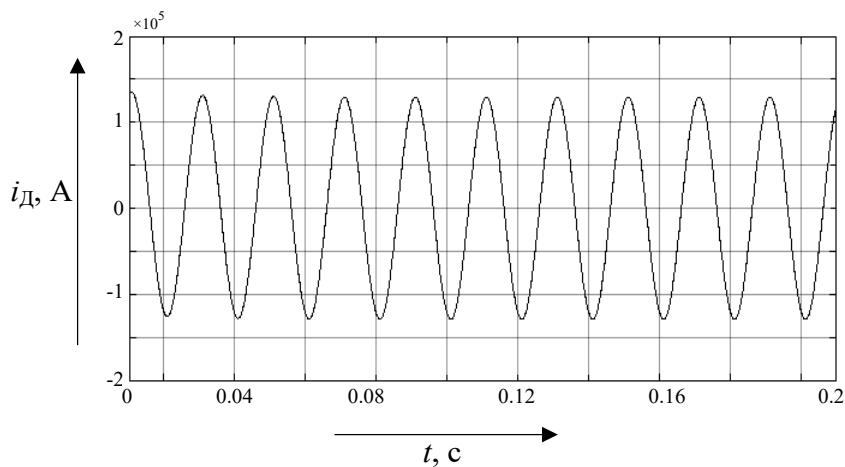


Рис. 7. График тока электрической дуги

Для рассматриваемой системы сложно получить полное математическое описание из-за наличия нелинейных элементов. Поэтому настройка ПИ-регулятора осуществлялась так называемым инженерным методом с поиском оптимальных параметров регулятора. В процессе настройки выяснилось, что интегральная составляющая регулятора не зависит от изменения режима печи, её оптимальное значение  $k_i = 25$ . Пропорциональная составляющая регулятора является изменяемой величиной, её значение зависит от величины возмущающего сигнала  $R_{\text{д.возм}}$  и величины  $R_{\text{д}}$ , которую необходимо получить в результате регулирования. Для областей, соответствующих средним и малым мощностям печи, зависимость носит линейный характер.

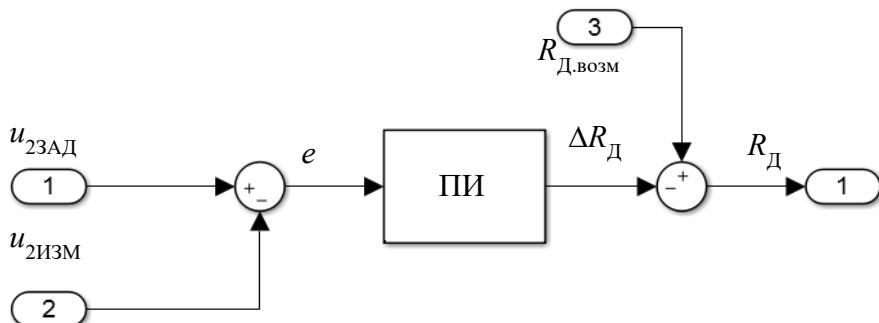


Рис. 8. Имитационная модель системы управления положением электродов в MatLab

На рис. 9 приведены результаты измерения напряжения трансформатора  $u_2$  при имитации работы печи на максимальной мощности. Этому режиму соответствует напряжение  $u_2 = 816$  В. Но влияние возмущения приводит к тому, что печь практически перестаёт потреблять энергию и напряжение  $u_2$  (см. рис. 9, а) соответствует напряжению холостого хода трансформатора. В результате включения системы управления положением электродов удаётся вывести значение  $u_2$  на необходимый уровень (см. рис. 9, б).

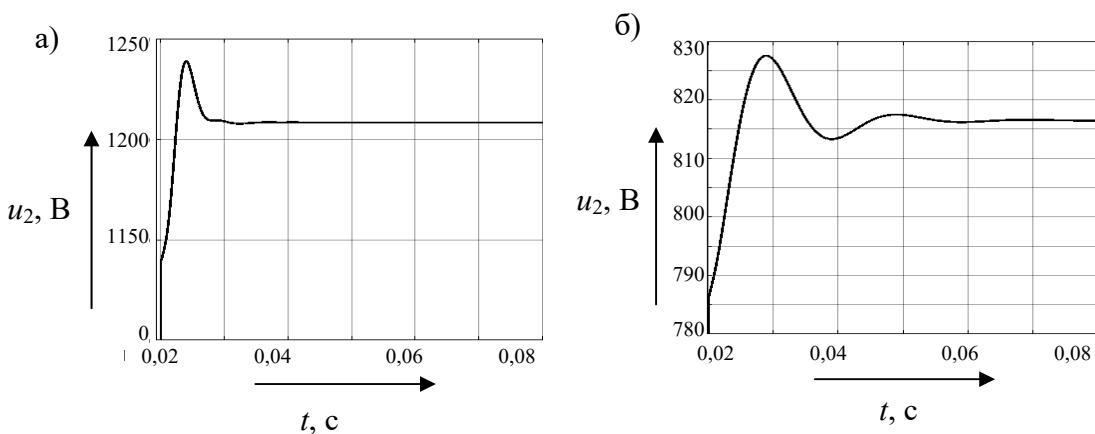


Рис. 9. Результаты работы системы управления положением электродов:  
а – без регулятора; б – с ПИ-регулятором

Система управления положением электродов позволяет достаточно быстро отработать возмущение  $R_{\text{д.возм}}$ . В то же время система управления СТК успевает оценить искажение кривых тока и напряжения и, соответственно, выработать управляющий сигнал на включение ёмкостных фильтров и тиристорно-реакторной группы. Тогда после устранения возмущения системой управления положением электродов происходит очередное переключение фильтров СТК. Очевидно, что такие переключения приводят к дополнительным переходным процессам и вносят свои искажения в работу энергосистемы. Рассмотренная модель дуговой печи позволяет проанализировать влияние на энергосистему самого возмущения  $R_{\text{д.возм}}$  и его отработки и, как следствие, учесть их при составлении алгоритмов работы СТК.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров, А. В. Расчёт мощности и параметров электросталеплавильных печей: учеб. пособие для вузов / А. В. Егоров. – М.: МИСИС, 2000. – 272 с.
2. Моделирование электрического контура дуговой печи / Г. П. Корнилов, А. Ю. Мещеряков, А. А. Николаев, Т. Р. Храмшин, И. А. Якимов. – Магнитогорск: ГОУВПО «МГТУ им. Г. И. Носова», 2006. – С. 210-217.
3. Марков, Н. А. Электрические цепи и режимы дуговых электропечных установок / Н. А. Марков. – М.: Энергия, 1975. – 840 с.
4. Соловьев, В. А. Моделирование статического тиристорного компенсатора в системе энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, А. В. Купова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2014. – Т. 14. – № 2. – С. 23-28.
5. Фомин, А. В. Построение имитационной модели дуговой сталеплавильной печи / А. В. Фомин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2009. – № 3. – С. 322-330.
6. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SymPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
7. Pierre Giroux, Gibert Sybille. SVC (Detailed Model) Mathworks USA, 1994-2017 [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.mathworks.com/examples/simpower/mw/sps\\_product-power\\_svc\\_1tcr3tsc-svc-detailed-model](http://www.mathworks.com/examples/simpower/mw/sps_product-power_svc_1tcr3tsc-svc-detailed-model) (дата обращения: 18.08.2017).



Ким К.И., Ким К.К.  
Kim K.I., Kim K.K.

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ РОТОРА АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ НА ХАРАКТЕР ПРОТЕКАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ INFLUENCE OF ROTOR SPEED OF ASYNCHRONOUS MACHINE ON THE NATURE OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC PROCESSES

Ким Константин Иванович – д. т. н., профессор, адрес: Россия, 190031 Московский проспект, дом 9, тел. 8 903 096 5770. E-mail: [kimkk@inbox.ru](mailto:kimkk@inbox.ru)

Konstantin I. Kim - Dr. Sc., professor, address: house 9, Moskovsky Av. Sankt-Petersburg, Russia.  
E-mail: [kimkk@inbox.ru](mailto:kimkk@inbox.ru)

Ким Константин Константинович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения», адрес: Россия, 190031 Московский проспект, дом 9, тел. 8 903 096 5770. E-mail: [kimkk@inbox.ru](mailto:kimkk@inbox.ru)  
Konstantin K. Kim - Dr. Sc., professor, Trinity College, Cambridge University, Great Britain. Professor, Dr.habil.ing.; member of IEEE, NYAS, EANS Head of Department " Electrical and heat engineering" Sankt-Petersburg State Transport University, address: house 9, Moskovsky Av. Sankt-Petersburg, Russia.  
E-mail: [kimkk@inbox.ru](mailto:kimkk@inbox.ru)

**Аннотация.** В статье рассматриваются основы теории переходных электромагнитных процессов в асинхронных машинах. Приведены основные аналитические выражения, позволяющие оценивать влияние скорости ротора асинхронной машины на характер их протекания. Проведен анализ существующих подходов применительно к поставленной задаче. Обоснованы допущения и параметры, определяющие электромагнитные постоянные и динамические характеристики электромеханических преобразователей переменного тока в двигательных режимах работы. Определена задача исследования на физическом и аналитическом уровнях, которая решена с учетом вариации определяющих параметров с использованием теории обобщенного электромеханического преобразователя энергии. Показано, что коэффициенты затухания и их частоты, характеризующие результирующий ток, состоящий из тока стационарного режима и двух затухающих составляющих, зависят от параметров машины и мгновенного значения скорости. Приведены кривые изменения коэффициентов затухания в зависимости от скорости асинхронной машины.

**Summary.** The article deals with the basics of the theory of transient electromagnetic processes in asynchronous machines. The basic analytical expressions allowing to estimate influence of speed of a rotor of the asynchronous machine on character of their course are resulted. The analysis of existing approaches in relation to the task is carried out. The assumptions and parameters determining the electromagnetic constants and dynamic characteristics of Electromechanical AC converters in motor operating modes are substantiated. The problem of research at the physical and analytical levels is determined, which is solved taking into account the variation of the determining parameters using the theory of a generalized Electromechanical energy Converter. It is shown that the damping coefficients and their frequencies characterizing the resulting current consisting of a steady-state current and two damping components depend on the parameters of the machine and the instantaneous speed value. The curves of the damping coefficients change depending on the speed of the asynchronous machine are given.

**Ключевые слова:** переходные электромагнитные процессы, асинхронная машина, изменение скорости.

**Key words:** transient electromagnetic processes, asynchronous machine, speed change.

УДК 621.313

**Введение.** В практических расчетах переходных процессов в электроприводах с асинхронной машиной, при необходимости определения движения ротора, пользуются общезвестным соотношением для вращающих моментов, предложенным М. Клоссом.

Применение этой формулы, давая удовлетворительные результаты во многих практических задачах, оказывается, однако, недопустимым в ряде особых случаев. Сюда относятся режимы, при которых вследствие вмешательства сторонних факторов и ввиду специфических особенностей, присущих данной системе (относительно малый маховой момент, большие постоянные времени обмоток), скорость вращения ротора подвергается резкому изменению, а возникающие при этом свободные токи затухают относительно медленно. В таких режимах как фазовое соотношение между статорным и роторным токами, так и значения последних в существенной мере могут отступать от результатов, полученных помошью формул стационарного режима. Не менее значительные расхождения возможны между действительными и подсчитанными на основе формулы Клосса значениями моментов, так что в подобных случаях применение указанной формулы может давать лишь весьма приближенное решение для скорости. В таких режимах не только нельзя пре-небречь изменением скорости, но наоборот, это изменение играет принципиальную роль. В связи с этим возникают имеющие существенный практический интерес такие вопросы, как например, влияние изменения скорости на характер протекания переходных электромагнитных процессов и, наоборот, влияние последних на динамику асинхронной машины. Эти вопросы не только фактически, но и в принципе составляют две стороны единой задачи, а возникающие в указанных режимах явления подчиняются системе нелинейных дифференциальных уравнений, включающих в качестве переменных токи и скорость ротора. Среди последних характеристика скорости занимает особое место, а вопрос об ее определении имеет не только самостоятельное, но и прикладное значение. Достаточно подчеркнуть, что даже в тех случаях, когда каким-нибудь образом удается найти решения для токов и вращающих моментов, расчет их возможен лишь при известной характеристике скорости. Между тем, при наличии значительного количества методов расчета характеристики скорости при стационарном режиме, вопрос о таковых в переходных режимах, когда возникает необходимость учета ускорения ротора, остается мало изученным. В некоторых литературных источниках, посвященных анализу указанных режимов [1-9], основное внимание уделяется вопросам определения переходных токов и вращающих моментов, причем характеристика скорости предполагается заранее известной. Среди этих работ особенного внимания заслуживают исследования Е. Я. Казовского [10] и В. А. Шубенко [11]. Однако, при несомненной ценности полученных ими результатов, использование их при практических расчетах, в силу указанной причины, встречает значительные трудности.

В связи с этим анализ методов расчета характеристики скорости в указанных режимах представляется актуальным, а разработка практических способов ее расчета - весьма целесообразной.

Не менее интересным является также вопрос, каким образом определить максимальное значение ускорения, при котором динамические характеристики машины практически не отличаются от статических. Постановка этого вопроса вызывается необходимостью выяснения целесообразности учета изменения скорости прежде, чем перейти к непосредственным расчетам характеристик (токов, вращающих моментов и др.). Это тем более важно, что расчеты последних с учетом и без учета ускорения представляют задачи различной степени трудности.

В силу изложенных обстоятельств, в настоящей статье основное внимание уделено вопросам определения указанного ускорения и характеристики скорости ротора. Определение других величин, также характеризующих свойства машины в режимах, связанных с резким изменением скольжения, рассматривается как частный вопрос общей задачи расчета характеристики скорости. Такое рассмотрение позволяет получить решения в удобной для практического и теоретического использования форме.

В дальнейшем при анализе этих вопросов принимается, что изменение скольжения происходит в области  $0 < s < 1$  (двигательный режим).

Этот диапазон включает большинство практически существующих режимов указанного рода: разгон двигателя при пуске, внезапное приложение механической нагрузки, резкое торможение и режимы, требующие точного поддержания скорости.

Однако некоторые из полученных результатов могут найти применение не только при анализе указанных режимов, но и в других случаях, когда учет ускорения ротора практически может быть оправдан.

**Основные уравнения переходных процессов асинхронной машины.** Для решения поставленной задачи необходимо исходить из общих дифференциальных уравнений переходного процесса, включающих в качестве одной из переменных скорость ротора. Эти уравнения, также как и дифференциальные уравнения синхронной машины [12], могут быть получены на основе закона сохранения энергии путем последовательного применения законов Кирхгофа к контурам машины.

Для трехфазной асинхронной машины предполагаются выполненные следующие условия:

- ротор имеет магнитную симметрию, т.е. самоиндукция любой обмотки не зависит от положения ротора, а коэффициент взаимной индукции между любыми фазными обмотками статора и ротора является косинусоидальной функцией угла между осями обеих обмоток;

- потокосцепления отдельных контуров машины имеют линейную зависимость от протекающих по ним токов;

- электрическая нейтраль машины изолирована;

- ротор имеет одну обмотку.

На рис.1 лучи 0A, 0B, 0C отображают магнитные оси фазных обмоток. Ось 0 $\alpha$  совпадает с осью фазы 0A статора, ось 0 $\beta$  сдвинута относительно нее на 90 эл. град, в пространстве. За положительное направление вращения ротора принимаем вращение по часовой стрелке.

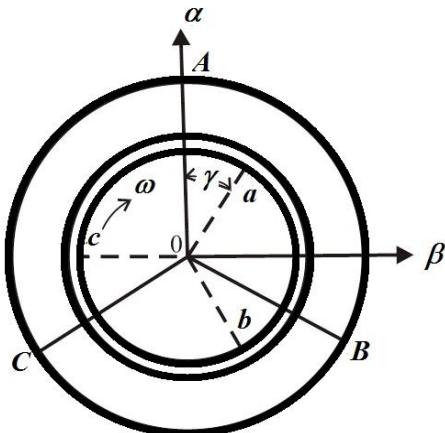


Рис. 1

Уравнения падений напряжения в фазных обмотках будут:

$$u_n = r_1 i_n + \frac{d}{dt} \Psi_n , \quad (1.1a)$$

где  $n = A, B, C$ .

$$u_k = r_2 i_k + \frac{d}{dt} \Psi_k , \quad (1.1b)$$

где  $k = a, b, c$ .

Потокосцепления

$$\begin{aligned} \Psi_A &= l_1 i_A + m_1 (i_B + i_C) + m_{12} [i_a \cos \gamma + i_b \cos(\gamma + 120) + i_c \cos(\gamma - 120)], \\ \Psi_B &= l_1 i_B + m_1 (i_C + i_A) + m_{12} [i_b \cos \gamma + i_c \cos(\gamma + 120) + i_a \cos(\gamma - 120)], \\ \Psi_C &= l_1 i_C + m_1 (i_A + i_B) + m_{12} [i_c \cos \gamma + i_a \cos(\gamma + 120) + i_b \cos(\gamma - 120)], \end{aligned} \quad (1.2)$$

где  $l_1, l_2$  - коэффициенты самоиндукции фазных обмоток статора и ротора соответственно;  $m_1, m_2$  - коэффициенты взаимной индукции между фазными обмотками;  $m_{12}, m_{21}$  - коэффициенты взаимной индукции между фазными обмотками статора и ротора, когда оси их совпадают.

Преобразовать выражения напряжений, токов и потокосцеплений трехфазной системы к системе осей  $\alpha$  и  $\beta$ , неподвижно связанных со статором, можно посредством следующих выражений.

Для статора:

$$\begin{aligned} X_{\alpha_1} &= \frac{2}{3} [X_A - \frac{1}{2} (X_B + X_C)], \\ X_{\beta_1} &= \frac{1}{\sqrt{3}} [X_B - X_C], \\ X_{01} &= \frac{1}{3} [X_A + X_B + X_C]. \end{aligned} \quad (1.3a)$$

Для ротора:

$$\begin{aligned} X_{\alpha_2} &= \frac{2}{3} [X_a \cos \gamma + X_b \cos(\gamma + 120) + X_c \cos(\gamma - 120)], \\ X_{\beta_2} &= \frac{2}{3} [X_a \sin \gamma + X_b \sin(\gamma + 120) + X_c \sin(\gamma - 120)], \\ X_{02} &= \frac{1}{3} [X_a + X_b + X_c]. \end{aligned} \quad (1.3b)$$

Здесь:  $X = u, i, \Psi$ .

Уравнения падений напряжения в новой системе будут:

$$u_{\alpha_1} = r_1 i_{\alpha_1} + \frac{d}{dt} \Psi_{\alpha_1}, \quad u_{\beta_1} = r_1 i_{\beta_1} + \frac{d}{dt} \Psi_{\beta_1}, \quad (1.4a)$$

$$u_{\alpha_2} = r_2 i_{\alpha_2} + \frac{d}{dt} \Psi_{\alpha_2}, \quad u_{\beta_2} = r_2 i_{\beta_2} + \frac{d}{dt} \Psi_{\beta_2}. \quad (1.4b)$$

Подставляя в них выражения для потокосцеплений, найденных по соотношениям (1.2) и (1.3), и произведя некоторые преобразования, можно получить:

$$\begin{aligned} u_{\alpha_1} &= r_1 i_{\alpha_1} + L_1 \frac{d}{dt} i_{\alpha_1} + L_{12} \frac{d}{dt} i_{\alpha_2}, \quad u_{\beta_1} = r_1 i_{\beta_1} + L_1 \frac{d}{dt} i_{\beta_1} + L_{12} \frac{d}{dt} i_{\beta_2}, \\ u_{\alpha_2} &= r_2 i_{\alpha_2} + L_2 \frac{d}{dt} i_{\alpha_2} + L_{12} \frac{d}{dt} i_{\alpha_1} + L_2 \omega i_{\beta_2} + L_{12} \omega i_{\beta_1}, \\ u_{\beta_2} &= r_2 i_{\beta_2} + L_2 \frac{d}{dt} i_{\beta_2} + L_{12} \frac{d}{dt} i_{\beta_1} - L_2 \omega i_{\alpha_2} - L_{12} \omega i_{\alpha_1} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Здесь:  $L_1 = l_1 - m_1$ ,  $L_2 = l_2 - m_2$  – эквивалентные коэффициенты самоиндукции трехфазной системы статора и ротора соответственно;  $L_{12} = \frac{3}{2} m_{12}$  – эквивалентный коэффициент взаимной индукции трехфазной системы;  $\omega = \frac{d}{dt} \gamma$  – скорость вращения ротора.

С точки зрения динамики асинхронная машина представляет систему, состояние которой может быть вполне определено значениями пяти переменных, заданных, как функции времени. Здесь и в дальнейшем нулевая точка обмоток предполагается изолированной, поэтому систему (1.5) необходимо дополнить еще одним уравнением, а именно уравнением равновесия моментов системы; т.е.

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.6)$$

Известно, что вращающий момент машины определяется как производная электромагнитной энергии по углу между осями одноименных фаз обмоток, т. е.

$$M = \frac{\partial T}{\partial \gamma}, \quad (1.7)$$

где  $T = \frac{1}{2} \sum \Psi_n i_n$ .

Так как

$$T = \frac{3}{2} [L_1 (i_{\alpha 1}^2 + i_{\beta 1}^2) + L_2 (i_{\alpha 2}^2 + i_{\beta 2}^2) + 2L_{12} (i_{\alpha 1} i_{\alpha 2} + i_{\beta 1} i_{\beta 2})], \quad (1.8)$$

то

$$M = \frac{3}{2} L_{12} [i_{\alpha 2} i_{\beta 1} - i_{\alpha 1} i_{\beta 2}]. \quad (1.9)$$

Тогда уравнение (1.6) можно переписать в виде:

$$\frac{3}{2} L_{12} [i_{\alpha 2} i_{\beta 1} - i_{\alpha 1} i_{\beta 2}] = M_c + J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.10)$$

При переходе к системе относительных единиц в качестве базисных принимаются:



- для напряжения: амплитудное значение напряжения в номинальном режиме ( $U_{m_1}$ );
- для тока: амплитудное значение статорного тока в номинальном режиме ( $J_{m_1}$ );
- для сопротивления: величина, равная  $\frac{U_{m_1}}{J_{m_1}}$ ;
- для мощности:  $\frac{3}{2} U_{m_1} J_{m_1}$ ;
- для моментов:  $\frac{3}{2} \frac{U_{m_1} J_{m_1}}{\omega_s}$ ;
- для скорости: синхронная скорость ( $\omega_S$ );
- для времени: синхронная секунда ( $\frac{c}{\omega_S}$ ).

Тогда во введенной системе относительных единиц уравнения (1.5) и (1.10) примут следующий вид:

$$\begin{aligned} u_{\alpha_1} &= r_1 i_{\alpha_1} + x_1 \frac{di_{\alpha_1}}{dt} + x_{12} \frac{di_{\beta_2}}{dt}, \\ u_{\beta_1} &= r_1 i_{\beta_1} + x_1 \frac{di_{\beta_1}}{dt} + x_{12} \frac{di_{\alpha_2}}{dt}, \\ u_{\alpha_2} &= r_2 i_{\alpha_2} + x_2 \frac{di_{\alpha_2}}{dt} + x_{12} \frac{di_{\alpha_1}}{dt} + \omega x_2 i_{\beta_2} + \omega x_{12} i_{\beta_1}, \\ u_{\beta_2} &= r_2 i_{\beta_2} + x_2 \frac{di_{\beta_2}}{dt} + x_{12} \frac{di_{\beta_1}}{dt} - \omega x_2 i_{\alpha_2} - \omega x_{12} i_{\alpha_1}, \\ x_{12} [i_{\alpha_2} i_{\beta_1} - i_{\alpha_1} i_{\beta_2}] &= M_c + H \frac{d\omega}{dt}. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Здесь  $H = \frac{j\omega_s^2}{\frac{3}{2} U_{m_1} J_{m_1}}$  - инерционная постоянная системы, выраженная в секундах.

Уравнения (1.11) целесообразно подвергнуть дальнейшему преобразованию. Известно, что фазовые токи образуют пульсирующие во времени намагничивающие силы. Пространственное распределение последних, при симметрично выполненной обмотке, можно считать периодическим. Принимая во внимание только основную гармонику в разложении их, можно представить эти намагничивающие силы в виде неподвижных в пространстве векторов, смешенных друг относительно друга на углы, равные сдвигам осей соответствующих фазных обмоток. Очевидно, геометрическая сумма этих векторов даст результирующую намагничивающую силу обмотки, как по величине, так и по положению. Это однозначное соответствие между суммарным значением векторов фазовых токов и результирующей намагничивающей силой целесообразно представить в комплексной форме, как это сделано в работах Щедрина Н.Н., Кантора Р.М. и Казовского Е.Я. [10].

В данном случае оно запишется следующим образом:

$$\bar{i}_1 = i_{\alpha_1} + i_{\beta_1} e^{j\frac{\pi}{2}}, \quad \bar{i}_2 = i_{\alpha_2} + i_{\beta_2} e^{j\frac{\pi}{2}}. \quad (1.12a)$$

Относя аналогичные представления и к напряжениям, т.е. считая

$$\bar{u}_1 = u_{\alpha_1} + u_{\beta_1} e^{j\frac{\pi}{2}}, \quad \bar{u}_2 = u_{\alpha_2} + u_{\beta_2} e^{j\frac{\pi}{2}}. \quad (1.12b)$$

и вводя понятия обобщенных векторов тока и напряжения для величин  $\bar{i}$  и  $\bar{u}$  соответственно, можно уравнения (1.11) преобразовать в следующие:

$$\begin{aligned} \bar{u}_1 &= r_1 \bar{i}_1 + x_1 \frac{d\bar{i}_1}{dt} + x_{12} \frac{d\bar{i}_2}{dt}, \\ \bar{u}_2 &= r_2 \bar{i}_2 + x_2 \frac{d\bar{i}_2}{dt} + x_{12} \frac{d\bar{i}_1}{dt} - j\omega x_2 \bar{i}_2 - j\omega x_{12} \bar{i}_1, \\ \frac{jx_{12}}{2} (\bar{i}_2 \hat{i}_1 - \hat{i}_2 \bar{i}_1) &= M_c + H \frac{d\omega}{dt}. \end{aligned} \quad (1.13)$$

Полученные уравнения представляют собой дифференциальные уравнения переходных процессов идеализированной асинхронной машины. Допущения, принятые при составлении этих уравнений, практически не только неискажают действительную картину явлений, но вместе с тем позволяют наглядно ее представить и получить при рассмотрении ряда задач количественные связи, пригодные для практических расчетов.

Необходимо заметить, что аналогичные уравнения отличным от изложенного способом были получены независимо друг от друга Н.Н. Щедриным и Р.М. Кантором.

Применение указанных уравнений (1.13) в непосредственном их виде представляет некоторые неудобства. Поэтому их можно преобразовать, вводя в рассмотрение следующие постоянные величины:

$$\sigma = 1 - \frac{x_{12}^2}{x_1 x_2} \text{ - коэффициент рассеяния Блонделя;}$$

$$x'_1 = x\sigma \text{ - переходный реактанс;}$$

$$\rho_1 = \frac{r_1}{x'_1} \text{ - коэффициент затухания статорной обмотки при замкнутой роторной;}$$

$$\rho_2 = \frac{r^2}{x^2 \sigma} \text{ - коэффициент затухания роторной обмотки при замкнутой статорной.}$$

Тогда положив  $\bar{I}_2 = 0$ , что означает замкнутость роторной обмотки, можно получить

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{I}_1}{dt} - \frac{x_{12}}{x'_1} (\rho_2 \sigma - j\omega) \bar{I}_1 + \frac{1}{\sigma} [\rho_1 + j(1 - \sigma)\omega] \bar{I}_1 &= \frac{\bar{U}_1}{x'_1}, \\ \frac{d\bar{I}_2}{dt} + \frac{1}{\sigma} (\rho_2 \sigma - j\omega) \bar{I}_2 - \frac{x_{12}}{x_2 \sigma} (\rho_1 \sigma + j\omega) \bar{I}_1 &= -\frac{(1-\sigma)}{x_{12} \sigma} \bar{U}_1, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{jx_{12}}{2H} (\bar{I}_2 \hat{I}_1 - \hat{I}_2 \bar{I}_1) - \frac{M_c}{H}. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Преобразованная система уравнений принципиально не отличается от системы (1.13), однако пользоваться ею более удобно.

**Теоретические основы явлений, возникающих при изменении скорости ротора.** Прежде, чем перейти к непосредственному рассмотрению приведенных выше уравнений (1.14), необходимо установить некоторые предварительные соотношения на основе простейшей интерпретации явлений, возникающих при изменении скорости ротора. Такое рассмотрение позволяет также выяснить физические стороны этих процессов.

Рассматривая первые два уравнения системы (1.14) предполагается, что зависимость скорости от времени известна. Заменяя действительную кривую скорости ступенчатой, нетрудно получить решение для токов. Последнее для интервала «n» может быть представлено следующим образом

$$\begin{aligned} \bar{I}_{kn} &= -\frac{[\alpha_{2n}\bar{I}_{k(n-1)} - \frac{d}{dt}\bar{I}_{k(n-1)}]t=\Delta t_{(n-1)} - (\alpha_{2n}-j)\mathcal{J}_{kn}}{\alpha_{1n}-\alpha_{2n}} e^{\alpha_{1n}t} + \\ &+ \frac{[\alpha_{1n}\bar{I}_{k(n-1)} - \frac{d}{dt}\bar{I}_{k(n-1)}]t=\Delta t_{(n-1)} - (\alpha_{1n}-j)\mathcal{J}_{kn}}{\alpha_{1n}-\alpha_{2n}} e^{\alpha_{2n}t} + \mathcal{J}_{kn} e^{jt}. \end{aligned} \quad (1.15)$$

Здесь:  $k=1, 2$  (причем индекс «1» - относится к статору, индекс "2" - к ротору).

$$\begin{aligned} \alpha_{1n} &= -\rho_{y_{1n}} + jv_{1n} = -\frac{\rho_1 + \rho_2 - j\omega_n}{2} - \sqrt{\left(\frac{\rho_1 + \rho_2 - j\omega_n}{2}\right)^2 - \rho_1(\rho_2 \sigma - j\omega_n)}, \\ \alpha_{2n} &= -\rho_{y_{2n}} + jv_{2n} = -\frac{\rho_1 + \rho_2 - j\omega_n}{2} + \sqrt{\left(\frac{\rho_1 + \rho_2 - j\omega_n}{2}\right)^2 - \rho_1(\rho_1 \sigma - j\omega_n)}, \\ \mathcal{J}_{1n} &= \frac{U_{m1}}{x'_1} \frac{\rho_2 \sigma + jS_n}{(j-\alpha_{1n})(j-\alpha_{2n})}; \quad \mathcal{J}_{2n} = \frac{U_{m1}}{jx_{12} \sigma} \frac{(1-\sigma)S_n}{(j-\alpha_{1n})(j-\alpha_{2n})}. \end{aligned}$$

Из приведенного выражения видно, что результирующий ток, кроме тока стационарного режима, содержит две затухающие составляющие (свободный ток). При этом как коэффициенты затухания, так и частоты последних зависят от параметров машины и мгновенного значения скорости. На рис. 2 и 3 представлены кривые изменения этих величин в зависимости от изменения скорости для асинхронной машины АТ-198 1024 со следующими паспортными данными и параметрами (параметры даны в относительных единицах):

$P=1000$  кВт;  $U_1 = 600$  В;  $I_1 = 136$  А;  $U_2 = 560$  В;  $I_2 = 1100$  А;  $n_c = 250$  об/мин;  $s_n = 1,6\%$ ;  $gD^2 = 9,59$  тм<sup>2</sup>;  $r_1 = r_2 = 0,0194$ ;  $x_{1\sigma} = x_{2\sigma} = 0,114$ ;  $x_{12} = 2,04$ ;  $\sigma = 0,1$ .

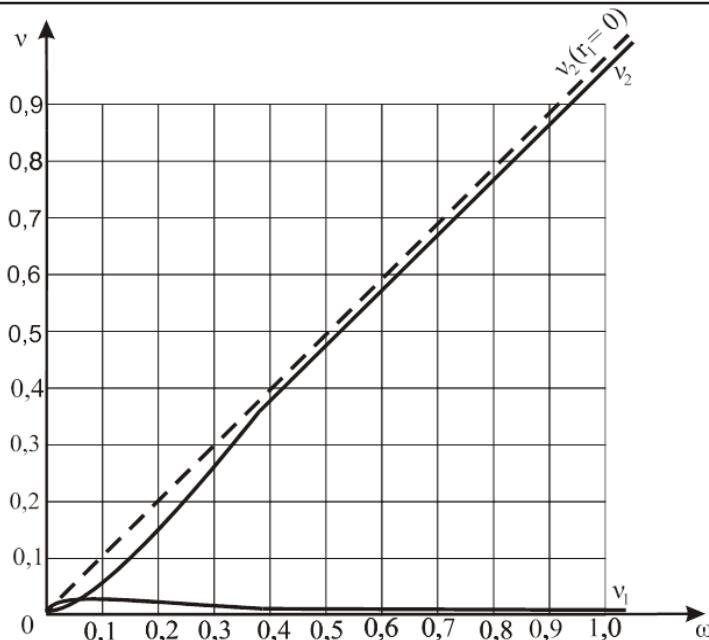


Рис. 2

Из представленных кривых видно, что с изменением скорости коэффициенты затухания и частоты свободных токов, в особенности величина  $v_2$  претерпевают существенные изменения. Причем частота  $v_1$  весьма незначительна, тогда как другая частота  $v_2$  имеет большую величину, весьма близкую к мгновенному значению скорости. В этом отношении за составляющими свободных токов можно сохранить терминологию классической теории переходных процессов асинхронной машины при постоянстве скорости, а именно: за составляющей с частотой  $v_1$  - апериодическая, за составляющей с частотой  $v_2$  - периодическая.

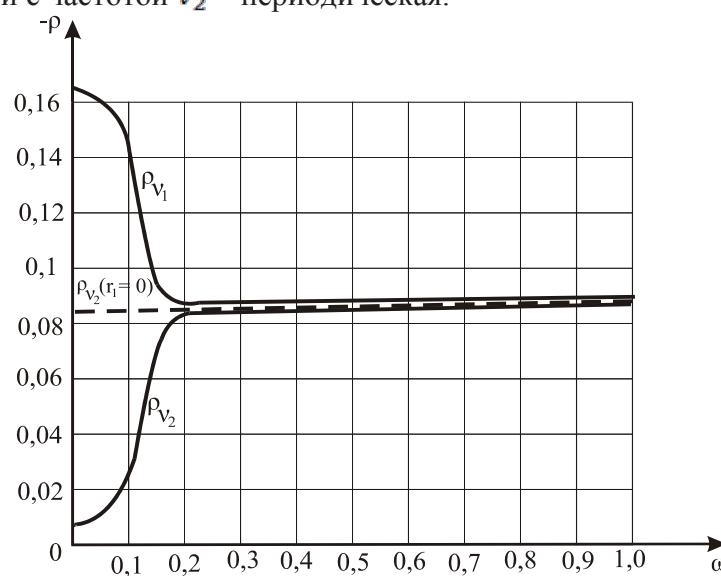


Рис. 3

Необходимо заметить, что выражение (1.15) при  $k=2$  дает роторный ток. В соответствии с уравнениями (1.14) это выражение описывает роторные явления в координатах, неподвижно связанных со статором. Таким образом, в действительности в роторе будут наблюдаться следующие частоты:  $v_1 - \omega$ ,  $v_2 - \omega$ ,  $s$ .

Иными словами, апериодической составляющей статорного тока соответствует периодическая составляющая роторного тока с частотой  $v_1 - \omega$ , а ответной реакцией периодической состав-

ляющей свободных токов статора является апериодическая составляющая тока ротора с частотой  $v_2 - \omega$ .

Так как с изменением скорости изменяются величины  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , то амплитудное значение отдельных слагающих токов будет зависеть от мгновенного значения скорости. При этом очевидно, что изменение тока основной частоты будет происходить по общеизвестной круговой диаграмме. Для приближенной оценки других составляющих обратимся к выражению (1.15). Последнее соответствует случаю, когда начальные условия в интервале «n» определяются не только установившимся током, но и величиной затухающих составляющих в конце интервала (n-1).

Предположив, что эти составляющие в указанный момент времени равны нулю. Тогда соотношение (1.15) примет следующий вид:

$$\bar{I}_{kn} = \left[ \frac{\alpha_{2n-j}}{\alpha_{1n}-\alpha_{2n}} e^{\alpha_{1n}t} - \frac{\alpha_{1n-j}}{\alpha_{1n}-\alpha_{2n}} e^{\alpha_{2n}t} \right] \Delta I_{kn} + I_{kn} e^{jt}, \quad (1.16)$$

где  $\Delta I_{kn} = I_{kn} - I_{k(n-1)}$ .

Из полученного выражения вытекает совершенно очевидное следствие, что величины свободных токов зависят от разности установившихся токов.

Так как

$$I_{1n} = \frac{U_{m1}}{jx'_1 (\rho_2 + S_n \rho_1) + jS_n} e^{\alpha_{1n}t}, \quad I_{2n} = -\frac{(1-\sigma)U_{m1}}{x_{12}\sigma (\rho_2 + S_n \rho_1) + jS_n} e^{\alpha_{2n}t},$$

а коэффициенты затухания весьма незначительны, то указанная разность будет тем меньше, чем больше скольжение в интервалах n и (n-1) при прочих равных условиях. Иными словами наибольшие отклонения действительных значений токов от токов стационарного режима, следует ожидать в зоне больших скоростей. При этом величина скольжения, при которой свободные токи достигают максимального значения, зависит от коэффициентов  $\rho_1$  и, главным образом, от  $\rho_2$ .

Сравнение выражений для свободных токов (первые два члена в соотношении (1.16)), показывает, что в зоне больших скоростей периодическая составляющая имеет значительно большую величину, чем апериодическая. Так, например, при скольжениях, равных 0,2; 0,1 и 0 отношение этих величин для указанной машины соответственно составляет 0,25; 0,156 и 0,09.

В тех случаях, когда процесс описывается выражением (1.15), свободные токи в любых из интервалов имеют большую величину, чем в предыдущем случае. При этом апериодическая составляющая приближенно равна:

$$\frac{(\alpha_{2n-j})\Delta I_{kn} + [(\alpha_{2(n-1)-j})\Delta I_{kn-1} e^{\alpha_{1(n-1)}t}]_{t=\Delta t_{n-1}+\dots}}{\alpha_{1n}-\alpha_{2n}} e^{\alpha_{1n}t},$$

периодическая составляющая:

$$- \frac{(\alpha_{1n-j})\Delta I_{kn} + [(\alpha_{1(n-1)-j})\Delta I_{kn-1} e^{\alpha_{2(n-1)}t}]_{t=\Delta t_{n-1}+\dots}}{\alpha_{1n}-\alpha_{2n}} e^{\alpha_{2n}t}.$$

Так как  $\alpha_{2n} \gg \alpha_{1n}$ , то последняя из указанных составляющих, как и в рассмотренном выше случае, будет больше первой.

Необходимо заметить, что если в интервале (n+1) ток определяется уравнением (1.16), то в интервале (n) при условии, что  $\Delta t_n$  достаточно мало, имеет место стационарный режим.

Таким образом, принимая во внимание только периодическую составляющую свободного тока, условие стационарности режима при изменении скорости можно представить следующим образом

$$\lim_{\Delta t_n \rightarrow 0} J_{v2n} e^{\alpha_{2n}\Delta t_n} = 0. \quad (1.17)$$

Здесь: n=1, 2 ...;  $J_{v2n}$  - амплитудное значение периодической составляющей тока в начале интервала (n).

Так как  $J_{v2n}$  зависит от величины  $\Delta s_n = s_n - s_{n-1}$ , а  $\alpha_2 \approx -\rho_2 + j\omega$  (см. пунктирные кривые на рис. 2 и 3), то условие стационарности режима будет определяться ускорением ротора и коэффициентом затухания роторной обмотки при замкнутом статоре.

На основании изложенного можно сделать выводы, что:



- при невыполнении условия (1.17) изменение скорости сопровождается образованием свободных токов;
- учет ускорения ротора необходимо производить в области больших скоростей;
- решающую роль в этом области играет периодическая составляющая свободных токов, апериодическая составляющая незначительна;
- наиболее важным параметром, определяющим величину свободных токов, является коэффициент затухания роторной обмотки, коэффициент затухания статорной обмотки играет незначительную роль.

Таким образом, полученные выводы позволяют провести анализ эксплуатационных режимов асинхронных двигателей, когда по условиям задачи скорость является неизвестной величиной.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Петров, Г. Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч. 1. Введение. Трансформаторы / Г.Н. Петров // М.: Энергия, 1974. – 240 с.
2. Костенко, М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины, в 2-х частях 3-е издание / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский // М.: Энергия, 1972.
3. Копылов, И. П. Электрические машины: Учеб. для вузов. – 2-е изд. / И.П. Копылов // М.: Высш. шк., 2000. – 607 с.
4. Беспалов, В.Я. Электрические машины / В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец // М.: Академия, 2010. – 314 с.
5. Брускин, Д. Э. Электрические машины и микромашины. / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов // М.: Альянс, 2016. – 528 с.
6. Кацман, М. М. Электрические машины / М.М. Кацман // М.: Высш. шк., 2003. - 470 с.
7. Иванов, С.Н. Влияние ограничивающих факторов на электромагнитную мощность электрических машин / К.К. Ким, С.Н. Иванов // Ученые записки КнАГТУ – 2016. – № II-1(26). – С.4-8.
8. Ким, К.К. Электромеханические генераторы тепловой энергии [Электронный ресурс] : монография / К. К. Ким, С. Н. Иванов. — Электрон. текстовые данные. — Саратов : Ай Пи Эр Медиа, 2019. — 289 с. — 978-5-4486-0578-9. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/85859.html>
9. Горев, А. А. Основные уравнения неустановившегося режима синхронной машины / А.А. Горев // Труды ЛПИ № 5, 1936.
10. Казовский, Е.Я. Переходные процессы в асинхронных машинах при включениях и коротких замыканиях / Е.Я. Казовский // Электричество -1947. - № 6.
11. Шубенко, В.А. Графический метод расчета переходных процессов в асинхронном двигателе / И.С. Пинчук, В.А. Шубенко // Электричество - 1950. - № 2.
12. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины: Учебник для вузов / А.В. Иванов-Смоленский // М.: Энергия, 1980. – 928 с.
13. Ляпунов, А.М. Общая задача об устойчивости движения / А.М. Ляпунов // Череповец : Меркурий - Пресс, 2000. – 386 с.

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**  
**MECHANICAL ENGINEERING**

**Граков С. А., Бохан В. В., Бобров С. П., Зубарев А. В.**  
**S. A. Grakov, V. V. Bokhan, S. P. Bobrov, A. V. Zubarev**

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И РАСЧЁТА КОМПЕНСИРУЮЩИХ  
ПОЛУЖЁСТКИХ МЕМБРАННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МУФТ**

**BASIC PRINCIPLES OF DESIGN AND CALCULATION OF COMPENSATING SEMI-RIGID  
MEMBRANE METAL COUPLINGS**

**Граков Сергей Александрович** – научный сотрудник ФГУП «ФНПЦ “Прогресс”» (Россия, Омск); 644018, Россия, г. Омск, 5-Кордная ул., д. 4. E-mail: grakov\_sa@progress-omsk.ru.

**Mr. Sergey A. Grakov** – researcher, FSUE «FRPC “Progress”» (Russia, Omsk); 644018, Russia, Omsk, 5-Kordnaya str., 4. E-mail: grakov\_sa@progress-omsk.ru.

**Бохан Владимир Викторович** – кандидат технических наук, научный сотрудник ФГУП «ФНПЦ “Прогресс”» (Россия, Омск); 644018, Россия, г. Омск, 5-Кордная ул., д. 4. E-mail: bohan\_vv@progress-omsk.ru.

**Mr. Vladimir V. Bokhan** – PhD in Technical Sciences, Researcher, FSUE «FRPC “Progress”» (Russia, Omsk); 644018, Russia, Omsk, 5-Kordnaya str., 4. E-mail: bohan\_vv@progress-omsk.ru.

**Бобров Сергей Петрович** – кандидат технических наук, первый заместитель генерального директора – директор института ФГУП «ФНПЦ “Прогресс”» (Россия, Омск); 644018, Россия, г. Омск, 5-Кордная ул., д. 4. E-mail: info@progress-omsk.ru.

**Mr. Sergey P. Bobrov** – PhD in Technical Sciences, First Deputy Director General, Director of the Institute, FSUE «FRPC “Progress”» (Russia, Omsk); 644018, Russia, Omsk, 5-Kordnaya str., 4. E-mail: info@progress-omsk.ru.

**Зубарев Александр Викторович** – кандидат технических наук, генеральный директор ФГУП «ФНПЦ “Прогресс”» (Россия, Омск); 644018, Россия, г. Омск, 5-Кордная ул., д. 4. E-mail: info@progress-omsk.ru.

**Mr. Aleksandr V. Zubarev** – PhD in Technical Sciences, General Director, FSUE «FRPC “Progress”» (Russia, Omsk); 644018, Omsk, 5-Kordnaya str., 4. E-mail: info@progress-omsk.ru.

**Аннотация.** Приведены основные характеристики компенсирующих полужёстких металлических мембранных муфт, нашедших обширное применение в современной технике. Перечислены их преимущества. Описано напряжённо-деформированное состояние. Показан расчёт прочности упругого элемента. Цель работы – создание алгоритма действий, позволяющего реализовать в конструкции муфты заданные жёсткостные, прочностные и ресурсные характеристики. Показана перспектива использования метода конечных элементов для определения их напряжённо-деформированного состояния, жёсткости и устойчивости с целью уточнения полученных в предварительном расчёте параметров конструкции.

**Summary.** The main characteristics of compensating semi-rigid metal membrane couplings, which have found extensive use in modern technology, are presented. The authors list their benefits. The stress-strain state is described. The calculation shows the strength of the elastic element. The purpose of the work is the creation of an algorithm of actions that allows to implement specified stiffness, strength and resource characteristics in the design of the coupling. The prospect of using the finite element method to determine their stress-strain state, rigidity and stability with the aim of clarifying the design parameters obtained in the preliminary calculation is shown.

**Ключевые слова:** мембранный муфта, циклическая прочность, устойчивость, метод конечных элементов.

**Key words:** membrane coupling, cyclic strength, stability, finite element method.

УДК 621.825.5

**Введение**

В данной работе рассмотрены напряжённо-деформированное состояние, основные характеристики и особенности работы полужёсткой мембранный муфты, предназначенный для компенсации угловых, осевых и радиальных смещений осей валов при передаче крутящего момента. Полу-

жёсткие мембранные муфты применяются в различных отраслях промышленности. Они используются в системах газотурбинных [1; 2], дизельных и электрических двигателей [3]. В работе [4] и нормативных документах [5; 6] рассматриваются некоторые вопросы создания и использования данного типа муфт. Отечественные исследования в основном были направлены на изучение пластинчатых муфт [7; 8].

Мембранные муфты должны обладать достаточной гибкостью для компенсации возникающих на практике эксцентризитетов соединяемых валов и отклонений их осей от общей осевой линии вала при достаточной циклической прочности и усталостной долговечности. Причины возникновения переменных и постоянных смещений валов могут быть различными:

- деформации, вызванные градиентом (перепадом) температур, например нагрев ротора турбины при работе и последующее охлаждение при прекращении работы;
- деформации корпуса судна при качке и волнении, воздействующие на валолинию;
- переходные режимы – пуск и остановка движительных систем транспортных средств;
- ударные воздействия, воспринимаемые муфтой, например, в случае удара винта о лёд в условиях Арктики;
- компенсация монтажных допусков.

Преимущества мембранных муфт в сравнении с другими типами, такими как зубчатые муфты, муфты со змеевидной пружиной или эластомерными элементами: простота конструкции, монтажа и обслуживания, коррозионная стойкость, отсутствие смазки и трения, малый вес, передача высоких крутящих моментов, широкий диапазон рабочих температур ( $-100\ldots+300^{\circ}\text{C}$ ). Полужёсткие муфты, в отличие от жёстких, не передают через себя вибрацию от одного вала на другой, снижают нагрузку на подшипники.

Муфты данного типа являются высоконагруженными ответственными изделиями: при их работе возникает сложное напряжённо-деформированное состояние, поэтому они требуют строгого расчёта. Метод конечных элементов позволяет качественно и в короткие сроки определить их жёсткостные характеристики и провести необходимые расчёты на прочность.

### Описание конструкции полужёсткой мембранный муфты

Основа конструкции полужёсткой мембранный муфты – это упругий элемент, выполненный в виде относительно тонкой гибкой пластины (мембранны), как правило, металлической, но возможно применение и композитных материалов. Упругий мембранный элемент состоит из трёх основных конструктивных элементов: обода, ступицы и полотна мембранны (см. рис. 1). Толщина обода и ступицы больше толщины полотна мембранны, что обеспечивает снижение напряжений смятия в болтовом соединении.

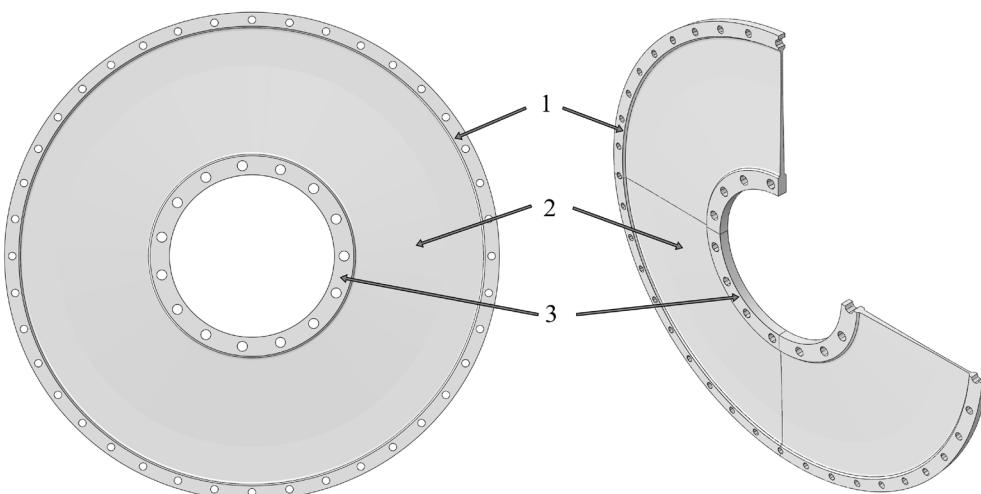


Рис. 1. Мембранный упругий элемент: 1 – обод, 2 – полотно мембранны, 3 – ступица

Мембранный упругий элемент может иметь следующие исполнения: постоянного сечения (см. рис. 2, а), переменного (см. рис. 2, б), а также изогнутой (волнистой) формы (см. рис. 2, в). Применяются пакеты из нескольких упругих элементов (см. рис. 2, г). Количество упругих элементов в пакете может доходить до нескольких десятков при толщине одного элемента менее 1 мм. Из технологических и экономических соображений мембранный упругий элемент может изготавливаться из стандартного листа проката, при этом имея одну толщину обода, ступицы и полотна мембраны (см. рис. 2, г). Для предотвращения возникновения фреттинг-коррозии между элементами пакета устанавливаются проставки. Важными для упругих мембранных элементов с любым сечением являются скругления по внутреннему и внешнему радиусу полотна мембраны, которые задают плавный переход от обода и ступицы к рабочей упругой зоне мембраны. Это позволяет снизить влияние концентраторов напряжений.

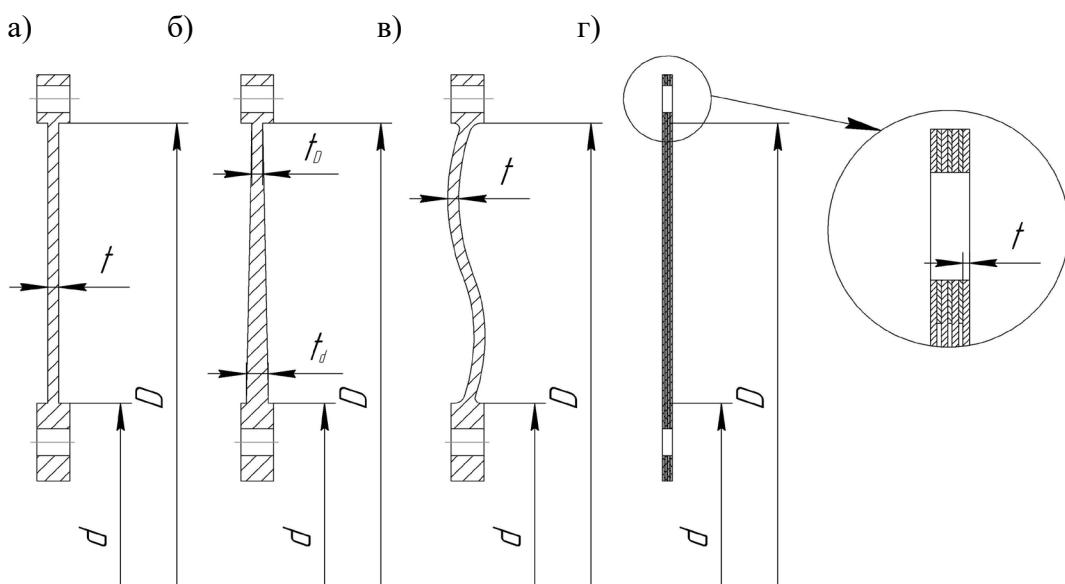


Рис. 2. Мембранный упругий элемент: а – постоянного сечения; б – переменного сечения; в – изогнутой формы; г – пакет из упругих элементов с проставками

Конструкция компенсирующей муфты может содержать несколько упругих элементов, расположенных последовательно. При использовании одного упругого мембранных элемента компенсируются угловые и осевые смещения осей соединяемых валов. Широкое применение получила схема, приведённая на рис. 3. Использование двух упругих мембранных элементов и промежуточного вала позволяет, помимо осевых и угловых, компенсировать также радиальные (перпендикулярно основной валолинии) смещения осей валов. Для таких муфт характерен более широкий диапазон допускаемых смещений.

#### Используемые материалы

Мембранный упругий элемент при рабочих режимах помимо постоянного крутящего момента также воспринимает циклические переменные нагрузки, как периодические, так и случайные. В связи с этим материал мембран должен обладать высоким пределом выносливости и иметь значение не менее 300 МПа.

В качестве материала промежуточного вала возможно использование наряду со сталью также и титана. Различие в модуле сдвига (для стали  $\approx 80$  ГПа, для титана  $\approx 40$  ГПа) в свою очередь позволяет варьировать крутильную жёсткость промежуточного вала. Перспективным является применение композитов. В целом уход от стали к материалу с низким удельным весом позволяет регулировать резонансные частоты муфты, а также сохранить соответствующий запас прочности (мощности).

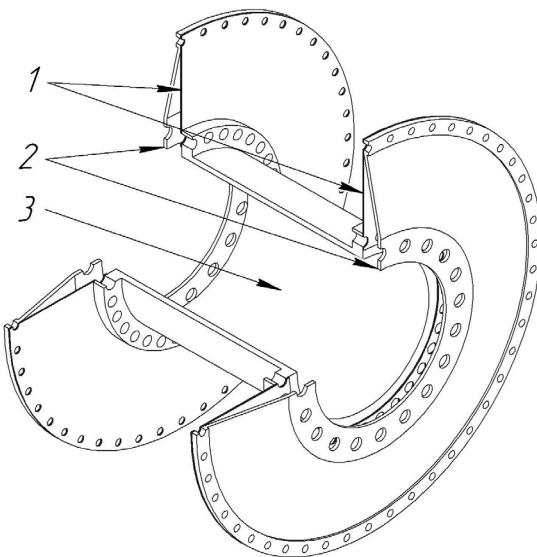


Рис. 3. Комбинация двух мембранных упругих элементов и промежуточного вала:  
1 – упругий мембранный элемент; 2 – переходные фланцы; 3 – промежуточный вал

#### **Напряжённо-деформированное состояние упругого мембранного элемента**

При создании мембранных упругих элементов требуется учесть множество противоречивых требований. В каждом конкретном случае упругий элемент проектируется исходя из основных рабочих режимов: длительности воздействия и величины передаваемого крутящего момента, частоты вращения, допускаемых осевых, угловых и радиальных смещений. На основе исходных данных (требований заказчика) необходимо заложить такой запас циклической прочности, чтобы упругий элемент был способен выдержать при работе заданное количество циклов нагружения в течение всего срока службы и в то же время обладал требуемыми жёсткостными характеристиками. Соответственно, готовое изделие является компромиссом между прочностью (несущей способностью) и жёсткостью (гибкостью). Использование метода конечных элементов позволяет оценить напряжённо-деформированное состояние, жёсткость и устойчивость элементов упругой муфты.

Алгоритм расчёта мембранный муфты можно представить в следующем виде:

- определение напряжений и жёсткостей при требуемых нагрузках и деформациях;
- расчёт на устойчивость мембранных упругого элемента;
- определение циклической прочности.

#### **Напряжённо-деформированное состояние при передаче крутящего момента**

Основная задача полужёсткой мембранный муфты – надёжная передача крутящего момента. В сечении упругого мембранных элемента с цилиндрической поверхностью радиуса  $r_i$  при приложении крутящего момента  $M$  возникает сила сдвига  $N$  (тангенциальная), которую можно представить в виде

$$N = \frac{M}{r_i},$$

где  $M$  – крутящий момент;  $r_i$  – радиус.

Касательные (тангенциальные) напряжения, возникающие в мембранных упругом элементе, при передаче крутящего момента вычисляются по формуле [9]

$$\tau = \frac{M}{F \cdot r_i},$$

где  $M$  – крутящий момент;  $F = 2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot t_i$  – площадь поперечного сечения на радиусе  $r_i$ , здесь  $t_i$  – толщина упругого элемента на радиусе  $r_i$ .

Распределение полей напряжений в мембранным упругом элементе при приложении крутящего момента, полученное с помощью метода конечных элементов, представлено на рис. 4, а.

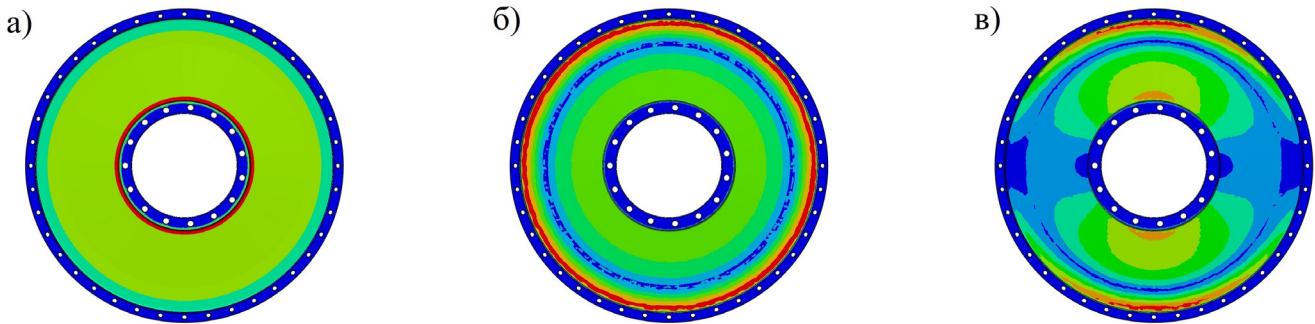


Рис. 4. Эквивалентное напряжение в мембранным упругом элементе при действии:  
а – крутящего момента; б – осевого смещения; в – углового смещения

При проектировании высокоэффективных изделий машиностроения используется условие равнопрочности [1]. Варьируя толщину мембраны  $t_i$  по радиусу  $r_i$  (см. рис. 2, б), мы можем добиться равного сопротивления упругого элемента крутящему моменту. Использование гиперболического профиля ( $\tau_i \sim \frac{1}{r_i^2}$ ) мембранныго элемента обеспечивает постоянное значение касательных напряжений ( $\tau = \text{const}$ ) по всему полотну мембраны.

#### **Напряжённо-деформированное состояние при осевых смещениях**

В упругом элементе мембранны при осевом смещении валов возникает изгиб. Деформированное сечение принимает вид «купола» (см. рис. 5, б). Максимальные напряжения при этом возникают на внутреннем диаметре. Жёсткость при осевых смещениях мембранныго полотна постоянной толщины  $t$  можно вычислить по формуле [10]

$$c_a = \frac{E \cdot t^3}{k \cdot D^2},$$

где  $E$  – модуль упругости;  $t$  – толщина полотна мембраны;  $k$  – коэффициент, зависящий от значения  $\frac{D}{d}$ ;  $D$  – максимальный диаметр полотна мембраны [10].

Осевая собственная частота муфты с промежуточным валом определяется его массой и осевой жёсткостью мембран, на которых закреплён вал, и вычисляется по формуле

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{m}},$$

где  $c$  – суммарная жёсткость мембранных упругих элементов;  $m$  – масса промежуточного вала.

Значение осевой собственной частоты не должно быть в пределах  $\pm 10\%$  от номинальной частоты вращения вала.

Распределение полей напряжений в мембранным упругом элементе при приложении осевого смещения, полученное с помощью метода конечных элементов, представлено на рис. 4, б.

#### **Напряжённо-деформированное состояние при угловых смещениях**

Форма деформации мембранны, возникающая при угловом смещении валов, показана на рис. 5, в. Жёсткость мембранныго элемента постоянной толщины  $t$  при данном виде смещений вычисляется согласно формуле [11]

$$c_f = B \cdot 2\pi \cdot \frac{m^2 + 1}{(m^2 + 1) \cdot \ln m - m^2 + 1},$$

где  $B = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}$  – цилиндрическая изгибная жёсткость пластины, здесь  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $m = \frac{D}{d}$ ,  $D$  и  $d$  – соответственно максимальный и минимальный радиусы полотна мембранны (радиусы скруглений у обода и ступицы при этом не учитываются).

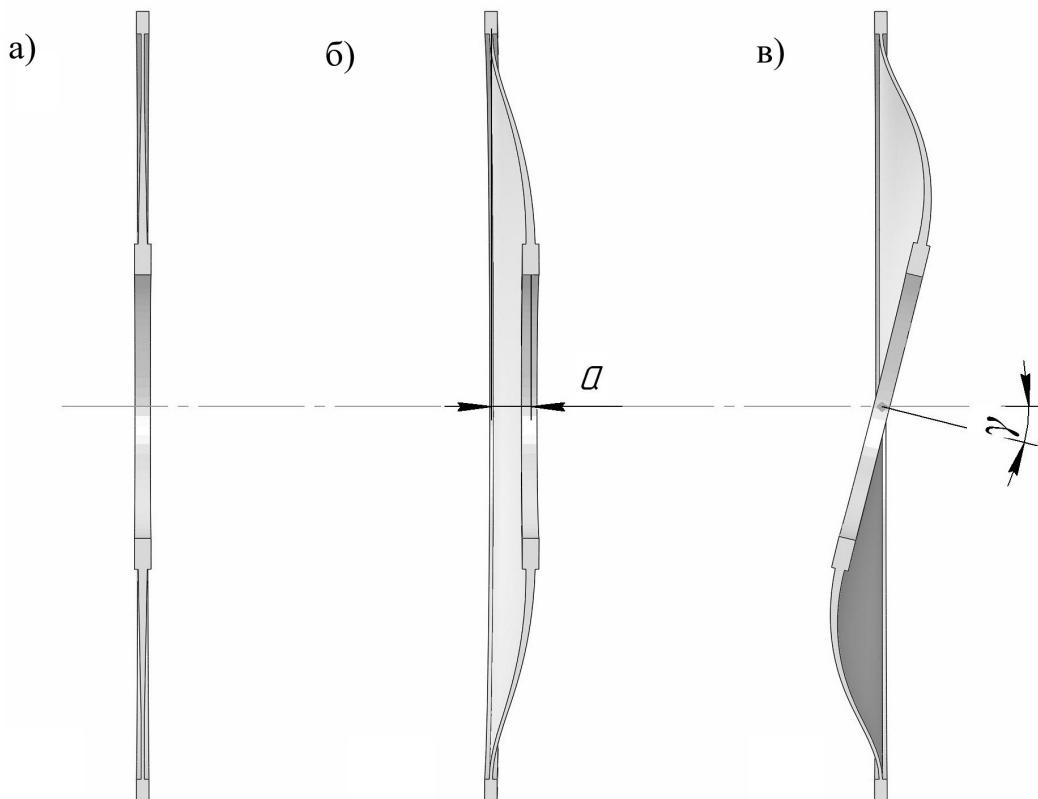


Рис. 5. Упругий мембранный элемент: а – в исходном недеформированном состоянии; б – при осевом смещении; в – при угловом смещении

Распределение полей напряжений в мембранным упругом элементе при приложении углового смещения, полученное с помощью метода конечных элементов, представлено на рис. 4, в.

Также в упругом элементе возникают:

- напряжения от центробежных сил (при частоте вращения более 1000 об/мин их необходимо учитывать);
- напряжения от температурного расширения;
- напряжения от переменной (циклической) составляющей крутящего момента, обусловленной крутильными колебаниями валопровода.

Толщиной, профилем продольного сечения и отношением внешнего диаметра ( $D$ ) к внутреннему ( $d$ ) полотна мембранныго элемента при конструировании задаются осевая и угловая жёсткости. Внешний и внутренний диаметры применяются исходя из диапазона  $D/d = 1,5...3$ . Чем меньше  $D/d$ , тем меньше гибкость и больше способность передавать крутящий момент. Угловая жёсткость выше при малых значениях  $D/d$  и у элементов с переменным сечением. Осевая жёсткость зависит от формы продольного сечения упругого элемента, и при постоянной толщине она обратно пропорциональна кубу толщины мембранны.

### Устойчивость мембранныго упругого элемента

При наибольшем диаметре и малой толщине полотна мембранныго элемента достигается наибольшая гибкость. Однако при этом возможна потеря устойчивости, что может произойти, например, при превышении проектной нагрузки. Метод конечных элементов позволяет наиболее

точно провести расчёт напряжённо-деформированного состояния мембранный муфты, особенно при сложной геометрии упругого элемента (см. рис. 2, б, в), в том числе и определить устойчивость полотна мембраны (см. рис. 6 и 7).

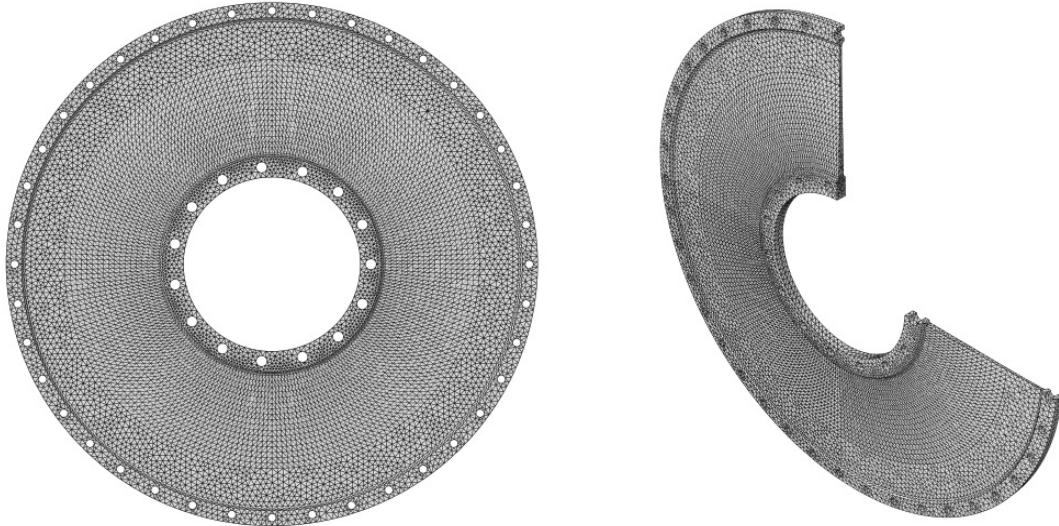


Рис. 6. Конечно-элементная модель мембранныго упругого элемента

#### **Прочность упругого мембранныго элемента муфты при переменных нагрузках (циклическая прочность).**

При работе мембранныго упругого элемента возникает сложное напряжённо-деформированное состояние как сочетание постоянных  $\sigma_m$  и переменных  $\sigma_a$  составляющих напряжений [12], перечисленных выше. В общем случае при комбинации смещений осей валов и передачи крутящего момента в упругом элементе возникает асимметричный цикл нагружения (см. рис. 8):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2},$$

где  $\sigma_m$  – среднее напряжение цикла;  $\sigma_a$  – амплитуда напряжения цикла;  $\sigma_{\max}$  – максимальное напряжение цикла;  $\sigma_{\min}$  – минимальное напряжение цикла.

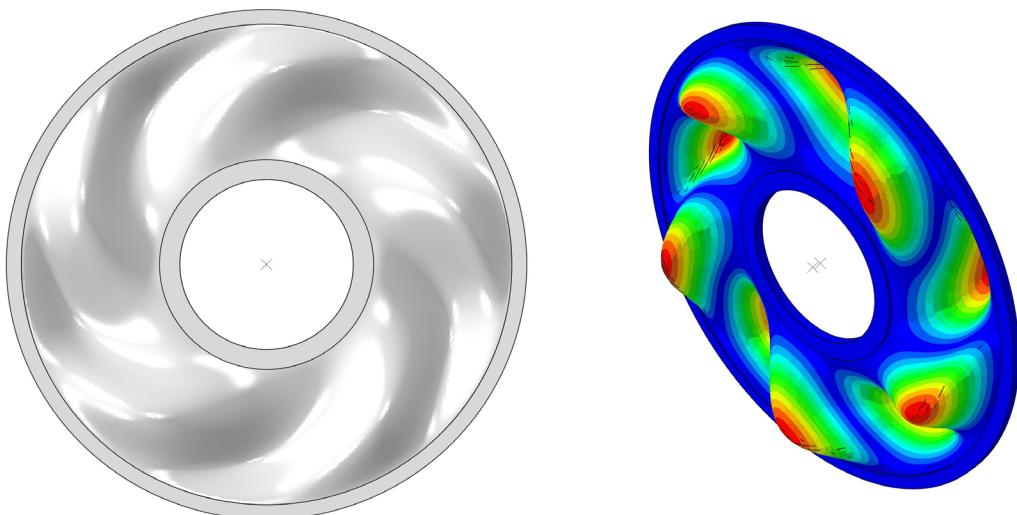


Рис. 7. Потеря устойчивости мембранныго упругого элемента при приложении крутящего момента

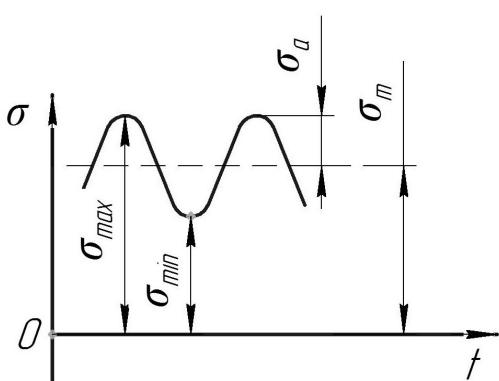


Рис. 8. Форма изменения напряжений во времени для асимметричного цикла нагружения

Постоянная составляющая напряжений  $\sigma_m$  складывается из следующих компонентов: касательных напряжений от среднего передаваемого крутящего момента  $\tau$ , напряжений от осевых деформаций  $\sigma_{axial}$ , напряжений от температурного расширения  $\sigma_{temp}$ , напряжений от центростремительных сил  $\sigma_{centr}$ .

Согласно [12; 13; 14] результирующее значение постоянных напряжений вычисляется по формуле

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{axial} + \sigma_{temp} + \sigma_{centr}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{axial} + \sigma_{temp} + \sigma_{centr}}{2}\right)^2 + \tau^2}.$$

Переменная составляющая напряжений  $\sigma_a$  складывается из следующих компонентов:

- напряжения от угловой деформации  $\sigma_f$ ;
- периодической составляющей касательных напряжений  $\tau_{cyclic}$ , возникающей от вибрационного момента (из-за крутильных вибраций в валопроводе).

Согласно [14] результирующее значение переменных напряжений вычисляется по формуле

$$\sigma_a = \frac{\sigma_f}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_f}{2}\right)^2 + \tau_{cyclic}^2}.$$

На основе этих данных строится типовая диаграмма предельных амплитуд напряжений при асимметричных циклах (см. рис. 9).

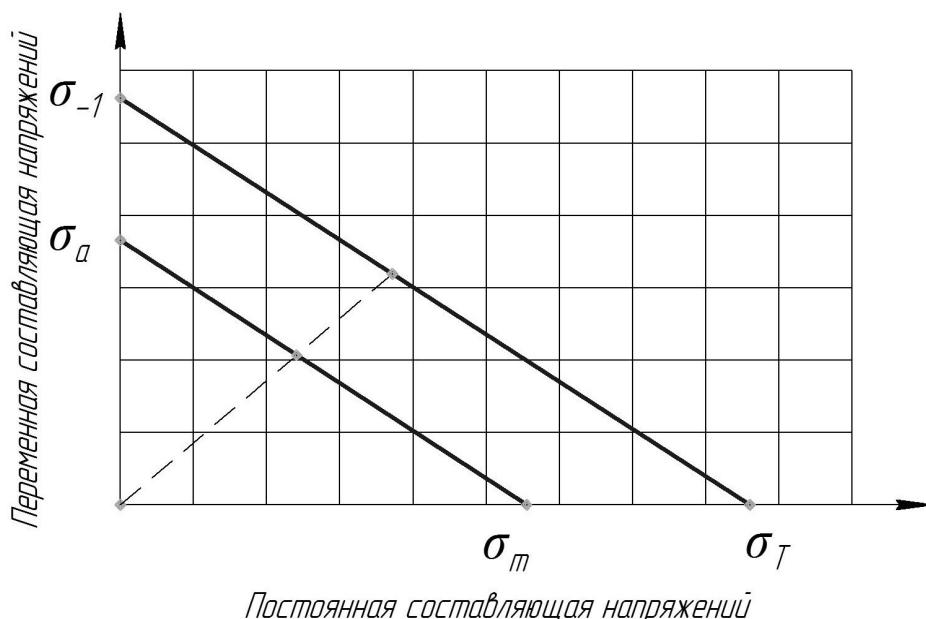


Рис. 9. Диаграмма предельных амплитуд напряжений

Запас прочности определяется согласно [12] формуле

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_T} + \frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} = \frac{1}{N},$$

где  $N$  – запас прочности;  $\sigma_T$  – предел текучести материала;  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости материала.

Запас прочности необходимо принимать не менее 2, для ответственных высоконагруженных изделий – не менее 3. С учётом экспериментальной отработки и заранее известных и жёстко ограниченных условий работы возможно принятие запаса прочности не менее 1,3.

Для достижения наилучшей циклической прочности следует ответственно выбирать требования к качеству поверхности полотна мембранны (полирование).

### Заключение

Представлены основные характеристики мембранный металлической муфты и основы её конструирования. Предложен общий алгоритм, позволяющий реализовать в конструкции муфты заданные жёсткостные, прочностные и ресурсные характеристики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жирицкий, Г. С. Конструкция и расчёт на прочность деталей паровых и газовых турбин / Г. С. Жирицкий, В. А. Стрункин. – М.: Машиностроение, 1968. – 356 с.
2. Яблоник, Р. М. Газотурбинные установки / Р. М. Яблоник. – М.: Машгиз, 1959. – 408 с.
3. Аксельбанд, А. М. Судовые энергетические установки / А. М. Аксельбанд. – Л.: Судостроение, 1970. – 472 с.
4. Mancuso, Jon R. Couplings and Joints: Design, Selection, and Application / Jon R. Mancuso. – Dekker, Inc., 1986. – 492 p.
5. ISO 10441, 2007. Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries – Flexible Couplings for Mechanical Power Transmission – Special-Purpose Applications, Second Edition, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
6. API Standard 671, 1998. Special Purpose Couplings for Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services. Third Edition, American Petroleum Institute, Washington, D.C.
7. Гоголина, И. В. Исследование функциональных свойств пластинчатых муфт: их нагружочная и компенсирующая способность / И. В. Гоголина, А. М. Попов, М. С. Сорочкин // Новое в технике и технологии пищевых отраслей промышленности. – Кемерово: КемТИПП, 1995. – С. 41.
8. Иванов, Б. С. Определение компенсационной способности пластинчатых муфт методом конечных элементов / Б. С. Иванов, А. И. Костин // Исследование надёжности и долговечности деталей машин. Труды ЛПИ № 396. – Л.: [б. и.], 1983. – С. 18.
9. Расчёты на прочность в машиностроении / под ред. С. Д. Пономарева. – М.: Машгиз, 1958. – Т. 2. – 974 с.
10. Тимошенко, С. П. Сопротивление материалов / С. П. Тимошенко. – М.: Наука, 1965. – Т. II. – 480 с.
11. Бидерман, В. Л. Механика тонкостенных конструкций. Статика / В. Л. Бидерман. – М.: Машиностроение, 1977. – 488 с.
12. Школьник, Л. М. Методика усталостных испытаний: справ. / Л. М. Школьник. – М.: Металлургия, 1978. – 304 с.
13. Когаев, В. П. Расчёты на прочность при напряжениях, переменных во времени / В. П. Когаев. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
14. Заславский, Б. В. Краткий курс сопротивления материалов: учеб. для авиационных специальностей вузов / Б. В. Заславский. – М.: Машиностроение, 1986. – 328 с.



**Иванов С. Н., Ким К. К., Сарилов М. Ю., Семибратова М. В.**  
S. N. Ivanov, K. K. Kim, M. Yu. Sarilov, M. V. Semibratova

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИВОДНОГО МЕХАНИЗМА СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА

### IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE POINTER DRIVE MECHANISM

**Иванов Сергей Николаевич** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)1859120. E-mail: kem@email.knastu.ru.

**Mr. Sergey N. Ivanov** – Doctor of Engineering, Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)1859120. E-mail: kem@email.knastu.ru.

**Ким Константин Константинович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); тел. 8(903)0965770. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Mr. Konstantin K. Kim** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department «Theoretical electrical engineering», Sankt-Petersburg State Transport University Emperor Alexander I (Russia, Sankt-Petersburg); tel. 8(903)0965770. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Сарилов Михаил Юрьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: sarilov@knastu.ru.

**Mr. Michail Yu. Sarilov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Machines and Apparatus of Chemical Production Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Russia, Komsomolsk-on-Amur, Lenin str. 27. E-mail: sarilov@knastu.ru.

**Семибратова Марина Владимировна** – кандидат технических наук, декан факультета заочного и дистанционного образования Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: fzdo@knastu.ru.

**Mrs. Marina V. Semibratova** – PhD in Engineering, Dean of the Faculty of Correspondence and Distance Education, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Russia, Komsomolsk-on-Amur, Lenin str. 27. E-mail: fzdo@knastu.ru.

**Аннотация.** Обеспечение безопасности транспортных систем за счёт повышения эффективности приводов стрелочных переводов представляет одну из актуальных задач, связанных с исследованием структурной надёжности реализующих их механизмов. Внедрение технических решений, направленных на объединение исполнительного устройства и привода и, как следствие, возрастание структурной надёжности представляют одно из перспективных направлений решения данной задачи. В статье показан подход к проектированию, оценке надёжности и технической реализации приводов стрелочных переводов. Очевидные преимущества электрифицированного транспорта, ориентированного на использование развитых рельсовых магистральных путей, также подтверждают актуальность внедрения новых типов приводов, имеющих улучшенные технико-экономические параметры. Интеграция, анализ и использование в составе электромеханического привода асинхронного двигателя с модифицированным короткозамкнутым ротором позволяют повысить надёжность транспортных систем за счёт более высокой степени автоматизации, улучшить динамические характеристики и качество технологических процессов транспортных объектов.

**Summary.** Ensuring the safety of transport systems by increasing the efficiency of switch drives is one of the urgent problems associated with the study of the structural reliability of their implementing mechanisms. The introduction of technical solutions aimed at combining the actuator and the drive and, as a consequence, the increase in structural reliability, is one of the promising directions for solving this problem. The article shows an approach to the design, evaluation of reliability and technical implementation of switch drives. The obvious advantages of electrified transport, focused on the use of developed rail main lines, also confirm the relevance of the introduction of new types of drives with improved technical and economic parameters. Integration, analysis and use of an induction motor with a modified squirrel-cage rotor as part of an Electromechanical drive can improve the reliability of

transport systems due to a higher degree of automation, improve the dynamic characteristics and quality of technological processes of transport facilities.

**Ключевые слова:** стрелочный перевод, надёжность, комбинированный электропривод, приводной механизм.

**Key words:** pointer, reliability, combined electric drive, drive mechanism.

УДК 656.21/22

## Введение

Используемые на современных магистралях электрифицированные стрелочные переводы относятся к наиболее ответственным устройствам железнодорожных коммуникаций. В эксплуатационной практике известны случаи схода вагонов на стрелке вследствие рассоединения шибер электропривода с шарниром из-за выпадения пальца шарнира. Имеют место случаи несрабатывания стрелки в плюсовое положение из-за потери контакта между щёткой и коллектором электродвигателя. В зимний период работы стрелочных переводов дополнительно усложняется климатическими факторами, например, наблюдается неплотное прилегание остряков к рамному рельсу из-за напресовки снега в промежутке между отдельными элементами. Анализ типичных причин отказов существующих электроприводов стрелочных переводов показывает: около 50 % – отказы, связанные с нарушениями работы контактной группы автоматического переключателя, 30 % – неисправности приводного электродвигателя, 10 % – повреждения механической передачи, 5 % – выход из строя блокировочного устройства, 3 % – заклинивания шибера [1 – 4]. Если учесть возможную тяжесть последствий нарушения работоспособности перевода, то устранение или снижение вероятности возникновения любой из указанных причин логично ведёт к повышению надёжности процесса железнодорожных перевозок в целом. На сегодняшний день существует комплект нормативно-технической документации, строго регламентирующий все стадии работ, связанных с монтажными работами и техническим обслуживанием стрелочных переводов [5 – 7]. При этом основное внимание в нормах и правилах уделяется вопросам оперативного и технического обеспечения безотказной эксплуатации стрелочных переводов, что требует не только соблюдения правил техники безопасности и инструкций по техническому обслуживанию и ремонту устройств сигнализации, централизации и блокировки, но и ввода автоматизированных контрольно-управляющих модулей, позволяющих снизить влияние человеческих факторов на работу систем рельсового транспорта.

Перечень требований, предъявляемых к стрелочным переводам, чрезвычайно широк, что ещё раз указывает на их важность для транспортной системы. Так, стрелочные переводы должны иметь марки крестовин не круче указанных в табл. 1.

Таблица 1  
Марки крестовин стрелочных переводов

Назначение стрелочных переводов	Марки крестовин стрелочных переводов, не круче
Обеспечение безостановочного пропуска поездов при разветвлении главного пути и в развязках путепроводов	1/18; 1/22; допускается 1/11
Приём и отправление пассажирских поездов по боковому пути	1/11; перекрестные и одиночные переводы, являющиеся продолжением поперекрестных, 1/9
Приём и отправление грузовых поездов по боковому пути	1/9; симметричные 1/6
На соединительных и прочих станционных путях	1/9; симметричные 1/6
Станционные, погрузочные и разгрузочные пути на соединительных и подъездных путях (исключение: приёмо-отправочные, подгорочные и пути следования длинномерных сцепов)	1/7; симметричные 1/4,5

При укладке на главных путях обгонных пунктов, разъездов и станций, стрелочные переводы должны обеспечивать:

- по прямому направлению пропуск поездов со скоростью, не меньшей, чем на прилегающих перегонах;

- на главных путях новых линий при скоростях до 140 км/ч вставки длиной не менее 12,5 м;

- при скоростях выше 140 до 200 км/ч – не менее 25,0 м.

Эти примеры показывают, что на техническом уровне при реализации стрелочного перевода необходимы конструкции, позволяющие повысить эффективность путевого оборудования. Одним из таких решений, рассматриваемых в данной статье, является использование привода стрелочного механизма на основе электромеханического преобразователя переменного тока с короткозамкнутым ротором [8].

### Постановка задачи

Стрелочный перевод – устройство, обеспечивающее возможность перемещения железнодорожного подвижного состава с одного пути на другой. Он состоит из стрелок, крестовин и соединительных железнодорожных путей между ними. При наличии крестовины с подвижным сердечником применяется специальный механизм (электропривод), управляемый с центрального диспетчерского пункта.

В Российской Федерации используются стрелочные переводы трёх видов: одиночные (более 90 %), двойные и перекрёстные. В свою очередь, они подразделяются на обыкновенные, симметричные и несимметричные, что отражается на предъявляемых к ним требованиях (см. табл. 1).

Топология и скоростные характеристики магистрали определят выбор перевода. Симметричные стрелочные переводы используют при необходимости обеспечить высокие скорости движения по ответвляющимся путям, т.к. они не требуют основного прямолинейного пути. Это связано с тем, что угол отклонения пути от прямолинейного направления составляет половину угла крестовины, а переводная кривая имеет радиус вдвое больше. Находят применение на приёмочных и отправочных путях (1/11; 1/9), сортировочных участках (1/6), путях вагонных, локомотивных и грузовых хозяйств станции.

При сложной топологии станционных путей искривлённые участки пути, соответственно, используют несимметричные криволинейные переводы.

Двойные и перекрёстные стрелочные переводы позволяют реализовать транспортное единение, объединить три пути в один или, наоборот, разветвить один путь на три.

Согласно правил технической эксплуатации на железных дорогах Российской Федерации на главных, приёмочных и отправочных пассажирских путях применяются переводы не круче 1/11, одиночные и перекрёстные переводы (если одиночные продолжают перекрестные) не круче 1/9; на приёмочных и отправочных путях грузового движения – не круче 1/9 (симметричные – не круче 1/6). При движении пассажирских поездов со скоростями до 200 км/ч применяются стрелочные переводы типа Р65 марки 1/11 с крестовиной с непрерывной поверхностью катания и гибкими остряками. В порядке исключения и только по согласованию с ОАО «РЖД» при разветвлении главного пути, в путепроводных развязках и других тяжёлых условиях допускается применение переводов 1/18 и 1/22. При этом независимо от марки перевода они получают необходимое механическое усилие от приводного механизма [9].

Таким образом, основным силовым элементом стрелочного перевода является его приводной механизм. Объединение привода и исполнительного устройства, действующего на подвижный остряк, полностью соответствует тенденции прямого развития принципа построения рациональной машины: максимальное приближение места преобразования одного вида энергии (электрической) в другой (механическую) относительно последнего вала.

Сравнение существующих типов приводных механизмов позволяет выделить следующие преимущества электромеханического привода на базе асинхронного двигателя с модифицированным короткозамкнутым ротором:

- отсутствие наиболее напряжённых в механическом отношении промежуточных редукторов, трансмиссий, вариаторов, мультипликаторов, цепных и ременных передач;

- возможность синтеза и оптимизация конструкции без снижения качества основных характеристик за счёт уменьшения количества структурных элементов;
- автоматизация транспортных систем с сохранением регулировочных и динамических характеристик;
- комплексное повышение эффективности оборудования (экономичности, надёжности);
- улучшение весогабаритных показателей.

Интеграция исполнительного механизма в приводной и использование применительно к стрелочным переводным устройствам обеспечивают возможность экономичного и точного поддержания требуемых эксплуатационных показателей и отвечают современным требованиям не только технологичности, электробезопасности и надёжности, но и экологичности.

Структурная схема стрелочного перевода приведена на рис. 1. Она включает перемещаемый элемент стрелочного перевода – остряк, на который непосредственно воздействует движущийся в осевом направлении вал совмещённого электромеханического преобразователя СЭЛП, подключённого к сети переменного тока через преобразователь частоты ПЧ, необходимый не только для формирования требуемого сочетания «напряжение/частота», но и для обеспечения работы информационно-управляющей системы ИУС посредством её связи через аналоговые и/или цифровые входы/выходы преобразователя с первичной системой сбора, обработки и хранения информации (на рисунке не показана). В структуре перевода может быть предусмотрен механизм свободного перемещения МСП, позволяющий переходить на оперативное ручное управление при отсутствии сетевого напряжения.

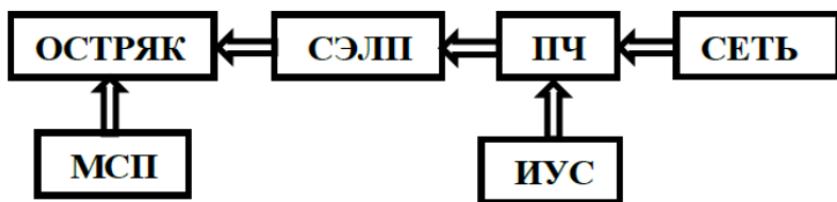


Рис. 1. Структура стрелочного перевода

Примером технической реализации привода является совмещённый электропривод с линейным перемещением исполнительного элемента (СЭЛП) на основе асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, рассмотренный в [10]. Основным силовым элементом привода на базе электромеханического преобразователя с линейным перемещением исполнительного элемента является вращающаяся короткозамкнутая вторичная обмотка с внутренним расположением тяги, перемещение которой обеспечивает резьбовое соединение. Техническое решение конструктивно объединяет исполнительный и приводной механизмы, исключает дополнительные передаточные устройства и обеспечивает повышение эффективности привода.

Анализ напряжённо-деформированного состояния рассматриваемой конструкции показывает, что критериями работоспособности СЭЛП являются механическая устойчивость тяги и прочность элементов резьбовой части ротора и тяги, которые могут быть проверены в соответствии с существующей машиностроительной методикой [11]. Она позволяет выполнить проверочный расчёт и решить прямую задачу (оценить параметры спроектированного приводного механизма на соответствие заданным критериям) или обратную (определить размерные соотношения базового двигателя, удовлетворяющего эксплуатационным нагрузкам). Использование известной в теории надёжности модели «слабейшего звена» выделяет резьбовое соединение привода в качестве основного проектного параметра для анализа механической передачи. В условиях скольжения типа «винт-гайка» можно считать, что основным критерием работоспособности тяги является скорость износа резьбового сопряжения, на которое действуют растягивающие и сжимающие нагрузки, превышающие 20...25 кН при приведённой длине не выше 0,5 м.

## Теоретическая основа

В процессе разработки и проектирования СЭЛП возникает необходимость решения задачи немоделируемой динамики, обусловленной нелинейностью процессов преобразования энергии и необходимостью одновременного учёта связанных разнотемповых физических процессов [12]. На первом этапе допустимо аналитическое описание СЭЛП приближённой моделью обобщённого преобразователя, применяемой в электромеханике [13]. Введение модифицированного уравнения тяговой характеристики механизма линейного перемещения в математическую модель позволяет получить выражение для вращающего момента:

$$M_{\text{вр}} = 0,5F_p d_2 \left( \frac{D_{\text{ср}}}{d_2} f + \operatorname{tg}(\vartheta + \varphi) \right), \quad (1)$$

где  $M_{\text{вр}}$  – момент (вращающий) на валу;  $d_2$  – диаметр в резьбовой части вала ротора;  $D_{\text{ср}}$  – диаметр (средний) резьбовой части вращающегося ротора;  $f$  – коэффициент трения резьбового соединения;  $\vartheta$  – угол подъёма резьбы;  $\varphi = \operatorname{arctg} f_{\text{пр}}$ , здесь  $f_{\text{пр}}$  – коэффициент трения, приведённый к углу профиля.

Уравнение (1) определяет тяговую характеристику электромеханического преобразователя с линейным перемещением исполнительного элемента, устанавливающую связь с параметрами базового двигателя.

## Моделирование приводного механизма

Для точного определения диапазона выполнимости и целесообразности применения СЭЛП необходимо использование современной интегрированной САПР (CAD/CAE) системы для анализа напряжённо-деформированного состояния элементов перевода. Основные этапы и результаты моделирования привода рассмотрены в [10; 11]. Типовыми этапами проектирования являются следующие:

- создание твёрдотельной геометрической сборочной модели привода, интегрируемой в совмещённый с ним электромеханический преобразователь;
- создание параметрической сборочной 3D-модели и её параметризация;
- перенос расчётной геометрической модели в систему инженерного анализа с использованием нейтральных форматов (iges.) для обмена геометрическими данными между CAD/CAE-системами.

## Заключение

В статье предложен высокоэффективный механизм привода стрелочного перевода на базе совмещённого электромеханического преобразователя, разработанный с использованием 3D-моделирования. Определены основные эксплуатационные критерии работоспособности. Предложено аналитическое выражение, связывающее тяговые характеристики привода и размерные соотношения базового электромеханического преобразователя. Полученные результаты позволяют повысить надёжность и технологичность стрелочных переводов, применяемых для рельсового транспорта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Эксплуатационная работа станций и отделений / Э. З. Брайтман [и др.]; под ред. Э. З. Брайтмана. – М.: Желдориздат, 2002. – 424 с.
2. Савченко, И. Е. Железнодорожные станции и узлы / И. Е. Савченко, С. В. Земблинов, И. И. Страковский. – М.: Транспорт, 1980. – 479 с.
3. Крейнис, З. Л. Техническое обслуживание и ремонт железнодорожного пути / З. Л. Крейнис, Н. П. Коршикова. – М.: УМК МГТС России, 2001. – 768 с.
4. Технология, механизация и автоматизация путевых работ / под ред. Э. В. Воробьева, К. Н. Дьякова. – М.: Транспорт, 1996. – 375 с.
5. Соколов, В. Н. Общий курс железных дорог / В. Н. Соколов [и др.]; под ред. В. Н. Соколова. – М.: УМК МПС России, 2002. – 296 с.
6. Инструкция по сигнализации на железных дорогах Российской Федерации МПС РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n>.

7. СП 119.13330.2012. Железные дороги колеи 1520 мм. Актуализированная редакция СНиП 32-01-95 / Департамент архитектуры, строительства и градостроительной политики. – М.: Минрегион России, 2012. – 52 с.
8. Пат. 2694933 Российская Федерация, МПК H02K 7/063, F16H 25/20, H02K 17/16. Электромеханическая система / А. А. Просолович [и др.]; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре филиал компании «Сухой» «КнАЗ им. Ю.А. Гагарина». – № 2018122048; заявл. 14.06.2018; опубл. 18.07.2019. Бюл. № 2. – 2 с.
9. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации / Министерство транспорта Российской Федерации. – М.: ООО «Техинформ»; ООО Центр «Транспорт», 2012. – 521 с.
10. Иванов, С. Н. Моделирование комбинированного электропривода / С. Н. Иванов, К. К. Ким // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62. – № 3 (197). – С. 44-51.
11. Разработка и моделирование автоматического привода запорной арматуры локализации центробежного насоса / С. Н. Иванов и [др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2019. – № II-1(38). – С. 69-75.
12. Синтез нечёткой системы управления герметичным приводом комплексной системы безопасности / О. С. Амосов и [др.] // XX Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2017). Сборник докладов в 3 томах. Т. 1. Санкт-Петербург, 24-26 мая 2017 г. – С. 275-278.
13. Ким, К. К. Теплогенерирующие электромеханические устройства и комплексы: моногр. [Электронный ресурс] / К. К. Ким, С. Н. Иванов, В. М. Кузьмин. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 418 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/85851.html>.
14. Ким, К. К. Новый метод утилизации автомобильных шин с металлокордом / К. К. Ким, И. М. Карпова // Безопасность жизнедеятельности. – 2007. – № 11. – С. 24-27.
15. Пат. 2116604 Российская Федерация. МПК F41B6/00. Электродинамическая пушка / Гамаюнов А. В., Ким К. К.; заявитель и патентообладатель Петербургский государственный университет путей сообщения. – № 97106532/02; заявл. 18.04.1997; опубл. 27.07.1998. Бюл. № 2. – 2 с.



Конюхова Я. В., Ким В. А., Мокрицкий Б. Я.  
Ya. V. Konyukhova, V. A. Kim, B. Ya. Mokritsky

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЁС

### RESULTS OF RAILWAYS TURNING SIMULATORY MODELING

**Конюхова Яна Васильевна** – студентка института компьютерного проектирования машиностроительных технологий и оборудования Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: konyukhova.ya.v@mail.ru.

**Mrs. Yana V. Konyukhova** – Student, Institute of Computer Design of Engineering Technologies and Equipment, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Russia, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave., 27. E-mail: konyukhova.ya.v@mail.ru.

**Ким Владимир Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии новых материалов Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

**Mr. Vladimir A. Kim** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Materials Science and Technology of New Materials Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Russia, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave., 27.

**Мокрицкий Борис Яковлевич** – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: boris@knastu.ru.

**Mr. Boris Ya. Mokritsky** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Engineering Technology Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Russia, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave., 27. E-mail: boris@knastu.ru.

**Аннотация.** В статье представлены исследования процесса резания путём компьютерного моделирования. Приведены прогнозные результаты (на основе моделирования) формирования стружек на различных участках обработки профиля колеса спроектированной колёсотокарной пластиной. Даны результаты компьютерного моделирования тангенциальной режущей пластины с позиций обеспечения эффективного стружкодробления.

**Summary.** The article presents studies of the cutting process with computer simulation. The authors provide predictable results (based on modeling) of the formation of chips in various sections of the processing of the wheel profile when processing the designed wheel plate. Results of computer simulation of a tangential cutting insert are given from the standpoint of ensuring effective chip breaking.

**Ключевые слова:** стружка, топография, плата, температура, программное обеспечение.

**Key words:** chips, topography, plate, temperature, software.

УДК 621.9

Каждая из ведущих мировых инструментальных фирм выпускает линейку тангенциальных пластин с различной геометрией и топологией передней поверхности. Это сделано для того, чтобы обеспечить выбор платины, наиболее эффективной для конкретных условий её эксплуатации. Общим для них недостатком является образование стружки сливной формы при обработке отдельных участков профиля катания колеса вагона. Доля такой стружки различна. Но сам факт её наличия ставит задачу совершенствования пластин. На это направлена данная работа.

Топология пластин у разных производителей отличается несущественно. Принципиальным для всех основных решений является наличие выступов, впадин, уступов и т.д.

**Целью работы** является снижение доли сливной стружки за счёт совершенствования топографии передней поверхности платины.

Методологическое обеспечение состояло из нескольких раздельных, но взаимосвязанных аспектов. Основными аспектами являлись следующие:

1. Выбор эффективного варианта конструкции колёсотокарной тангенциальной пластины из множества возможных вариантов снижения вероятности образования стружки сливного типа без ухудшения качества и производительности обработки (осуществлялся методом компьютерного моделирования [1]).

2. Выбор эффективного покрытия для основы (субстрата) режущей пластины на основе компьютерного моделирования [2].

3. Выбор типа программного обеспечения для компьютерного моделирования.

4. Выбор критериев, по которым можно адекватно оценивать результаты компьютерного моделирования.

Сравнивали два типа программного обеспечения: ANSYS и DEFORM. Предпочтение отдано DEFORM потому, что в этом программном обеспечении каждый сохранённый шаг может использоваться в качестве начального шага для дальнейшего расчёта, а также можно создать новую задачу и импортировать деформированный объект с последнего шага первого перехода.

Пример проведённого численного компьютерного эксперимента путём имитационного моделирования процесса точения пластиной представлен на рис. 1 в виде стоп-кадра положения поверхности обрабатываемого колеса и пластины.

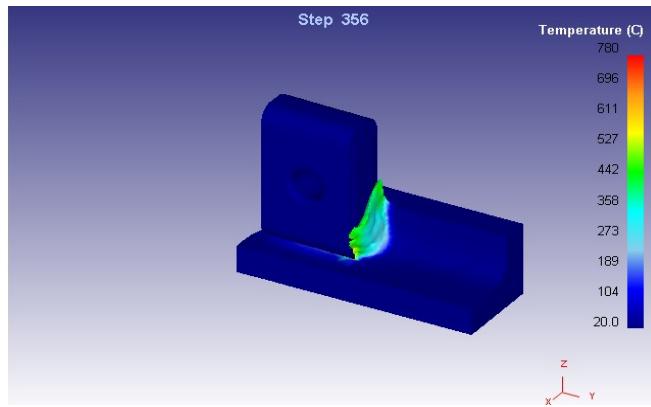


Рис. 1. Иллюстрация распределения температуры в процессе резания

Кинетика температуры в начальный период точения с разной глубиной резания показана на рис. 2.

Проведённые численные компьютерные эксперименты путём имитационного моделирования (робастного проектирования) процесса точения позволили спроектировать несколько конкурентных конструкций пластин. Результаты по одной из них изложены ниже.

Методом прототипирования на 3D-принтере изготовлено несколько пластиковых моделей режущей пластины (см. рис. 3), что позволило проверить её габаритные и прочие параметры при установке в кассету резца [3].

Численным компьютерным имитационным моделированием выявлены участки на обрабатываемой поверхности колеса, где возможно образование сливной стружки при использовании спроектированной пластины, и выявлены её доли (см. рис. 4). На левой части рис. 4 представлена 3D-модель спроектированной пластины. Криволинейной линией на правой части рис. 4 показано масштабное изображение профиля колеса железнодорожного грузового вагона. Жирной линией на ней выделены участки профиля колеса (фаска и галтель), на которых доля образования сливной стружки превышает 1 %, на остальных участках профиля сливная стружка не может образоваться либо её доля от 0,1 % до 0,5 %. Эти доли иллюстрированы жирными вертикальными линиями на графике «Доля сливной стружки – участок профиля катания колеса». Сопоставление полученных результатов с результатами эксплуатируемых пластин отечественного и импортного производства указывает на преимущества данной пластины за счёт более удачной топографии её передней поверхности.

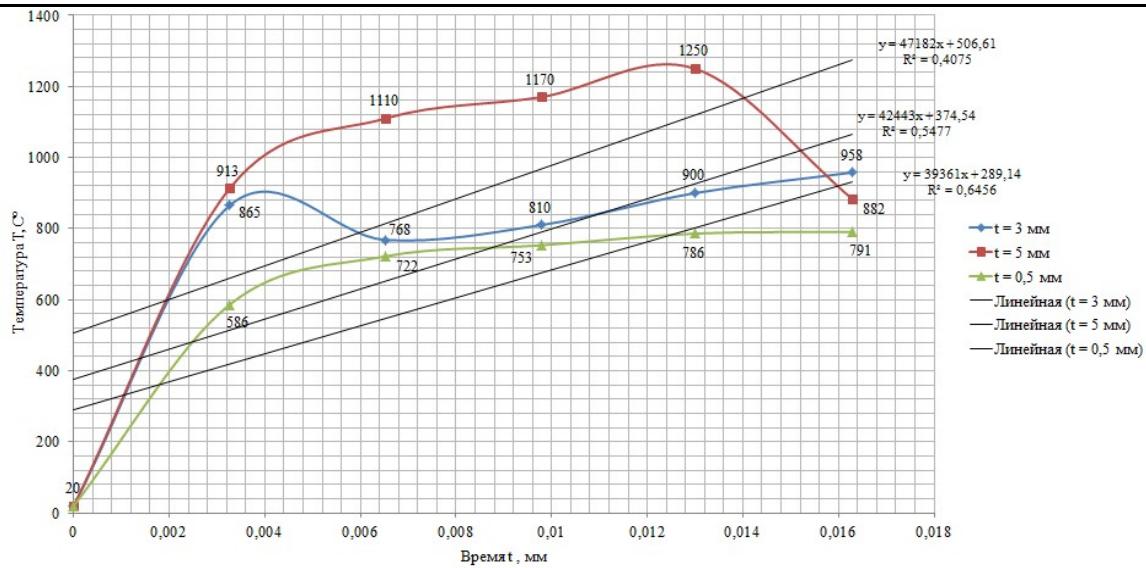


Рис. 2. График изменения температуры от времени в процессе врезания пластины в материал колеса (кривые линии – результат имитационного моделирования, прямые линии – их соответствующая упрощённая иллюстрация)



Рис. 3. Пластиковые модели разработанной пластины

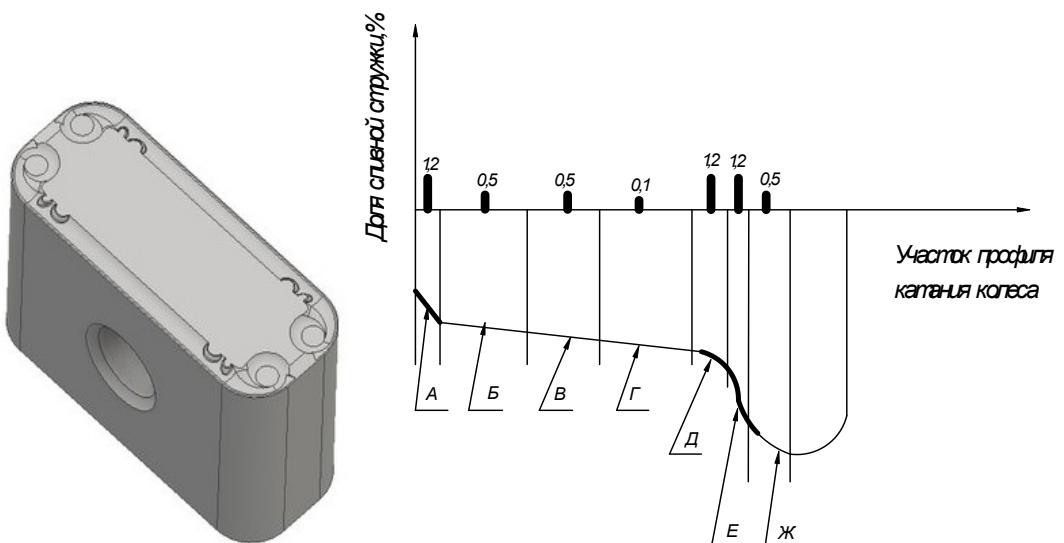


Рис. 4. 3D-модель пластины и прогнозные результаты её использования с позиций вероятности образования сливной стружки

### **Вывод**

На основании вышеизложенного комплекса теоретико-экспериментальных исследований предложены научно обоснованные технологические и технические решения, направленные на повышение эксплуатационных свойств колёсотокарной пластины, использование которой вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса. В частности, выполнено усовершенствование топографии передней поверхности пластины, позволяющей снизить долю образования стружки сливной формы, что может дать экономический эффект в размере 640 000 руб. применительно к одному вагонному депо [4].

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Евсеев, Д. Г. Прогрессивный инструмент для обточки колесных пар / Д. Г. Евсеев, А. Ю. Попов // Автоматизация и современные технологии. – 1998. – № 9.
2. Новый сплав для обработки колесных пар / Б. В. Захаров [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 1997. – № 4. – С. 59-60.
3. Пат. РФ 134466, МПК B23B 27/16 на полезную модель «Пластина колесотокарная чашечная / Алтухова В. В., Мокрицкий Б. Я., Тарануха Г. В.; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. – № 2013107816/02; заявл. 21.02.2013; опубл. 20.11.2013. Бюл. № 32.
4. Мокрицкий, Б. Я. Управление эффективностью применения металлорежущего инструмента: моногр. / Б. Я. Мокрицкий, Т. И. Усова, Я. В. Конюхова. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2017.

**МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**  
**METALLURGY AND MATERIALS**

**Ким В. А., Сулейманов Р. И., Джемилов Э. Ш.**  
**V. A. Kim, R. I. Suleymanov, E. Sh. Dzhemilov**

**ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПРИ СВЕРЛЕНИИ БРОНЗЫ БрA9-ЖЗЛ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ АКТИВИРОВАННЫХ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД**

**RESEARCH OF PROCESSING QUALITY WHEN DRILLING BRONZE BrA9-ZHZN  
WITH APPLICATION OF LUBRICATING AND COOLING PROCESS MEANS**

**Ким Владимир Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: sinerg@mail.ru.

**Mr. Vladimir A. Kim** – Doctor of Engineering, Professor, Materials Technology and New Materials Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Russia, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin str., 27. E-mail: sinerg@mail.ru.

**Сулейманов Ришат Ибраимович** – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Крымского инженерно-педагогического университета (Россия, Симферополь); 295015, Россия, г. Симферополь, пер. Учебный, 8. E-mail: surechat@mail.ru.

**Mr. Rishat I. Suleymanov** – PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Crimean Engineering and Pedagogical University (Russia, Simferopol); 295015, Russia, Simferopol, Uchebnii per., 8. E-mail: surechat@mail.ru.

**Джемилов Эшреб Шефикович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Крымского инженерно-педагогического университета (Россия, Симферополь); 295015, Россия, г. Симферополь, пер. Учебный, 8. E-mail: eshreb@mail.ru.

**Mr. Eshreb Sh. Dzhemilov** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Crimean Engineering and Pedagogical University (Russia, Simferopol); 295015, Russia, Simferopol, Uchebny per., 8. E-mail: eshreb@mail.ru.

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований влияния механической активации смазочно-охлаждающих технологических средств, модифицирующей физико-химические свойства и структуру СOTC, на процесс резания и контактного взаимодействия при сверлении литейного бронзового сплава БрA9-ЖЗЛ. Показано, что процессы механической обработки с применением активированных смазочно-охлаждающих технологических сред при их доставке в зону резания с помощью устройств минимальной смазки позволяют значительно повысить проникающую и смазывающую способность масел, которые приводят к снижению осевой силы и крутящего момента при сверлении и повышению качества обработанной поверхности.

**Summary.** The article presents research results of the effect of mechanical activation of oil lubricating-cooling process means, modifying its physical and chemical properties and structure, on the cutting process and contact interaction when bronze cast alloy BrA9-ZhZL drilling. It is shown that mechanical processes using activated lubricating-cooling technological means during their delivery to the cutting zone using minimal lubrication devices can significantly increase the penetrating and lubricating ability of oils, which lead to a decrease in axial force and torque when drilling and to improve the quality of processed surface.

**Ключевые слова:** масляные смазывающие-охлаждающие технологические средства растительной природы, силы резания, механическая активация, бронзовый сплав, сверление.

**Key words:** oil lubricating and cooling technological means of plant nature, cutting forces, mechanical activation, bronze alloy, drilling.

УДК 621.91.01

## Введение

Бронзы обладают повышенными прочностными свойствами, поэтому их механическая обработка сопровождается интенсивным изнашиванием режущего инструмента за счёт высоких температур и сил резания [1].

С повышением температуры в зоне резания происходят структурные изменения инструментального материала, приводящие к структурной деградации, снижению его твёрдости и износостойкости [2], что в свою очередь приводит к сокращению периода стойкости инструмента и ухудшению качества обработанной поверхности.

Смазочно-охлаждающие технологические среды (СОТС) являются важной составляющей процесса резания, обеспечивающей производительность, качество механической обработки, стойкость и надёжность режущего инструмента за счёт моющего, охлаждающего и смазывающего эффектов [3]. СОТС активно влияет на характер пластической деформации и разрушение срезаемого слоя и в значительной степени определяет физико-механические свойства и структуру обработанной поверхности.

СОТС подразделяются на жидкие, пластичные, твёрдые и газообразные. В их состав входят поверхностно-активные вещества (ПАВ) и различные присадки, улучшающие их технологические свойства [1; 3; 6; 7]. СОТС должна обладать хорошей теплопроводностью для ускорения теплоотвода из зоны резания и хорошим смазочным действием для уменьшения трения [4].

Интенсификация процессов резания металлов за счёт активизации внутренних резервов действия СОТС описана в работе [5], в которой автор раскрывает действие ПАВ, содержащихся в технологических жидкостях, способствующих уменьшению величины прикладываемой силы, необходимой для разрушения поверхностного слоя, облегчая тем самым условия пластического деформирования и разрушения срезаемого слоя.

На сегодняшний день одним из важных показателей применения на производстве СОТС становится учёт экологических, технологических и экономических факторов. Возросшие требования к санитарно-гигиеническому состоянию предприятиям, использующим в производственном процессе экологически небезопасные СОТС, их токсическое воздействие на окружающую среду и людей [8] приводят к возрастанию финансовых затрат на их хранение и дальнейшую утилизацию и добавляют до 30 % к себестоимости продукции [9].

Экологическая безопасность технологических процессов становится всё актуальнее и приводит к широкому применению малоотходных, безотходных технологий, вторичному обороту материалов, использованию новых технологий подготовки и активации СОТС, доставки в зону резания (техника минимальной смазки) и их утилизации.

В последнее десятилетие наблюдается тенденция применения СОТС на основе растительных масел, которые по сравнению с минеральными маслами обладают большей смачивающей способностью, использование которых оправдано высоким биологическим разложением и экологичностью [10].

Существует большое количество исследований в области подготовки и использования СОТС в зависимости от материала детали, технологий обработки, режущего инструмента, методов доставки и подачи в зону резания на различных операциях, которые широко применяются на практике.

В статье приведены результаты анализа современных методов подготовки (активации) СОТС, оценка эффективности их механической активации при подаче в зону резания в аэрозольном состоянии и влияние на силы резания при обработке отверстий в заготовках из железистой бронзы БрА9-ЖЗЛ.

## Методика исследования

Различные подходы к методам активации СОТС описаны в работах С. Г. Энтелиса [7], Е. Г. Бердичевского [10], В. В. Маркова [11]. В настоящее время в практике использования активированных СОТС широкое распространение получили физические и химические методы активации, которые рассматривались в работах [12; 13].

Механическая активация СОТС предполагает её доставку в зону резания под большим давлением с помощью специального устройства. Вследствие внешнего энергетического воздействия на молекулы увеличивается их проникающая способность в зону контакта срезаемого слоя с режущим инструментом [14; 15].

Химическая активация осуществляется введением в СОТС функциональных присадок, различных по природе и химическому строению, которые изменяют строение молекул.

Термическая, электрическая, ультразвуковая активации, включая методы намагничивания, ионизирующего облучения и введения в состав СОТС модифицированных энергоёмких эндотермических присадок, описаны в работе [16].

Вышеперечисленные методы являются достаточно энергоёмкими, а химическая активация СОТС требует значительных материальных затрат на утилизацию и приводит к загрязнению окружающей среды продуктами распада химически активных веществ, входящих в их состав.

В работе [17] рассматривается влияние механической активации на дисперсность технологических жидкостей в зависимости от различных режимов смешивания. Существуют различные модели механических активаторов для подготовки технологических жидкостей перед использованием [18].

В работе использовался механический способ активации СОТС с помощью усовершенствованного механического активатора типа двулопастной мешалки, который позволяет увеличить эффективность смешивания и диспергирования жидкости за счёт одновременного использования центробежных и вертикальных сил (см. рис. 1) [19].



Рис. 1. Механический активатор

Механически активированная СОТС транспортировалась в зону резания способом минимальной смазки, т.е. путём распыления и подачи её в зону обработки под аэродинамическим давлением.

Режимы резания при сверлении заготовок из сплава БРА9-ЖЗЛ с учётом использования масляных СОТС приняты согласно рекомендациям [20; 21].

Эксперименты проводились на радиально-сверлильном станке мод. 2К522, оснащённом трёхкомпонентным датчиком М30-3-бк с возможностью вывода сигнала на ПК и позволяющем одновременно измерять осевую силу  $P_o$  и крутящий момент  $M_{kp}$ . В качестве режущего инструмента использовали сверло спиральное из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 8,6 мм, углом заточки  $2\varphi = 135^\circ$ .

Параметры качества обработанной поверхности определялись с помощью портативного измерителя шероховатости TR200, а величина износа инструмента измерялась инструментальным микроскопом модели «UWM» фирмы Mitutoyo.

### Полученные результаты и их анализ

В табл. 1 приведены результаты экспериментальных измерений сил и крутящих моментов при сверлении бронзы с использованием различных СОТС.

Результаты измерений износа режущего клина и шероховатости обработанной поверхности представлены табл. 2.

Анализ полученных результатов (см. табл. 1) показывает, что применение СОТС на масляной основе понижает осевую силу резания и крутящий момент при сверлении, а механическая активация СОТС приводит к дополнительному уменьшению этих показателей.

Механическая активация масляных СОТС приводит к растворению в них кислорода воздуха и разбивке молекул масла на более мелкие фрагменты. В результате повышается проникающая способность СОТС в микрополоски контактно-фрикционного взаимодействия, что обеспечивает переход сухого трения в граничное, а граничного – в жидкостное.

Сопутствующим процессом контактного взаимодействия при резании является активное тепловыделение. Эти процессы наиболее интенсивно протекают при сверлении, т.к. сердцевина

сверла не столько режет, сколько пластически деформирует. В результате высокой температуры наблюдается термодеструкция масла и молекул ПАВ. При наличии укороченных углеводородных молекул их термодеструкция происходит при меньшей энергии активации и более активном поглощении тепловой энергии, т.е. более интенсивные процессы термодеструкции молекул активированных СOTC сильнее разгружают в тепловом отношении деформационную зону стружкообразования.

Таблица 1

Осевая сила резания и крутящий момент при сверлении сплава БрА9-ЖЗЛ  
( $\pi = 1000$  об/мин,  $s = 3,2$  мм/об,  $t = 4,3$  мм)

Вид взаимодействия	Сухое резание	Минеральное масло (Shell Garia 404)		Двухкомпонентная СOTC (Рапсовое масло + Подсолнечное масло)	
Тип соединений	—	Предельные разветвлённые и неразветвлённые углеводороды		Триглицериды непредельных карбоновых кислот	
Функциональная группа	—	Отсутствует		Сложноэфирная	
Тип взаимодействия	Сухое трение	Граничное трение		Граничное трение + эффект Ребиндера	
Активация		Без активации	Время активации 20 мин	Без активации	Время активации 20 мин
Осевая сила $P_o$ , Н	860	845,5	823,4	800	735
Крутящий момент $M_{kp}$ , Нм	2,6	2,5	2,44	2,39	2,3

Продукты термодеструкции СOTC оказывают дополнительное влияние на процессы контактно-фрикционного взаимодействия. Выделяющийся углерод, осаждаясь на свежеобразованную поверхность стружки и поверхность обработанного отверстия, начинает играть роль твёрдой смазки, а кислород, вступая в химическую реакцию с металлом, формирует оксидные слои с низкими триботехническими характеристиками. В результате происходит снижение коэффициента трения и падение силовых и энергетических показателей контактно-фрикционного взаимодействия.

Укороченные молекулы СOTC и ПАВ, полученные в результате механической активации, обладают более высокими адсорбционными свойствами. В результате эффект Ребиндера проявляется сильнее, а это приводит к снижению силовых режимов деформационного процесса, сопутствующего процессу сверления. Следствием этого является снижение осевых сил и моментов резания.

Полученные результаты исследований свидетельствуют о снижении износа инструмента по задней поверхности в среде механически активированного двухкомпонентного СOTC растительного происхождения по сравнению с минеральным маслом и повышении качества обработки.

В табл. 2 приведены изображения фасок износа свёрл по задней поверхности и шероховатость обработанных отверстий. Видно, что при использовании СOTC происходит уменьшение ширины фаски износа, при этом меняется не только его величина, но и характер распределения по длине режущей кромки. Равномерное распределение износа указывает на выравнивание и снижение контактно-фрикционных напряжений и тепловых потоков. Механическая активация СOTC приводит к ещё более низкому износу и его более равномерному распределению по длине режущей кромки.

Установлено снижение шероховатости при использовании СOTC по сравнению с сухим резанием и дополнительное уменьшение этого показателя при использовании механически активированных СOTC.

Таблица 2

Шероховатость ( $L = 4$  мм – глубина измерения) и величина износа инструмента

СOTC	Износ режущей кромки по задней поверхности	Фотографии образцов		R <sub>a</sub> , мкм
	Сверление отверстия в сухую			1,543
Минеральное масло марки Shell Garia 404				1,487
Двухкомпонентное СOTC				1,355
Двухкомпонентное СOTC активированное				1,199

### Вывод

Механическая активация СOTC является инновационным методом повышения их смазывающих, проникающих и адсорбционных свойств, а способ минимальной смазки (подачи СOTC в зону резания в распылённом состоянии) дополнительно повышает их технологическую эффективность, экологическую безопасность и санитарную гигиеничность.

Установлено, что механическая активация СOTC и способ минимальной смазки понижают осевую силу и момент резания при сверлении и повышают качество обработки за счёт уменьшения шероховатости обработанной поверхности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Энтелис, С. Г. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием / С. Г. Энтелис. – М.: Машиностроение, 1986. – 351 с.
2. Грановский, Г. И. Резание металлов: учеб. для машиностроительных и приборостроительных специальностей вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.
3. Худобин, Л. В. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке / Л. В. Худобин, Е. Г. Бердичевский. – М.: Машиностроение, 1977. – 189 с.
4. Справочник по технологии резания металлов. В 2 кн. Кн. 1 / Ред. нем. изд.: Г. Шпур, Т. Штаферле; пер. с нем. В. Ф. Колотенкова и др.; под ред. Ю. М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 1985. – 616 с.
5. Ребиндер, П. А. Поверхностные явления в твёрдых телах в процессе их деформации и разрушения / П. А. Ребиндер, Е. Д. Щукин // Успех физических наук. – 1972. – Т. 108. – Вып. 1, сент. – С. 3-41.
6. Дальский, А. М. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2 / А. М. Дальский, А. Г. Суслов, А. Г. Ко- силова. – М.: Машиностроение, 2001. – 944 с.
7. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справ. / под ред. С. Г. Энтелиса, Э. М. Берлинера. – М.: Машиностроение, 1995. – 352 с.
8. Касимов, Л. Н. Ресурсосберегающие технологии механической обработки труднообрабатываемых материалов: моногр. / Л. Н. Касимов. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2003. – 182 с.
9. Якубов, Ч. Ф. Упрочняющее действие СOTC при обработке металлов резанием / Ч. Ф. Якубов. – Симфе-рополь: СГТ, 2008. – 156 с.
10. Бердичевский, Е. Г. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов: справ. / Е. Г. Бердичевский. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
11. Марков, В. В. Повышение эффективности и экологической безопасности лезвийного резания путём применения энергетической активации и оптимизации состава присадок СOTC: дис. ... доктора техн. наук: спец. 05.03.01 / Марков В. В. – Иваново, 2004. – 406 с.
12. Латышев, В. Н. Исследование механических процессов и эффективности применения смазочных средств при трении и обработке металлов: дис. ... доктора техн. наук: спец. 05.03.01 / Латышев В. Н. – М., 1973. – 412 с.
13. Латышев, В. Н. Повышение эффективности СOTC / В. Н. Латышев. – М.: Машиностроение, 1975. – 88 с.
14. Debnath, S. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a Review / S. Debnath, M. M. Reddy, Yi Q. S. // Journal of Cleaner Production. – 2014. – Vol. 83. – Pp. 33-47.
15. Кирейнов, А. В. Современные тенденции применения смазочно-охлаждающих технологических средств при лезвийной обработке труднообрабатываемых материалов / А. В. Кирейнов, В. Б. Есов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2017. – № 2 (62). – С. 1-15.
16. Анализ методов активации СOTC при обработке металлов резанием / Д. У. Абдулгазис, У. А. Абдулга-зис, Э. Э. Ягъяев, Э. Д. Умеров // Учёные записки Крымского инженерно-педагогического университета. Технические науки. – 2013. – Вып. 38. – 110 с.
17. Марков, В. В. Влияние способа перемешивания технологических жидкостей на их структуру / В. В. Марков, Е. В. Киселева // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 3. – С. 1-3.
18. Худобин, Л. В. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке / Л. В. Худобин, Е. Г. Бердичевский. – М.: Машиностроение, 1977. – 189 с.
19. Лосева, М. В. Интенсификация процесса приготовления технологической жидкости: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Лосева Марина Валентиновна. – Иваново, 2005. – 16 с.
20. Нефедов, Н. А. Сборник задач по резанию металлов и режущему инструменту / Н. А. Нефедов, К. А. Осипов. – М.: Машиностроение, 1990. – 422 с.
21. Коган, Б. И. Выбор смазывающе-охлаждающих технологических средств (СOTC) при обработке материалов резанием: учеб. пособие / Б. И. Коган. – Кемерово: КузГТУ, 2004. – 85 с.



Ким В. А., Фадеев В. С., Афанасьева А. А.  
V. A. Kim, V. S. Fadeev, A. A. Afanaseva

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НОВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

### STUDY OF COMPOSITION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF NEW COMPOSITE FRICTION MATERIAL

**Ким Владимир Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sinerg@mail.ru.

**Mr. Vladimir A. Kim** – Doctor of Engineering, Professor of Department of Materials Technology and New Materials Technology, Komsomolsk-na-Amure University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sinerg@mail.ru.

**Фадеев Валерий Сергеевич** – доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «РОМБ». E-mail: infotech.mos@gmail.com.

**Mr. Valeriy S. Fadeev** – Doctor of Engineering, Professor, General Director of JSC «ROMB». E-mail: infotech.mos@gmail.com.

**Афанасьева Анна Алексеевна** – аспирант кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: cheza91@mail.ru.

**Ms. Anna A. Afanaseva** – PhD Candidate of the Department of Materials Technology and New Materials Technology, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: cheza91@mail.ru.

**Аннотация.** Разработан новый композиционный фрикционный материал, изготавливаемый методом порошковой металлургии на основе железной матрицы с медными включениями, а также трёх видов наполнителей: оксида кремния для повышения фрикционных свойств, меди и графита в качестве твёрдых смазок и сульфата бария для повышения технологичности порошковой смеси. В результате реализации факторного планирования эксперимента установлена роль каждого компонента фрикционного материала на его функциональные свойства. Показано, что фрикционные и диссипативные свойства материала определяются плотностью зёренных и субзёренных границ. С повышением средней плотности границ микроструктурных объектов коэффициент трения и способность фрикционного материала рассеивать тепловую энергию от работы трения возрастает.

**Summary.** A new composite friction material, produced by powder metallurgy, based on an iron matrix with copper inclusions, as well as three types of fillers: silicon oxide to enhance the friction properties, copper and graphite – as solid lubricants and barium sulfate to improve the processability of the powder mixture. As a result of the implementation of factor planning of the experiment, the role of each component of the friction material on its functional properties is established. It is shown that the friction and dissipative properties of the material are determined by the density of grain and subgrain boundaries. With an increase in the average density of the boundaries of microstructural objects, the friction coefficient and the ability of the friction material to dissipate thermal energy from friction increases.

**Ключевые слова:** композиционный фрикционный материал, порошковая металлургия, коэффициент трения, износостойкость, твёрдость, микроструктура, средняя плотность границ, диссипация, износостойкость.

**Key words:** composite friction material, powder metallurgy, friction coefficient, wear resistance, hardness, microstructure, average density of boundaries, dissipation, wear resistance.

УДК 621.113

Фрикционные материалы в механических диссипативных системах должны обладать комплексом физико-механических свойств, в частности, повышенным коэффициентом трения, высокой износостойкостью, теплостойкостью, термохимической устойчивостью и способностью рас-

сезивать выделяющееся тепло от работы трения. Структура композиционных фрикционных материалов, получаемых методом порошковой металлургии, состоит из металлической, керамической и полимерной матрицы или их комбинаций и трёх видов включений, повышающих технологические свойства порошковых смесей, выполняющих роль фрикционных добавок и твёрдых смазок [1; 2].

ООО «ИнфоТех» разработало новый композиционный фрикционный материал (КФМ), изготавливаемый методом порошковой металлургии, для фрикционных муфт стрелочных электроприводов [3]. КФМ состоит из железной матрицы с медными включениями и наполнителей. Состав наполнителей: оксид кремния используется для повышения фрикционных свойств КФМ, сульфат бария – для улучшения противозадирных свойств материала, медь и графит – в качестве твёрдых смазок, цинк и графит – для упрочнения медной и железной фаз, стеарат цинка – для улучшения формования и прессования порошковой смеси. Медные включения располагаются по границам железных зёрен, с которыми образуют единый объёмный каркас и повышают теплопроводность материала [3; 4]. Важной структурной составляющей КФМ являются сквозные поры, которые можно использовать как транспортные каналы для подачи охлаждающего газа или жидкости.

В статье представлены результаты исследования влияния состава фрикционного материала на его структурную организацию и функциональные свойства, выполненные с использованием компьютерной количественной обработки изображений микроструктур и факторного планирования экспериментов.

#### **Факторное планирование эксперимента и методика исследования**

Исследования выполнялись с использованием трёхфакторного планирования эксперимента. Содержание графита и стеарата цинка оставалось постоянным и составляло соответственно 3,0 и 1,0 %. Варьируемыми факторами являлись весовые массовые концентрации меди, оксида кремния, сульфата бария, а остальное количество – железо. Уровни варьирования этих факторов и их кодировочные значения приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Уровни варьирования факторов и их кодировочные значения

Фактор	Cu		SiO <sub>2</sub>		BaSO <sub>4</sub>	
	Массовая доля, %	Код X <sub>1</sub>	Массовая доля, %	Код X <sub>2</sub>	Массовая доля, %	Код X <sub>3</sub>
Верхний уровень	30,0	+1	5,0	+1	3,0	+1
Средний уровень	22,5	0	4,0	0	2,25	0
Низкий уровень	15,0	-1	3,0	-1	1,5	-1

Кодировка переменных факторов производилась по формуле

$$X_n = 1 - \frac{2(x_{n,\max} - x_n)}{x_{n,\max} - x_{n,\min}}, \quad (1)$$

где  $x_n$  – значения  $n$ -го переменного фактора.

Матрица планирования трёхфакторного эксперимента при двухуровневом варьировании представлена в табл. 2.

Уравнение регрессии в закодированных параметрах представляет линейный полином вида

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3.$$

Коэффициенты уравнения регрессии вычислялись по формуле

$$a_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{ji} Y_i),$$



где  $i$  – число экспериментов (количество строк в матрице планирования);  $j$  – индекс независимой переменной ( $j = 0, 1, 2, 3$ ).

Таблица 2

Матрица планирования и результаты эксперимента

№ эксперимента	Варьируемые факторы			Результаты эксперимента				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	Средняя плотность границ	Пористость	НВ	Относительная износостойкость	Коэффициент трения
1	+1	+1	+1	$Y_{11}$	$Y_{21}$	$Y_{31}$	$Y_{41}$	$Y_{51}$
2	-1	+1	+1	$Y_{12}$	$Y_{22}$	$Y_{32}$	$Y_{42}$	$Y_{52}$
3	+1	-1	+1	$Y_{13}$	$Y_{23}$	$Y_{33}$	$Y_{43}$	$Y_{53}$
4	-1	-1	+1	$Y_{14}$	$Y_{24}$	$Y_{34}$	$Y_{44}$	$Y_{54}$
5	+1	+1	-1	$Y_{15}$	$Y_{25}$	$Y_{35}$	$Y_{45}$	$Y_{55}$
6	-1	+1	-1	$Y_{16}$	$Y_{26}$	$Y_{36}$	$Y_{46}$	$Y_{56}$
7	+1	-1	-1	$Y_{17}$	$Y_{27}$	$Y_{37}$	$Y_{47}$	$Y_{57}$
8	-1	-1	-1	$Y_{18}$	$Y_{28}$	$Y_{38}$	$Y_{48}$	$Y_{58}$
9	0	0	0	$Y_{19}$	$Y_{29}$	$Y_{39}$	$Y_{49}$	$Y_{59}$

Прессование исследуемых образцов осуществлялось в твёрдосплавной пресс-форме с давлением 700 МПа на гидравлическом пресс-автомате «Dorst».

Спекание образцов проводили в высокотемпературной вакуумной печи VHT 8/18-GR в атмосфере аргона при температуре 1135 °C с последующим отжигом.

Травление металлографических шлифов осуществляли 4,0%-м раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Цифровые изображения микроструктур получали с помощью металлографического микроскопа Nikon Eclipse MA200 при увеличении 200, 400 и 1000 крат. Обработку изображений выполняли программой Image.Pro.Plus.5.1 (США), которая включала корректировку резкости, снятие контрастной маски, выделение границ с помощью фильтра Лапласа и калибровку для привязки изображения к соответствующей масштабной линейке. Затем определяли количественные показатели структурной организации материала, в частности, количество  $N$ , периметр  $P_i$  и площадь  $S_i$  всех микроструктурных объектов, зафиксированных на определённом участке металлографического шлифа площадью  $F_\phi$ . По полученным результатам рассчитывали среднюю плотность границ [5; 6; 7]:

$$q_{cp} = \frac{1}{F_\phi} \sum_{i=1}^N P_i .$$

Идентификацию отдельных фазово-структурных составляющих определяли по контрастным маскам, получаемым путём обработки изображений нетравленых шлифов по алгоритму цветовой сегментации и цветового куба. По этим контрастным маскам определяли суммарную площадь структурных составляющих на поверхности шлифа:

$$S_{sym} = \sum_{i=1}^n S_i ,$$

где  $n$  – количество микроструктурных объектов отдельных фазово-структурных составляющих, в частности железной (стальной) матрицы, медных включений и пор.

Микротвёрдость отдельных фазово-структурных составляющих определяли с помощью микротвердомера HMV (Shimadzu) при нагрузке 0,49 Н. Для этого проводили по 25 измерений

каждой структурной составляющей с последующим вычислением математического ожидания и среднеквадратичного отклонения.

Относительную износостойкость ФКМ рассчитывали по аналогии с относительной абразивной износостойкостью гетерогенного материала [8]. В качестве эталона была принята ферритная фаза с микротвёрдостью 2200 МПа.

Твёрдость по Бринеллю определяли с помощью стационарного твердомера ТН-600.

### Полученные результаты и их анализ

Некоторые микроструктуры исследуемых фрикционных материалов с различным массовым содержанием исходных химических компонентов представлены на рис. 1. На изображениях микроструктур выделяются три основные структурные составляющие фрикционного материала: стальная матрица, образующая пространственный каркас, медные прослойки, расположенные по границам стальных зёрен, и поры. Цинк как самостоятельная фаза не проявляется. С высокой вероятностью можно предполагать, что цинк полностью растворился в меди с образованием латуни в процессе спекания при температуре 1135 °C, которая выше температуры плавления меди. Идентификация графита визуально затруднена из-за тёмного фона пор. Оксид кремния и сульфат бария проявляются в виде точечных колоний в стальном каркасе и медных (латунных) включениях.

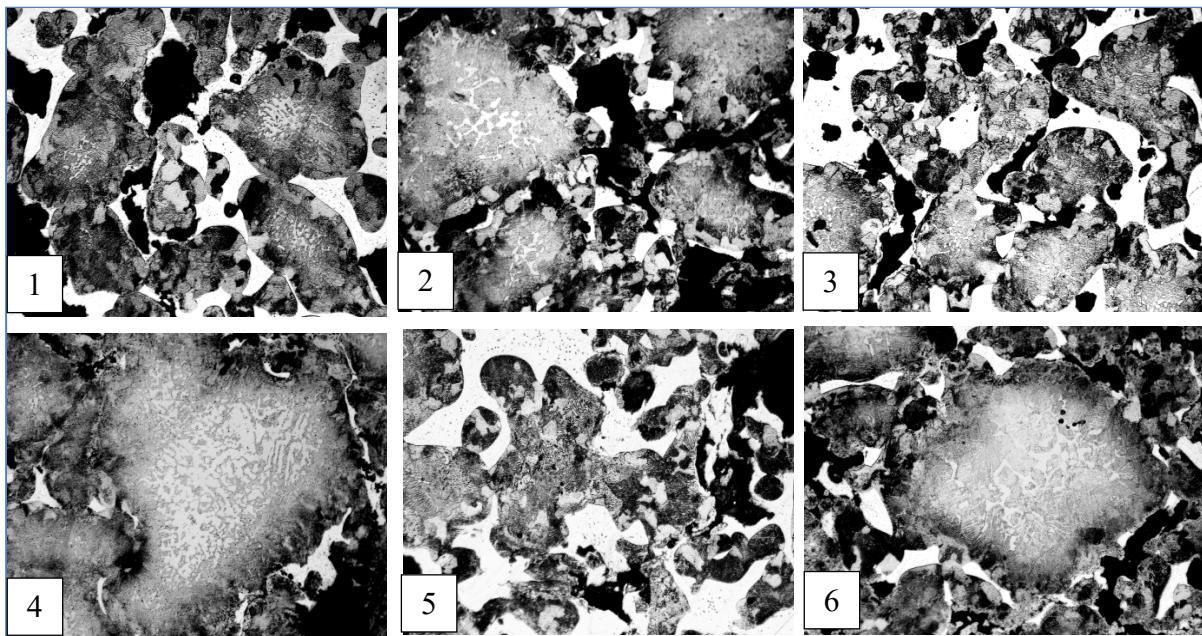


Рис. 1. Некоторые микроструктуры исследуемых композиционных фрикционных материалов. Цифры соответствуют номеру эксперимента в табл. 2

Стальная каркасная матрица состоит из отдельных зёрен, имеющих развитую субструктуру. Они состоят из ферритного ядра, окружённой перлитной оболочки, толщина которой определяется глубиной диффузии углерода в исходную ферритную частицу порошка. Субструктура в медных включениях визуально не выявляется.

В суммарную величину границ микроструктурных объектов, рассчитываемых по изображениям микроструктур, входят границы стальных зёрен, границы между стальной матрицей и медными включениями и субграницы внутри феррито-перлитной фазы.

В табл. 3 приведены результаты реализации факторного планирования экспериментов.

По ним рассчитывались уравнения регрессии в закодированном виде, в частности:

- средняя плотность границ

$$Y_1 = 0,371 - 0,028X_1 - 0,002X_2 - 0,018X_3; \quad (2)$$

- пористость

$$Y_2 = 21,86X_1 - 0,475X_2 + 0,005X_2 + 0,198X_3; \quad (3)$$

- твёрдость по Бринеллю

$$Y_3 = 767,51 - 48,75X_1 + 43,75X_2 + 18,75X_3; \quad (4)$$

- относительная износостойкость механического истирания

$$Y_4 = 1,066 - 0,144X_1 + 0,039X_2 + 0,008X_3; \quad (5)$$

- коэффициент трения

$$Y_5 = 0,433 - 0,0267X_1 + 0,0173X_2 + 0,0173X_3.$$

Таблица 3

Результаты факторного планирования эксперимента

№ экспе- римента	Результаты эксперимента				
	Средняя плотность границ, мкм <sup>-1</sup>	Пористость, %	НВ, МПа	Относительная износостойкость	Коэффици- ент трения
1	0,267	18,92	710	0,8785	0,3529
2	0,336	19,45	760	0,9349	0,4614
3	0,258	18,21	540	0,8724	0,3122
4	0,387	20,81	760	1,1063	0,4627
5	0,348	18,62	660	0,8408	0,3990
6	0,361	19,63	740	1,2673	0,3756
7	0,314	18,95	590	0,5949	0,3369
8	0,345	18,61	630	1,0291	0,349
9	0,335	21,65	750	1,0044	0,4098

Для получения уравнения регрессии в нормальном виде преобразуем уравнения (2)...(5) с помощью формул кодировки (1). В результате получаем

$$q = 0,513 - 0,004 \cdot Cu - 0,001 \cdot SiO_2 - 0,024 \cdot BaSO_4;$$

$$\Pi = 22,426 - 0,063 \cdot Cu + 0,003 \cdot SiO_2 + 0,264 \cdot BaSO_4;$$

$$HB = 747,548 - 6,484 \cdot Cu + 29,148 \cdot SiO_2 + 24,994 \cdot BaSO_4;$$

$$\varepsilon = 1,383 - 0,019 \cdot Cu + 0,026 \cdot SiO_2 + 0,011 \cdot BaSO_4;$$

$$f = 0,3937 - 0,03567 \cdot Cu + 0,1728 \cdot SiO_2 + 0,2306 \cdot BaSO_4.$$

Из анализа полученных уравнений следует, что с повышением содержания меди относительная износостойкость, средняя плотность границ и коэффициент трения снижаются. Это означает, что понижаются диссипативные свойства композиционного фрикционного материала. С повышением содержания оксида кремния и сульфата бария износостойкость и твёрдость по Бринеллю возрастают, а средняя плотность границ уменьшается.

Средняя плотность границ и субграниц является количественным показателем, характеризующим диссипативные свойства материала. Диссипация связана с процессами внутреннего трения при микролокальной пластической деформации, инициированной контактно-фрикционным взаимодействием. Пластическая деформация определяется динамикой дефектов кристаллического строения, в основном дислокаций. Торможение дислокаций и преодоление ими препятствий является сутью работы внутреннего трения, которая в дальнейшем преобразуется в тепло и рассеивается

ется. Наиболее активными барьерами торможения дислокаций являются границы и субграницы. Чем выше средняя плотность границ и субграниц, тем активнее процесс диссипации и выше коэффициент трения [9; 10].

На основании полученных результатов были построены зависимости, раскрывающие взаимосвязь между твёрдостью по Бринеллю, средней плотностью границ, относительной износостойкостью фрикционного материала к механическому истиранию и коэффициентом трения (см. рис. 2, 3 и 4).

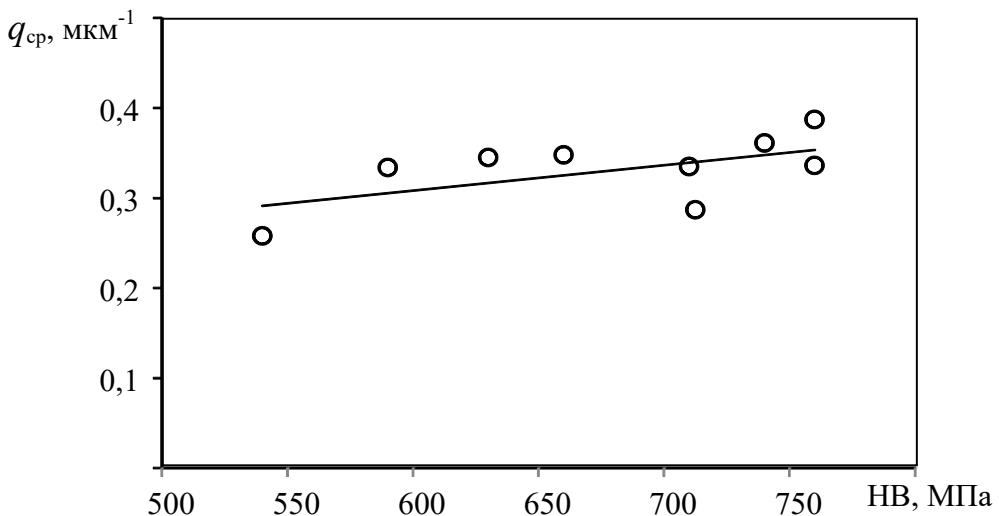


Рис. 2. Влияние твёрдости на среднюю плотность границ КФМ

С повышением средней плотности границ наблюдается тенденция повышения коэффициента трения, что подтверждает роль границ и субграниц в диссипативных процессах контактно-фрикционного взаимодействия.

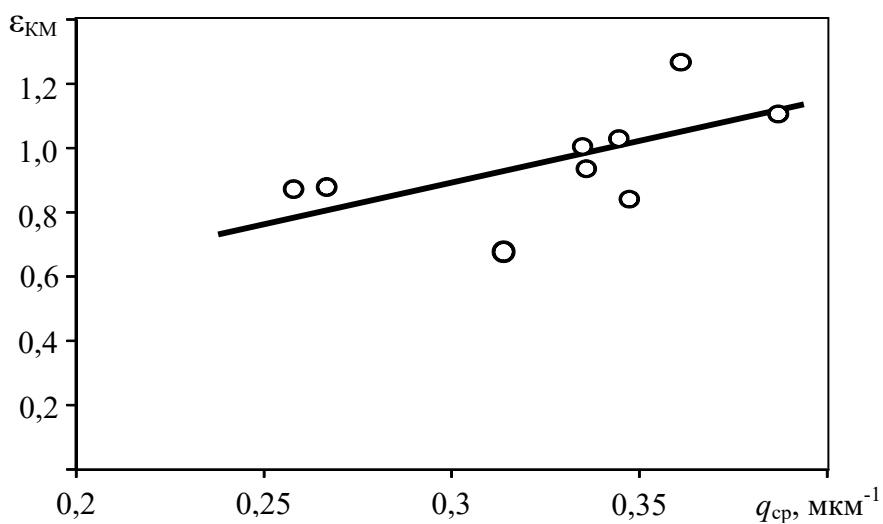


Рис. 3. Влияние средней плотности границ на относительную износостойкость КФМ механическому истиранию

### Заключение

Разработан новый композиционный фрикционный материал для диссипативных механических систем, изготавливаемый методом порошковой металлургии, в виде объёмно-каркасной железно-медной матрицы, фрикционной добавки из оксида кремния ( $SiO_2$ ), меди и графита как твёр-

дых смазок, барита ( $\text{BaSO}_4$ ) для улучшения противозадирных и технологических свойств порошкового материала и стеарата цинка для улучшения свойств порошковой смеси при прессовании и формировании.

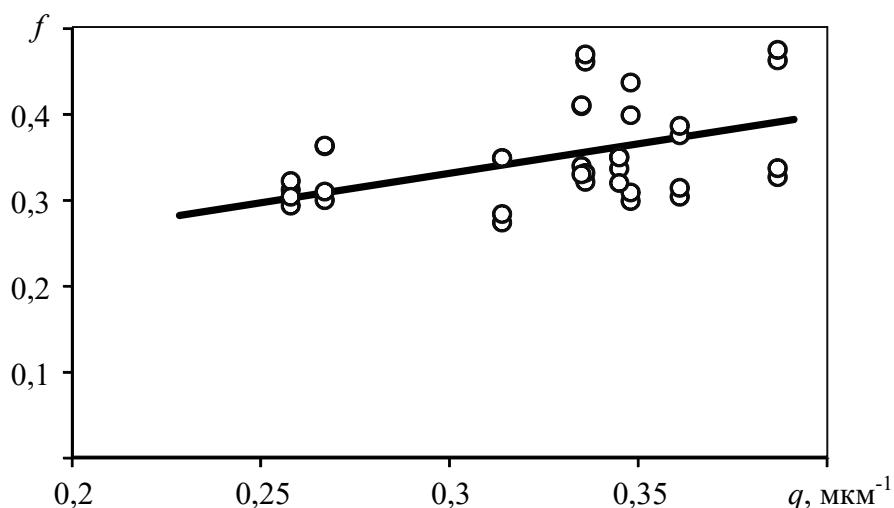


Рис. 4. Влияние средней плотности границ на коэффициент трения покоя

На основе факторного планирования эксперимента определена роль каждой структурной составляющей на функциональные свойства КФМ. Показано, что диссиликативные свойства КФМ можно оценить по средней плотности границ и субграниц.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бернацкий, В. В. Современные фрикционные материалы и их применение в тормозных системах автотранспортных средств / В. В. Бернацкий, Н. Н. Макаренко // Журнал автомобильных инженеров. – 2019. – № 4(93). – С. 32-37.
2. Нилов, А. С. Анализ фрикционных материалов и технологий изготовления тормозных колодок для высоконагруженных тормозных систем с дисками из керамического композиционного материала / А. С. Нилов, В. И. Кулик, А. П. Гаршин // Новые огнеупоры. – 2015. – № 7. – С. 57-68.
3. Пат. 2639427 РФ, МПК 51 C 22 C 33/02 C 33 C 38/16 B 22 F 3/12 B 22 F 7/00. Материал фрикционный композиционный для фрикционной муфты стрелочного электропривода / В. С. Фадеев, О. В. Штанов, Н. М. Паладин, А. В. Конаков, А. А. Афанасьева; заявитель и патентообладатель ООО «ИнфоТех». – № 2016126795; заявл. 05.07.16; опубл. 21.12.2017. Бюл. № 36. – 3 с.
4. Фадеев, В. С. Исследование микроструктуры фрикционного композиционного материала для муфт стрелочных электроприводов / В. С. Фадеев, А. А. Афанасьева, В. А. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2018. – № I-1(33). – С. 110-115.
5. Quantitative Structure-and-Energy Analysis of Heat Treatment of Structural Steel / V. A. Kim, V. V. Petrov, A. V. Butin, I. V. Belova, A. A. Shpileva // Metal Science and Heat Treatment. – 2010. – Vol. 52. – № 3-4. – P. 163-165.
6. Kim, V. A. Kinetics of structural of hardened steel 15H5M during tempering / V. A. Kim, I. V. Belova, A. V. Boutin // Modern materials and technologies. – 2013. – № 1. – P. 126-131.
7. Ким, В. А. Методика цифровой обработки изображений микроструктуры алюминиевых сплавов в среде MATLAB / В. А. Ким, О. В. Башков, А. А. Попкова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79. – № 10. – С. 34-40.
8. Хрушцов, М. М. Исследования изнашивания металлов / М. М. Хрушцов, М. А. Бабичев. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 351 с.
9. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогов. – М.: Наука, 1994. – 382 с.
10. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р. Р. Балахонов, А. В. Болеста, М. Н. Бондарь и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.

**Лукачевская И. Г., Лебедев М. П., Кычкин А. К.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ПРИМЕРЕ ТЕКСТОЛИТОВ

**Лукачевская И. Г., Лебедев М. П., Кычкин А. К.  
I. G. Lukachevskaya, M. P. Lebedev, A. K. Kychkin**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРИМЕРЕ ТЕКСТОЛИТОВ**

### **INVESTIGATION OF FILLER EFFECT ON POLYMER COMPOSITE MATERIAL PROPERTIES BY EXAMPLE OF TEXOLITES**

**Лукачевская Ирина Григорьевна** – аспирант Института физико-технических проблем Севера имени В. П. Ларионова (Россия, Якутск); 677980, Россия, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Октябрьская, 1. E-mail: mirkin1611@gmail.com.

**Mrs. Irina. G. Lukachevsky** – Graduate Student, V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North (Russia, Yakutsk); 677980, Russia, the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, 1 Oktyabrskaya str. E-mail: mirkin1611@gmail.com.

**Лебедев Михаил Петрович** – член-корреспондент Академии наук России, доктор технических наук, главный научный сотрудник Института физико-технических проблем Севера имени В. П. Ларионова (Россия, Якутск); 677980, Россия, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Октябрьская, 1. E-mail: prezidium@prez.ysn.ru.

**Mr. Michail. P. Lebedev** – Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, V. P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North (Russia, Yakutsk); 677980, Russia, the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, 1 Oktyabrskaya str. E-mail: prezidium@prez.ysn.ru.

**Кычкин Анатолий Константинович** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института физико-технических проблем Севера имени В. П. Ларионова (Россия, Якутск); 677980, Россия, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Октябрьская, 1. E-mail: kychkinplasma@mail.ru.

**Mr. Anatoli. K. Kychkin** – PHD in Engineering, Leading Researcher, V. P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North (Russia, Yakutsk); 677980, Russia, the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, 1 Oktyabrskaya str. E-mail: kychkinplasma@mail.ru.

**Аннотация.** В строительстве проявляется повышенный интерес к использованию базальтовых волокон как альтернативы традиционным полимерным композиционным материалам на основе стеклянных, органических и углеродных волокон. В связи с этим представляет интерес новая информация, раскрывающая возможности базальтопластиков как материалов конструкционного назначения. В настоящей работе исследовано влияние типа наполнителя на физико-механические свойства базальтотекстолита и стеклотекстолита. Приводится описание композитов на основе базальтового волокна и стекловолокна, получения базальтowego непрерывного волокна.

**Summary.** In construction, there is an increased interest in the use of basalt fibers as an alternative to traditional polymer composite materials based on glass, organic and carbon fibers. In this regard, new information is of interest, revealing the possibilities of basalt plastics as structural materials. In the present work, the influence of the type of filler on the physicomechanical properties of basaltotextolite and fiberglass is studied. A description is made of composites based on basalt fiber and fiberglass, to obtain basalt continuous fiber.

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал, наполнитель, базальтовое волокно, стеклянное волокно, предел прочности, изгиб, растяжение, эпоксидное связующее.

**Key words:** polymer composite material, compound product, basalt fiber, glass fiber, breaking strength, bending, tension, epoxy binder.

УДК 678.018

#### **Введение**

Промышленность всегда стремится найти новые и более качественные материалы для производства новых или усовершенствованных продуктов. Энергосбережение, охрана окружающей среды, устойчивость к коррозии являются важными факторами при изготовлении новых продук-

тов или модификации уже существующих. Рассмотрим несколько примеров с существующими проблемами в эксплуатации. Высоковольтные вышки почти с самого начала были разработаны с укреплением из стали, и в ближайшие несколько лет необходима будет их замена. Поэтому в настоящее время стоит задача разработать новый тип опоры из нового материала, который будет прочным, лёгким и иметь минимальный риск коррозии. Большая часть фонарных и телефонных столбов изготовлена из стали и дерева, существует потребность в новых материалах, которые крепче, легче и коррозиестойкие. Инженеры всегда ищут новые решения для улучшения сооружений. Одним из решений может быть новый материал, который более прочный, лёгкий и с минимальным риском коррозии. Самолётостроительная, кораблестроительная и автомобильная промышленности всегда пытаются разработать более лёгкие конструкции без потери прочности материала для энергосбережения. Энергия, необходимая для производства базальтового волокна, составляет около 5 кВт·ч/кг, а для продукта из углеродистой стали требуется около 15 кВт·ч/кг.

Вышеизложенное относится к армированным волокнам полимерам, где смола является матрицей. Одним из важных преимуществ использования армированного волокном полимера является его коррозионная стойкость. Во влажных климатических условиях, где обычная металлическая арматура постоянно подвержена коррозии, теряет свои прочностные свойства в течение короткого времени, тем самым снижая эксплуатационную прочность бетонных конструкций, композитная арматура с коррозионностойким свойством намного предпочтительнее в применении.

Композиционные материалы состоят из двух или более элементов, работающих вместе, чтобы получить свойства одного композитного материала (физического, не химического). Композиционный материал обычно состоит из матрицы и армирующего материала. Армирование обычно используется в виде волокон (например, углерода или стекловолокна), и используется для увеличения прочности и жёсткости матрицы (например, эпоксидной или полиэфирной смолы) [1].

Армирование композиционных материалов, как правило, используется для улучшения механических свойств с неразбавленной системой смолы. Наиболее распространено подкрепление волокна смолой у стекловолокна. Существуют и другие типы волокон для армирования, такие как углеродное волокно, другие пластиковые волокна и в последнее время базальтовые волокна.

Базальт может быть использован для изготовления не только базальтовых арматур, но и базальтовых тканей, нитей, непрерывных базальтовых проводов накаливания и базальтовых сеток. Области применения базальтовых композитов: армирование пластмасс и полимеров; укрепление почвы, мостов и дорог; изготовление промышленных полов; тепло- и звукоизоляция жилых и промышленных зданий; пуленепробиваемые жилеты; модернизация и реконструкция сооружений.

Производство базальтовых волокон похоже на производство стекловолокна. Базальт добывают, дробят и промывают, а затем расплавляют при температуре 1500 °C [1]. Расплавленная порода затем выдавливается через фильтр для получения непрерывных нитей базальтового волокна. Базальтовые волокна не содержат каких-либо других добавок в одном производственном процессе, что даёт дополнительное преимущество в стоимости изготовления. Известно, что базальтовые волокна имеют прочность на разрыв более чем у Е-стекловолокна, большую нагрузку разрушения, чем у углеродных волокон, а также хорошую стойкость к химическому воздействию ударной нагрузки [3].

Производители базальтовых волокон (например, ООО «Каменный век» в России) говорят, что базальтовые волокна имеют предпочтительные механические свойства, такие как более высокий предел прочности, а также более низкую стоимость производства, чем у стекловолокна [4]. ООО «Каменный Век» также отмечает, что переработка базальтовых волокон гораздо эффективнее, чем стекловолокна, и поэтому базальтовые волокна являются экологически чистыми [4]. Базальтовое волокно может быть классифицировано как устойчивый материал из-за того, что изготовлено из базальтовых волокон природного материала и при переработке базальтового волокна со смолой получается тот же материал в виде природного базальтового порошка [4].

## Экспериментальные результаты

Для исследования влияния различных типов наполнителей были изготовлены образцы базальто- и стеклотекстолита, полученные методом инфузии, путём последовательной укладки ар-

мирующего материала на форму, пропиткой трёхкомпонентным эпоксидным связующим, состоящим из ЭД-22, Изо-МТГФА, Агидол 53, и отверждением при температуре  $160\pm2$  °C в течение 4 ч.

1. Лист базальтотекстолита толщиной 5 мм состоит из 15 слоёв базальтовой ткани БТ-11П-кв-12 и 2 слоёв (первый и последний) ТБК-100П-кв-12. Плетение саржа. Содержание эпоксидного связующего в отверждённом образце составило  $20\pm0,5$  % от массы базальтотекстолита.

2. Лист стеклотекстолита толщиной 5 мм, состоящий из стеклоткани Ортекс 560 – 13 слоёв. Плетение полотняное. Содержание эпоксидного связующего в отверждённом образце составило  $13\pm0,5$  % от массы стеклотекстолита.

Для определения физико-механических свойств базальто- и стеклотекстолита полученные образцы были подвержены серии испытаний на растяжение и изгиб с применением разрывной машины «Zwick Roel Z600», тип ВРС-F0600TN.R09, серийный номер: 160088-2008 (ГОСТ 12004-81) на базе ЦКП ИФТПС им. В. П. Ларионова СО РАН.

Полученные результаты испытаний образцов базальтотекстолита и стеклотекстолита представлены на рис. 1.

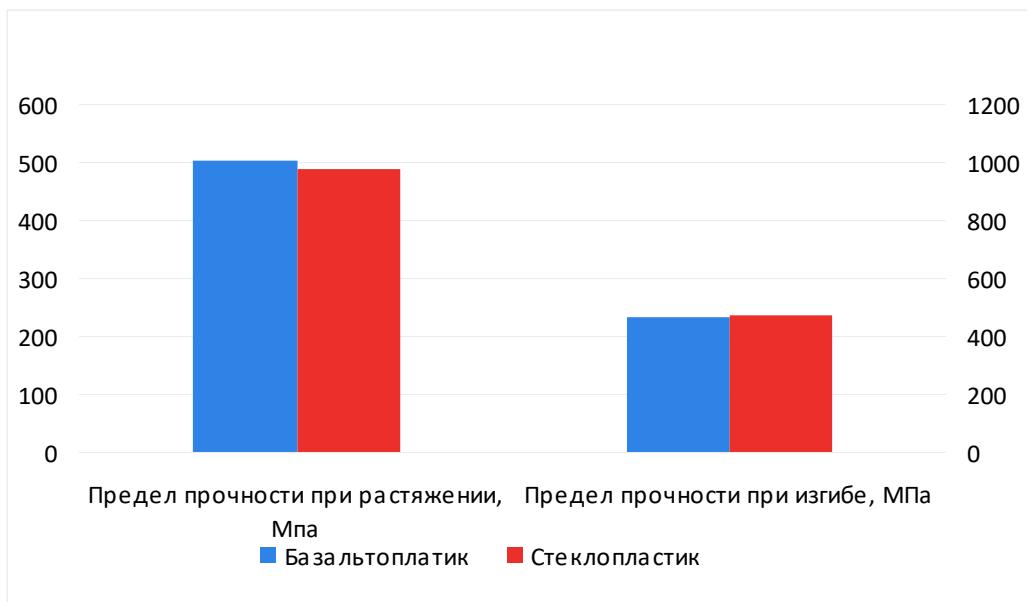


Рис. 1. Экспериментальные значения предела прочности при растяжении и изгибе образцов базальтотекстолита и стеклотекстолита

На рис. 2 представлен вид разрушенных образцов. Из снимков видно, что образцы разделяются на две части, что имеет характер разрушения вязко-упругий.

Разрушенные образцы были исследованы на стереоскопическом микроскопе «Stemi 2000-C» (Carl Zeiss, Германия, 2007), чтобы визуально оценить характер разрушения. На микрофотографиях разрушенных образцов базальтопластика (см. рис. 3) и стеклопластика (см. рис. 4) видно, что разрушение происходит в результате процесса зарождения, слияния, распространения внутренних пор и расслоения нитей тканей в зависимости от способа плетения.

Видно, что плетение по способу «саржа» показывает наилучшие адгезионные свойства между полимерной матрицей и наполнителем. При полотняном плетении расслоение происходит по всему рабочему телу образца, что указывает на низкие адгезионные свойства.

### Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что экспериментальные образцы текстолита на основе базальтовой ткани при способе плетения «саржа» обладают более высокими прочностными свойствами, в частности образцы базальтотекстолита имеют значения предела прочности  $\sigma_P = 503,05 \pm 15$  МПа, образцы стеклотекстолита имеют  $\sigma_P = 488,15 \pm 15$  МПа.

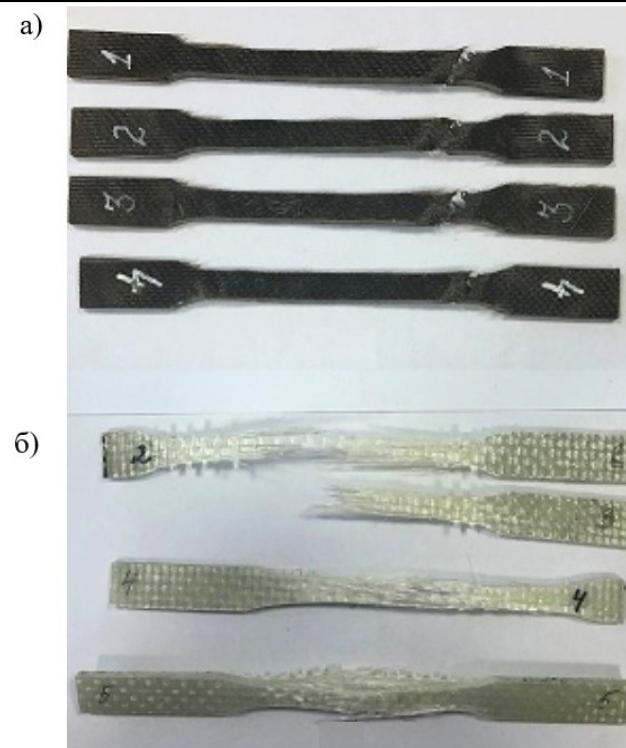


Рис. 2. Вид разрушенных образцов:  
а – базальтотекстолита, б – стеклотекстолита



Рис. 3. Микрофотография разрушенных образцов  
базальтотекстолита. Указанный масштаб соответствует 1000 мкм

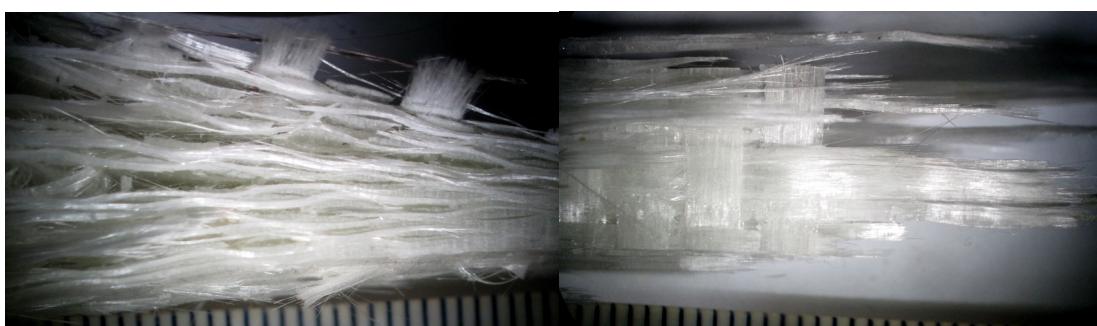


Рис. 4. Микрофотография разрушенных образцов  
стеклотекстолита. Указанный масштаб соответствует 1000 мкм

Базальтовые композитные материалы имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными продуктами из стали и другими полимерными материалами. Их лёгкий вес в сочетании со стойкостью к коррозии приведёт к экономии и устойчивости различных конструкций. Базальтопластики являются идеальным выбором для морских сооружений, прибрежных строений, парковок, мостов, дорог и строений, весьма чувствительных к коррозии, а также для водопроницаемых бетонных покрытий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соломко, В. П. Наполненные кристаллизующиеся полимеры / В. П. Соломко. – Киев: Наукова Думка, 1980. – 264 с.
2. Наполнители для полимерных композиционных материалов: справ. пособие / пер. с англ.; под ред. Г. С. Каца, Д. В. Милевски. – М.: Химия, 1981. – 736 с.
3. Ричардсон, М. Промышленные полимерные композиционные материалы / М. Ричардсон; пер. с англ.; под ред. П. Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1980. – 472 с.
4. Kamenny Vek. (2009). Advanced basalt fiber. Basfiber. Retrieved May 9, 2012 [Электронный ресурс] // URL: <http://www.basfiber.com/>.
5. Ross, A. (2006). Basalt fibers: Alternative to glass? Composites World. Retrieved May 9, 2012 [Электронный ресурс] // URL: <http://www.compositesworld.com/articles/basalt-fibers-alternative-to-glass>.
6. SP Systems. (n.d.). Guide to composites. Retrieved [Электронный ресурс] // URL: <http://www.bolton.ac.uk/codate/spguidetocomposites.pdf>.
- 7 . Sim, J., Park, C., & Moon, D. Y. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. Composites Part B: Engineering, 36(6-7), 504-512 [Электронный ресурс] // URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.02.002>.
8. ГОСТ 32656-2014. Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение. – Введ. 2015-09-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 40 с.
9. ГОСТ 25.604-82. Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – Введ. 1984-01-01. – М.: Стандартинформ, 2005. – 7 с.



Нечипас Ю. П., Загорский М. Ю.

Yu. P. Nechipas, M. Yu. Zagorsky

## К ВОПРОСАМ ОБ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ЦИФРОВОЙ ФОРМЕ

### ON ASSESSING THE QUALITY OF DIGITAL REMOTE SENSING MATERIALS

**Нечипас Юрий Павлович** – кандидат технических наук, доцент кафедры фототопографии и фотограмметрии Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: pas.yr@mail.ru.

**Mr. Yurii P. Nechipas** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Phototopography and Photogrammetry Department, Military Space Academy named after A. F. Mozhaysky (Russia, St. Petersburg). E-mail: pas.yr@mail.ru.

**Загорский Михаил Юрьевич** – кандидат технических наук, преподаватель кафедры фототопографии и фотограмметрии Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (Россия, Санкт-Петербург).

**Mr. Mikhail Yu. Zagorsky** – PhD in Technical Sciences, Lecturer, Phototopography and Photogrammetry Department, Military Space Academy named after A. F. Mozhaysky (Russia, St. Petersburg).

**Аннотация.** Данная статья носит обзорно-аналитический характер. В ней рассматриваются ретроспективно существовавшие методологические подходы в вопросах анализа качества аэро- и космических фотоматериалов дистанционного зондирования как в аналоговой, так и в цифровой формах. Приводятся атрибуты цифрового изображения и возникающие в связи с их особенностями возможные направления исследований.

**Summary.** This article has a review and analytical character. It examines retrospectively existing methodological approaches to the analysis of the quality of aerial and space remote sensing photographic materials, both in analog and digital forms. Attributes of a digital image and possible research directions arising in connection with their features are given.

**Ключевые слова:** аналоговое изображение; цифровое изображение; материалы аэрокосмических съемок; фотометрические характеристики изображений; программный комплекс «АРМ-Технолог»; гистограмма изображения.

**Key words:** analog image; digital image; aerospace survey materials; photometric characteristics of images; software complex «ARM-Technologist»; image histogram.

УДК 528.8

Более полутора веков, начиная с изобретения фотографии (1839 г. – французы Л. Дагер и Н. Ньепс), основным способом получения информации о земной поверхности являлся фотографический, или, как пишут в последнее время, аналоговый. За эти годы менялись способы фиксации изображения объектов местности (камера обскура, очувствленные фотопластинки, целлULOидные фотоплёнки (1871 г. – англ. врач Р. Меддокс)).

В XX и начале XXI вв. производилось регулярное фотографирование земной поверхности, причём в различных диапазонах спектра, с различных летательных аппаратов и спутников (последние серии «Ресурс-Ф», «Комета», «Ресурс ДК», «Ресурс-П»).

Таким образом, методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), т.е. аэросъёмка, а позднее и космическая съёмка, фактически до настоящего времени являлись основным видом аэрокосмической информации о местности.

Естественно, специалисты при рассматривании полученной информации обращают внимание в первую очередь на её качество, уясняют, какие параметры изображений нуждаются в коррекции. Потребовалась разработка в этом плане методик исследования качества изображений. К оценке качества изображений применимы в основном два критерия: субъективный – на основе

экспертных оценок и количественная оценка, связанная с нахождением абсолютных и сравнительных характеристик фотоизображений [18].

В частности, на первых порах получил широкое распространение на практике сенситометрический метод исследования аэросъёмочных материалов [8; 9; 13], который заключался в определении зависимости оптической плотности  $D$  от десятичного логарифма экспозиции  $\lg H$ , сообщаемой фотографическому слою. Тем самым была впервые установлена количественная связь между оптическим и фотографическим изображением объектов местности. Производным от этой связи являлось семейство характеристических кривых, с помощью которых получали следующие сенситометрические (фотометрические) величины [1; 13] аналогового фотоизображения:

- оптическую плотность ( $D_i, D_{\max}, D_{\min}$ );
- среднее значение оптической плотности ( $D_{cp}$ );
- плотность вуали ( $D_o$ );
- диапазон оптических плотностей ( $\Delta D$ );
- фотографическую широту ( $L$ );
- коэффициент контрастности ( $\gamma$ );
- общую и спектральную светочувствительность ( $S$  и  $S_{\lambda}$ ).

Сенситометрические исследования выполнялись не только для светочувствительных аэроплёнок, но и для аэроснимков, изготовленных на фотобумаге, и диапозитивов на стекле.

Кроме сенситометрических характеристик специалисты в данной области всегда обращали внимание ещё на оценку резкости фотоизображений. Данная характеристика является важнейшим показателем, во многом определяющим пригодность изображения к дальнейшей обработке. Оценка резкости изображения определяется резольвометрическими характеристиками. Они определяют способность фотоматериалов раздельно воспроизводить мелкие, близко расположенные детали объекта фотографирования. В результате резольвометрических испытаний определяются параметры, обуславливающие резкость фотоизображения. К ним относятся:

- максимальная разрешающая способность ( $R_{\max}$ );
- резольвометрическая широта ( $L_R$ ) как разность логарифмов экспозиций, в пределах которой изменение разрешающей способности не превышает  $0,8R_{\max}$ ;
- резольвометрическая плотность ( $D_R$ ) – оптическая плотность, соответствующая максимальному значению разрешающей способности  $R_{\max}$ .

Наряду с разрешающей способностью  $R$  используют и другой критерий, определяющий способность фотослоя воспроизводить контрасти объектов местности – пространственно-частотную характеристику (ПЧХ). Для описания ПЧХ широкое применение нашли преобразования Фурье, которые удобно применять для пространственно-частотного описания фотографируемых объектов.

Определение перечисленных выше характеристик потребовало многочисленного парка исследовательской аппаратуры, вспомогательного оборудования и принадлежностей. Для изучения и просмотра первичных фотосъёмочных материалов были созданы специальные лаборатории с монтажно-просветными столами (СМП), простейшими приборами: дешифрирования негативов (ПДН-5), приборами камерального дешифрирования фильмов (ПКДФ), интерпретоскопами, оптическими пантографами монокулярными (ОПМ-2), моно- и бинокулярными микроскопами, универсальными измерительными микроскопами (УИМ) и др.

В качестве аппаратуры для исследования характеристик и свойств фотографических материалов использовались сенситометры, денситометры, спектрографы, микроденситометры, оптические скамьи, гониометры, коллиматоры, резольвометры, фотометры, микрофотометры и др. Безусловно, нужны были специально подготовленные специалисты в данной области. Были изданы учебники, методические пособия, руководства, в которых давались обстоятельные и детальные методики оценки качественных характеристик фотографических изображений местности, полученных в результате аэрокосмических съёмок [1; 5; 8; 9; 10].

В то же время в связи с бурным внедрением с середины 1980-х гг. компьютерной техники, средств телекоммуникации, считывающих устройств свершилась, по сути, миниреволюция в

области аналоговой фотографии, просуществовавшей более полутора веков. Появились принципиально новые приёмники излучения, позволяющие записывать излучение от объектов местности в кодированной цифровой форме. Под термином «цифровые изображения» понимают растровое изображение, полученное в результате оцифровки черно-белых полутоновых аэрофотоматериалов на сканирующих приборах (сканерах типа ФС-30, Delta-Scan и др.), либо цифровое изображение, полученное сразу с помощью специализированных [6; 14; 15; 20] цифровых фотограмметрических камер (см. рис. 1).

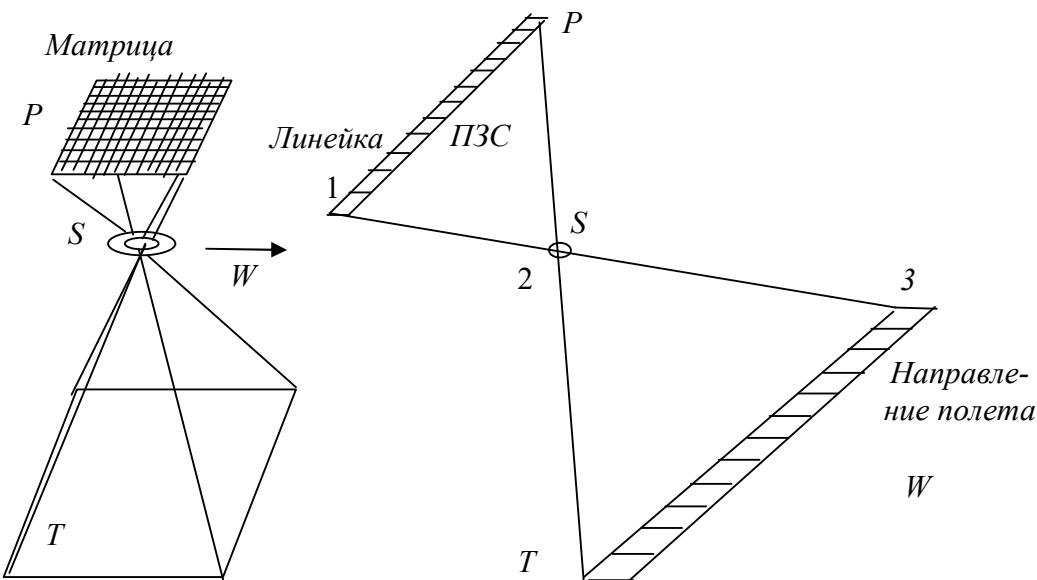


Рис. 1. Принцип формирования кадрового изображения местности на ПЗС-матрицу и сканерного изображения линейкой ПЗС

В первом случае изображение строится, как и в кадровой аналоговой аэросъёмке в центральной проекции. Однако размер кадра, т.е. площадь и форма, будут отличаться от традиционных форматов ( $18 \times 18$ ,  $23 \times 23$ ,  $30 \times 30$  см). Во втором случае с применением ПЗС-линеек реализуется принцип сканерной съёмки, заключающийся в последовательном проектировании на поверхность электронной чувствительной линейки изображений узких полос местности, перпендикулярных движению носителя. Следовательно, изображение в плоскости линейки будет представляться в центральной проекции. В направлении полёта изображение уже будет не в центральной проекции. Для получения цельного изображения местности требуется соответствующая программная обработка.

Таким образом, вместо плёночного светочувствительного материала в качестве приёмника излучения стали использовать оптоэлектронные сенсорные микроэлементы, названными приборами с зарядовой связью – ПЗС-матрицы или ПЗС-линейки. Итогом работы этих устройств явилось записанное на каком-либо носителе цифровое изображение, которое без труда воспроизводится на экране монитора компьютера.

Новая форма представления информации об объектах местности носит специфический характер. Она обусловлена особенностями цифровых фотокамер [3; 6; 15]. Прежде всего, необходимо обратить внимание на одну из главных её характеристик, а именно *разрешение матриц*, т.е. количество светочувствительных элементов (сенсоров). Например, для аэросъёмочной камеры DMC оно составляет  $13\,824 \times 7680$ , а «UltraCam-D» –  $11\,500 \times 7500$  элементов, что после перемножения равно соответственно 106 млн и 86 млн элементов (или 106 и 86 Мп).

Но эта характеристика будет ещё недостаточной для оценки разрешения матриц. Необходимо знать ещё размер самого электронного элемента ( $\Delta$ ), который принято называть пикселям. Чем большее количество пикселей на площади матрицы и чем меньше размер самого пикселя, тем

выше будет разрешение самого изображения. Как видим, в данном случае под разрешением изображения понимается несколько иное понятие, нежели в аналоговой фотосъёмке. Там для плёночных фотокамер использовали другую характеристику – некую результирующую разрешающую способность системы «оптическая система – плёнка».

Применительно к цифровым камерам качество снимков принято характеризовать *пространственным разрешением* или *разрешением на местности*. То есть, проще говоря, под этой характеристикой необходимо понимать проекцию размера одного пикселя на местности. Однако такой подход не корректен. В соответствии с теоремой Котельникова [15], чтобы не утратить объект на цифровом изображении, разрешение на местности должно быть равно удвоенной площади пикселя. Например, разрешение камеры 4 м означает, что на цифровом снимке объект можно различить размером не меньше 4 м, но при этом размер пикселя на местности должен в проекции составлять не более 2 м!

Представленные рассуждения о разрешении цифрового изображения будут не полными, т.к. не только количество и размер пикселя надо учитывать, но и реальные *размеры самой матрицы*, которые существенно могут отличаться друг от друга. Для неметрических цифровых камер обычно размер матрицы указывают по её диагонали в дюймах (1/3,2"; 1/2,7"; 1/2,5"; 1/1,8"). Такое обозначение не позволяет точно вычислять реальный размер матрицы, зато даёт возможность сравнивать между собой матрицы различных типов.

Размер матрицы влияет на глубину резко изображаемого пространства (ГРИП) – чем больше матрица, тем меньше глубина резкости при равном угле зрения и одинаковом количестве пикселей. Кроме того, у больших матриц естественнее и натуральное цвета.

Необходимо для практических целей помнить, что от отношения фокусного расстояния объектива к размеру матрицы зависит угол поля зрения. Так, например, для матрицы 15×22 мм объектив с фокусным расстоянием 30 мм считается нормальным, для плёнки 24×36 мм – широкоугольным, а для матрицы 5×7 мм – длиннофокусным.

Однако использование отношения фокусного расстояния объектива к диагонали матрицы не всегда удобно, для классификации систем «объектив-матрица» используется понятие эквивалентного фокусного расстояния (ЭФР). ЭФР данной связки «объектив-матрица» – это такое значение фокусного расстояния объектива, при котором на 35-миллиметровой плёнке получается изображение с тем же углом поля зрения, что и при использовании данной связки.

Обратим внимание на одно обстоятельство, связанное с такой характеристикой, как *светочувствительность*. Так, при выборе типа фотоплёнки указывают *светочувствительность* (в единицах государственного стандарта 32, 60, 120, 250 единиц), а для цифровых камер также существует типичный диапазон светочувствительности – 50...1600 единиц ISO (International Standards Organization – Международная организация стандартов). Причём отличительной особенностью цифровых камер в сравнении с плёночными является возможность менять светочувствительность во время съёмки, которая достигается «усиленiem» сигнала матрицы. Но при этом, по мнению специалистов [15], надо считаться с побочным эффектом, называемым шумами. Светочувствительность и шум матрицы зависят от её размера. Чем больше размер матрицы, тем более высокая требуется светочувствительность (и, следовательно, короче выдержка).

Использование цифровых камер связано с ещё одной характеристикой, которая ранее фотографами называлась фотографической широтой – *динамическим диапазоном и разрядностью*. Динамический диапазон – это способность сенсоров матрицы различать количество тонов серого (уровней яркости) между абсолютно белыми и абсолютно чёрными цветами объектов местности. Чем выше динамический диапазон, тем выше достоверность изображения, а с ней и возможность дешифрирования. Самый высокий динамический диапазон пока у негативных плёнок. Не случайно в некоторых кинотеатрах до сих пор пользуются плёночными аппаратами.

Под разрядностью цифровой матрицы следует понимать количество уровней, использующихся для передачи всего цветового канала объекта.

Образование цифрового изображения происходит (см. рис. 1) за счёт регистрации на чувствительный элемент (пиксель) приёмника излучения световых лучей от объектов местности.

Причём на один пиксель поступает электрический заряд, пропорциональный интегральной яркости объектов в пределах проекции его на местность.

Чувствительный элемент (ячейка) ПЗС-матрицы или ПЗС-линейки представляет собой металлическую пластину 1, называемую затвором, отделённую от полупроводника 3 слоем окисла 2 (см. рис. 2, 3).

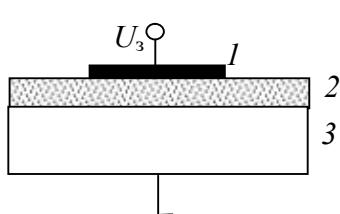


Рис. 2. Принцип строения приёмника излучения на базе ПЗС

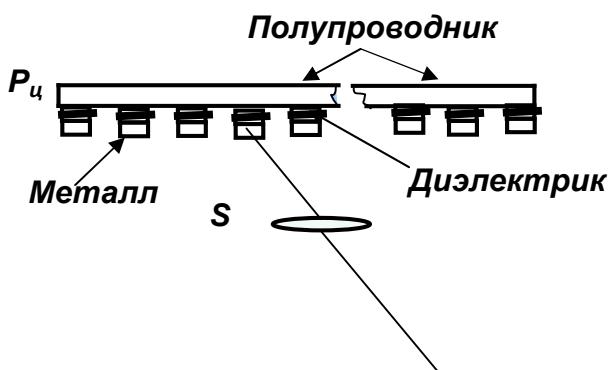


Рис. 3. Структурная схема устройства ОЭС на базе ПЗС:  $S$  – объектив;  $P_{\text{ц}}$  – цифровой фотоснимок

Полупроводник играет роль подложки, он может быть  $n$ - или  $p$ -типа, а к затвору прикладывается напряжение той или иной полярности по отношению к подложке. Полупроводник должен иметь высокую чувствительность к различным диапазонам оптического излучения. Данному требованию удовлетворяет кремний, используемый в 96 % приборов микроэлектроники, но ещё перспективнее использовать германий и арсенид галлия.

Наиболее тонким (примерно 0,1 мкм), а поэтому наиболее уязвимым слоем в МОП-конденсаторе является диэлектрик 2, который обладает малой проводимостью и высоким напряжением пробоя. Этим требованиям удовлетворяет система «кремний-двуокись кремния» – основа МОП-структур.

Металлическая пластина 1 в последнее время изготавливается из поликристаллического кремния. В оптико-электронной системе (ОЭС) инфракрасного диапазона затворы (электроды) изготавливают из титана и никрома.

Преимуществом технологии, основанной на использовании приборов с зарядовой связью, является высокая геометрическая точность изображения, которая достигается за счёт того, что положение каждого элемента в матрице (линейке) ПЗС точно известно (за счёт юстировки и калибровки). К другим преимуществам ОЭС на базе ПЗС как формирователей изображения относятся следующие свойства:

- работа при малых электрических напряжениях;
- незначительные размеры;
- высокая надёжность и чувствительность.

Сигнал (информация о местности) считывается с каждого элемента приёмника излучения, в результате чего получается изображение местности с разрешением, определяемым размерами самого чувствительного элемента.

И всё же главным достоинством ОЭС ДЗЗ, кроме перечисленных выше, является то, что они позволяют получать данные в цифровой форме непосредственно на борту искусственного спутника Земли (ИСЗ) и передавать их на наземные пункты, т.е. обеспечивают высокую оперативность получения информации о местности.

В США ОЭС ДЗЗ нашли своё применение с 1972 г. в плане исследования природных ресурсов Земли при запусках ИСЗ серии Landsat. Затем получаемая ими информация стала широко использоваться Картографической службой министерства обороны США для дешифрирования почвенно-растительного покрова при создании и обновлении топографических и специальных карт, а

также при создании баз цифровых данных о рельефе местности. В серии последних спутников Landsat информация о местности подобными системами получалась с разрешением в несколько метров.

Значительный прогресс в развитии средств ДЗЗ на матрицах ПЗС достигнут Францией (космическая система СПОТ). Получаемая с её помощью информация о местности предназначается и для решения задач картографирования. Главным достоинством системы СПОТ является то, что она позволяет в автоматизированном режиме создавать цифровые модели рельефа местности.

Как уже приведено выше, сложилось два способа образования цифрового изображения:

1. перевод фотометрических плотностей аналогового снимка путем сканирования в цифровую форму;

2. фиксация в реальном режиме времени оптического изображения объектов местности на приёмники излучения в виде ПЗС-матриц или ПЗС-линеек.

Полученное тем и иным способом цифровое изображение в сравнении с обычной съёмкой местности обусловлено целым рядом особенностей, связанных с принципами формирования, записи данных, их накопления, воспроизведения, копирования, обработки и хранения.

Фотограмметрическая обработка материалов ДЗЗ, полученных с помощью ОЭС и выданных на наземном пункте в виде фотоснимков, не отличается от традиционных технологий работы с аэрофотоснимками или космическими фотоснимками. Важнейшие преимущества цифровых изображений – известные координаты пикселей, которые реализуются обработкой их на современных цифровых фотограмметрических станциях (ЦФС), а также возможность электронной оценки и коррекции самого изображения при визуальном рассматривании его на экране монитора. В рамках нашей статьи остановимся именно на втором преимуществе.

Как только появилась необходимость работы с цифровым изображением, специалисты заметили, что получаемые с помощью ОЭС цифровые фотоснимки, визуализированные на экране монитора, получаются, как и в аналоговой фотосъёмке, с различной степенью тональности, яркости, контраста и т.п. Поэтому возникла потребность создания программного обеспечения, дающего возможность определения характеристик и коррекции цифровых изображений.

Одной из первых появилась программа Photoshop, позволявшая на любительском уровне обрабатывать цифровые фотоснимки. Затем началось активное внедрение автоматизированных систем фотограмметрической обработки цифровых изображений – «Фотомод», «Панорама», «Фотоплан», «Сканекс», из зарубежных – «Интеграф», «Эрдас», «Энви» и др. В этих системах программное обеспечение позволяет на первом этапе, до фотограмметрической обработки, произвести оценку качества исходных изображений, выполнить их коррекцию, а на этапе сформированных цифровых документов осуществить их окончательное приведение к нормальному восприятию глазами человека.

Возьмём, к примеру, обработку матрицы исходного изображения (МИИ) в комплексе «Фотоплан». После сканирования в стандартном графическом формате TIFF, BMP или PCX требуется выполнить комплекс работ, связанный с обеспечением максимальных удобств оператору для наблюдения и измерения необходимых точек на цифровом изображении. Для выполнения этих работ в комплексе «Фотоплан» предусмотрены следующие пункты меню: «конвертирование» – преобразование МИИ из формата TIFF (PCX, BMP) во внутренний формат; «визуализация» МИИ на экране монитора; «сервис» – обзорное изображение, гистограммы всего изображения, оконного фрагмента, района креста (100×100), инвентризование и разворот изображения; «настройки» – исходный масштаб изображения, увеличить или уменьшить масштаб изображения, измерить увеличение и др.

Наиболее успешные исследования, регламентирующие процесс автоматизированного определения основных характеристик показателей качества аэрокосмической информации в цифровом виде, были выполнены сотрудниками Госцентра «Природа» под общим руководством генерального директора Ю. П. Киенко. Результатом их исследований явилось «Руководство по оценке качества исходных материалов аэрокосмических съёмок и производной продукции в цифровой и аналоговой форме» [9]. Исследования были выполнены на аппаратном программном

комплексе «АРМ-Технолог», на котором реализованы специализированные технологические программы под общим названием «Анализ-2002». С их использованием возможно определение следующих характеристик цифрового изображения (см. табл. 1).

Таблица 1  
Характеристики цифровых изображений

Наименование характеристик	Обозначение
Изображение может получаться в 2-х проекциях: -центральной (матрицы ПЗС) - нецентральной (линейки ПЗС)	$L \times M$ , мкм $L$ , мкм
Физические размеры матрицы или длина линейки	мм
Разрешение, размер электронного сенсора, пикселя	$\Delta$ , мкм
Количество электронных чувствительных элементов, пикселей	$N$ , пикс
Диапазон используемых кодов яркости, количество тонов	$\Delta B$
Характеристики цифрового изображения: - поdensитометрическому профилю - по частотно-тоновой характеристике	DП ЧТХ
Количество уровней квантования	0...256
Разрядность, радиометрическое разрешение, сколькими тонами передаётся изображение	$n$ , бит\пикс
Разрешение на местности, проекция пикселя	$R_M$ , м
Объём памяти для хранения полутонового сканированного изображения или матрицы, линейки ПЗС	$V$ , МБ или ГБ
Светочувствительность матрицы	Единицы ISO
Формат записи цифрового изображения	JPEG, TIFF, RAW

При запуске данной программы производится загрузка исследуемого изображения, вводится рассчитанное в соответствии с масштабом значение апертуры сканирования. Далее по намеченным трассам сканирования определяется разрешающая способность, по методам выполнения гистограммных преобразований (см. рис. 4) улучшается визуальное качество выводимого на экран изображения. Однако при этом исходный файл цифрового изображения не изменяется. К тому же гистограмма даёт оценку изображения только в локальной области, в районе креста, в остальной части окна оно будет сильно искажено, что, безусловно, является недостатком.

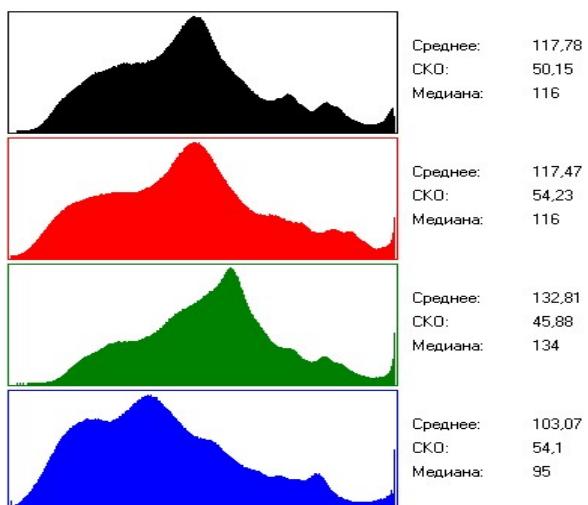


Рис. 4. Типичное представление визуализированных гистограмм на экране монитора компьютера

Анализируя в целом возможности данной программы, можно признать её вполне работоспособной и готовой к применению, достаточно лишь приобрести программное обеспечение.

С другой стороны, для оценки качества цифровых изображений специалисты используют встроенные в специализированные программные фотограмметрические комплексы частные программы с набором различных опций, позволяющих влиять на качество используемых изображений. Вместе с тем применение на практике этих опций носит субъективный характер. Необходимы нормативная база, поясняющие методики правил применения и последовательности использования опций.

Таким образом, с переходом на обработку первичной информации о местности в цифровую форму необходимо выработать, упорядочить и принять к практическому использованию принципиально иные оценочные критерии по сравнению с аналоговой фотосъёмкой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аэрофотосъемка. Метрология и оценка качества аэрофотосъемки / О. И. Ануфриев и др. – СПб.: Изд-во филиала ВИУ, 1999. – 207 с.
2. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие / И. С. Грузман и др. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 168 с.
3. Кашкин, В. Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: учеб. пособие / В. Б. Кашкин, А. И. Сухинин. – М.: Логос, 2004. – 264 с.
4. Кадничанский, С. А. Сравнительный анализ материалов цифровой АФС и космической съёмки для создания и обновления карт / С. А. Кадничанский // Геопрофи. – 2009. – № 4. – С. 4-8.
5. Книжников, Ю. Ф. Аэрокосмические методы географических исследований: учеб. для вузов / Ю. Ф. Книжников, В. И. Кравцова, О. В. Тутубалина. – М.: Академия, 2004. – 336 с.
6. Олейник, С. В. Цифровые камеры для аэрофотосъемки / С. В. Олейник, В. Б. Гайда // Геопрофи. – 2006. – № 4. – С. 45-51.
7. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
8. Руководство по аэрофотосъёмке в картографических целях (РАФ-89) / отв. ред. А. И. Лосев. – М.: РИО, 1989. – 104 с.
9. Руководство по оценке качества исходных материалов аэрокосмических съёмок и производной продукции в цифровой и аналоговой форме. М.: ЦНИИГАиК, 2003. – 36 с.
10. Савиных, В. П. Аэрокосмическая фотосъёмка: учеб. для вузов / В. П. Савиных, А. С. Кучко, А. Ф. Степченко. – М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 1997. – 378 с.
11. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений / У. Прэтт. – М.: Мир, 1982. – Т. 1-2.
12. Тропченко, А. Ю. Методы сжатия изображений: учеб. пособие / А. Ю. Тропченко, А. А. Тропченко. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 108 с.
13. Фотографические работы в фотограмметрическом производстве: пособие. – М.: РИО, 1989. – 152 с.
14. Хруш, Р. М. Сканирование фотоснимков: учеб. пособие / Р. М. Хруш. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. – 108 с.
15. Хруш, Р. М. Фотограмметрия: учеб. / Р. М. Хруш. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2011. – 541 с.
16. Ядлонский, А. Н. Цифровое фото. Полный курс / А. Н. Ядлонский. – М.: АСТ; Минск: ХАРВЕСТ, 2005. – 302 с.
17. Шлихт, Г. Ю. Цифровая обработка цветных изображений / Г. Ю. Шлихт. – М.: Изд-во ЭКОМ, 1997. – 336 с.
18. Монич, Ю. И. Оценки качества для анализа цифровых изображений / Ю. И. Монич, В. В. Старовойтов // Искусственный интеллект. – 2008. – № 4. – С. 378-386.
19. Сименеев А.А. Оценка качества материалов аэрофотосъёмки и цифровых изображений: методические указания / А. А. Сименеев. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 1999. – 20 с.
20. Ракурс: программные решения в области геоинформатики, цифровой фотограмметрии и дистанционного зондирования: официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://www.racurs.ru>.



Востриков Я. А.  
Ya. A. Vostrikov

## ФОРМИРОВАНИЕ НА ТВЁРДОМ СПЛАВЕ ЖАРОСТОЙКОГО И ИЗНОСОСТОЙКОГО ОДНОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ АНОДНЫМ МАТЕРИАЛОМ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНИЯ И КРЕМНИЯ

### CREATING A HEAT-RESISTANT AND WEAR-RESISTANT SINGLE-LAYER COATING ON THE CARBIDE ANODE MATERIALS BASED ON ZIRCONIUM AND SILICON

**Востриков Ярослав Алексеевич** – преподаватель кафедры «Транспортно-технологические комплексы» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); тел. 8(4212)407-656. E-mail: ya-vostrikov@mail.ru.

**Vostrikov Yaroslav Alekseevich** – Teacher, Department of Transport and Technological Complexes, Far East State Railway University (Russia, Khabarovsk); tel. 8(4212)407-656. E-mail: ya-vostrikov@mail.ru.

**Аннотация.** В работе показано оптимальное время формирования покрытия анодным материалом на основе циркония и кремния. Приведено исследование структуры и состава покрытия, полученного за это время в сравнении со структурой покрытия, полученного за большее, чем оптимальное, время, но не дошедшее до порога хрупкого разрушения. Приведённые микроструктуры покрытий показали сравнительно малое наличие дефектов в поверхностном слое, полученном за оптимальное время. Исследование состава этого покрытия подтвердило перенос и диффузию анодного материала в подложку из твёрдого сплава. Исследование жаростойкости материалов с покрытием, отличающихся длительностью его формирования, показало сравнительно высокую стойкость к химическому окислению на воздухе материала с покрытием, сформированным за установленное в работе оптимальное время. В заключение приводится сравнительный анализ жаростойкости сплава без покрытия и сплава с покрытием, последний показал повышение жаростойкости в 7 раз.

**Summary.** The article shows the optimal time of coating formation with an anodic material based on zirconium and silicon. A comparison is shown of two microstructures of hard alloys with a coating obtained for an optimal time and for a time exceeding the optimum, but not reaching the threshold of brittle fracture. The given microstructure of the coatings showed a relatively small presence of defects in the surface layer obtained in the optimal time. Studies of the composition of this coating confirmed the transfer and diffusion of the anode material into the carbide substrate. The study of the heat resistance of coated materials, characterized by the duration of its formation, showed a relatively high resistance to chemical oxidation in air of a coated material formed during the optimal time set in the work. In conclusion, the article provides a comparative analysis of the alloy heat resistance of uncoated and coated alloy, the latter showed an increased heat resistance of 7 times.

**Ключевые слова:** минеральное сырьё, массоперенос, электроискровое легирование, жаростойкость, твёрдый сплав, защитное покрытие, цирконий, износстойкость.

**Key words:** mineral raw materials, mass transfer, electrosparck alloying, heat resistance, hard alloy, protective coating, zirconium, wear resistance.

УДК 621.793

#### Введение

Вольфрамсодержащие твёрдые сплавы обладают уникальными физико-механическими свойствами, что делает их привлекательными для использования в качестве инструментального материала для обработки композитных материалов на основе полимерной связки. Однако существует проблема их быстрого износа и, как следствие, сокращения срока службы с повышением температуры в зоне резания [10, 9]. Например, при обработке полимерных материалов происходит значительный перегрев режущей части. В процессе механической обработки полимерных материалов, например стеклопластика, распределение теплоты неравномерно. Меньшая часть теплоты

(10 %) распределяется между стружкой и обрабатываемой деталью, а оставшиеся 90 % теплоты переходят в режущую часть инструмента, что приводит к снижению износостойкости и быстрому выходу из строя инструмента. Быстрый износ режущей части заключается в окислительном и усталостном разрушении рабочих поверхностей резца при достижении температуры более 740...800 °C [5]. Экспериментально установлено, что окисление твёрдых сплавов до температуры 650 °C незначительно, а затем интенсивно возрастает [3].

Наука и практика располагают многочисленными методами формирования покрытия на поверхности твёрдых сплавов. Покрытия, сформированные на поверхности твёрдых сплавов, предназначены для продления срока службы твёрдосплавного инструмента за счёт повышения его износостойкости к трению и химическому окислению. Анализ основных методов показал, что в условиях мелкосерийного и индивидуального производства представляет интерес использование метода электроискрового легирования (ЭИЛ), в особенности для Дальневосточного региона, в условиях гибкого, переналаживаемого, многономенклатурного, единичного производства [2].

### **Методика и материалы**

Объектом исследования являлся твёрдый сплав марки ВК8 (92 % WC и 8 % Co). Данный сплав используется в различных режущих инструментах, в том числе для обработки полимерных материалов, таких как стеклопластик. В качестве анода для формирования покрытия использовали электродный материал на основе циркония и кремния, полученный из циркониевого концентратата Алгаминского месторождения Дальневосточного региона в лаборатории кафедры «Подвижной состав железных дорог» ДВГУПС методом электродугового переплава. Получение электродного материала на основе циркония и кремния происходит в дуговой двухфазной электропечи, в футерованном графитовом тигле путём смешивания 60...65 % цирконового концентратата, имеющего в своём составе пассивирующие элементы в виде циркония и кремния, 15...20 % чистого фтороцирконата кальция и 15...20 % чистого флюорита, полученную смесь переводят в твёрдо-жидкое состояние разогревом до 1160...1190 °C с образованием расплавленных фторидов и оксидных твёрдых растворов. Затем полученные расплавленные фториды и оксидные твёрдые растворы в течение 15...20 мин подвергают активированию током с напряжением 42...50 В с образованием нестабильного твёрдого электролита на основе оксидов циркония и кремния с содержанием фтороцирконата и фторида кальция по границам зёрен. Далее упомянутый электролит подвергают медленному охлаждению до образования монолитного состояния, после чего охлаждённый слиток разрезают на прямоугольные части размером 13×5×5 (Д×Ш×В) [8; 1]. Цирконий и кремний при соединении с углеродом образуют карбиды, которые в электродном материале способствуют повышению износостойкости, стойкости к химическому окислению, а высокая температуропроводность, по сравнению с защищаемыми твёрдыми сплавами, наиболее вероятно способствует интенсивному теплоотводу из зоны резания [4].

Покрытие формировали на установке ЭИЛ – «Элитрон-14А» с частотой работы 400 Гц. Для оценки формирования сплошного покрытия использовали гравиметрический прибор Excellence XS Mettler Toledo с погрешностью измерения до 0,1 %, цена деления 0,1 мг; для металлографических исследований использовали микроскоп ЕС МЕТАМ РВ-22, исследование состава покрытия проводилось на следующих установках: сканирующий электронный микроскоп EVO 50 XVP (элементный анализ); дифрактометр рентгеновский D8 ADVANCE (фазовый анализ). Исследование жаростойкости проводили на приборе «Derivatograph Q-1000» по ГОСТ 6130-71, исследование износостойкости – на машине трения скольжения ИИ5018 и на приборе микроабразивного износа CALOTEST CSM.

### **Результаты и обсуждение**

При проведении исследований формирования покрытия на твёрдом сплаве ВК8 электродом на основе кремния и циркония установлено, что массоперенос заметно замедлялся на первой минуте формирования покрытия. Такое явление связано с охрупчиванием легированного слоя. Предположительно, это связано с накоплением напряжений в поверхностном слое и с образованием оксидов, что влияет на его постоянную деструкцию, а также оксиды препятствуют прохождению тока и замедляют процесс переноса материала. В связи с этим установлено два этапа, влияющих

на массоперенос. Первый этап – формирование легированного слоя за счёт перемешивания материалов анода и основы, этап характеризуется положительными значениями массопереноса материала. Второй этап – формирование легированного слоя за счёт перемешивания вторичных структур анода (сформированных на первом этапе) и основы, этап характеризуется моментом появления первого отрицательного значения массы упрочняемого материала из разницы с предыдущим измерением, что объясняется разрушением легированного слоя из-за накопленных напряжений. Установлено, что период формирования легированного слоя с максимальной сплошностью и минимальным количеством дефектов на твёрдом сплаве ВК8 при формировании покрытия электродом из циркониевого сплава длится 80 с. С увеличением времени легирования возрастает количество дефектов, заключающихся в изменении шероховатости, структуры и наличия пор. Данные дефекты снижают эффективность формирования слоя и ухудшают сплошность покрытия. Установлено, что в течение 80 с формируется легированный слой со сплошной поверхностью, на которой присутствуют незначительные дефекты. Это подтверждают исследования структуры и состава сплава с покрытием, полученные на первом и втором этапах формирования покрытия (см. рис. 1).

## Исследование структуры покрытия на основе Zr и Si, полученного при разной длительности электроискрового легирования

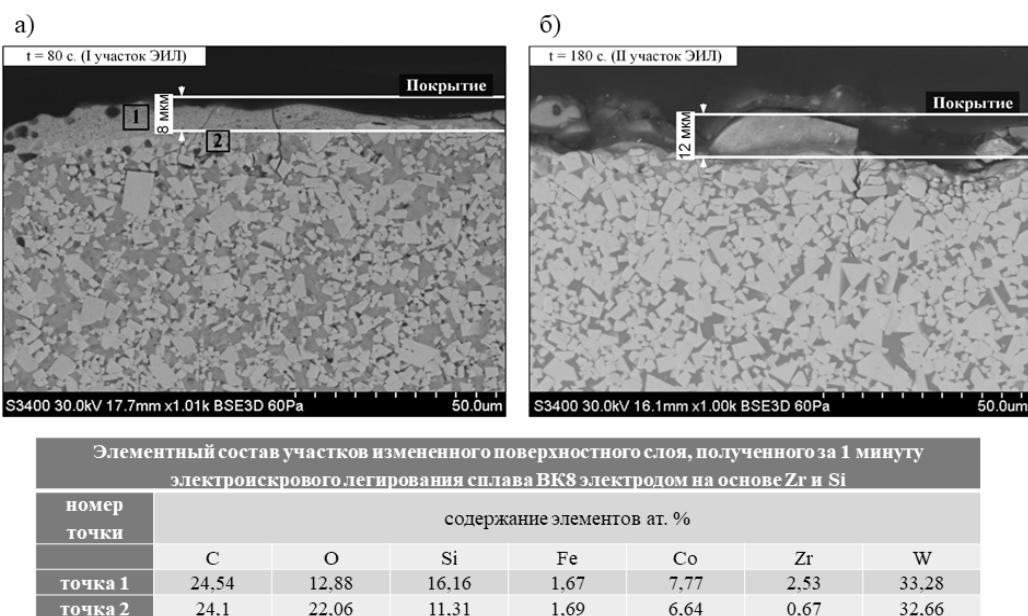


Рис. 1. Микроструктура поперечного шлифа подложки ВК8,  $\times 1000$ :  
а – время формирования покрытия = 1 мин 20 с на  $1 \text{ см}^2$ ;  
б – время формирования покрытия = 3 мин на  $1 \text{ см}^2$

На рис. 1 показана микроструктура поперечного шлифа твёрдого сплава ВК8 с покрытием из электрода на основе циркония и кремния. Данный рисунок демонстрирует влияние времени электроискрового легирования твёрдого сплава на образование дефектов в формируемом покрытии. При этом результаты исследования совпадают с исследованиями механизма массопереноса на стали другими авторами [6; 7]. В работах указанных авторов приводились данные, что длительное время легирования металлической поверхности способствует увеличению толщины покрытия и влияет на увеличении количества дефектов в покрытии.

Электроискровое легирование твёрдых сплавов имеет особенность в виде формирования покрытия только из основы твёрдого сплава, без участия анода. В таком случае полученный слой имеет мелкокристаллическую структуру, не поддающуюся травлению. Для установления перехода легирующих элементов от анода к катоду проводился элементный анализ полученного покрытия.

Результаты элементного анализа представлены на рис. 1 и показывают переход легирующих элементов от анода к катоду. На основе полученных данных предполагается наличие карбидов кремния, железа, циркония и вольфрама в легированном слое. Перечисленные карбиды обладают высокой жаростойкостью (кроме карбида вольфрама), твёрдостью и износостойкостью по сравнению с основой твёрдого сплава.

Далее проводилось исследование жаростойкости твёрдого сплава ВК8 с покрытием, сформированным на первом этапе электроискрового легирования (за 80 с) и на втором этапе (за 180 с), результаты исследования приведены на рис. 2.

### Исследование жаростойкости покрытия на основе Zr и Si, полученного при разной длительности электроискрового легирования

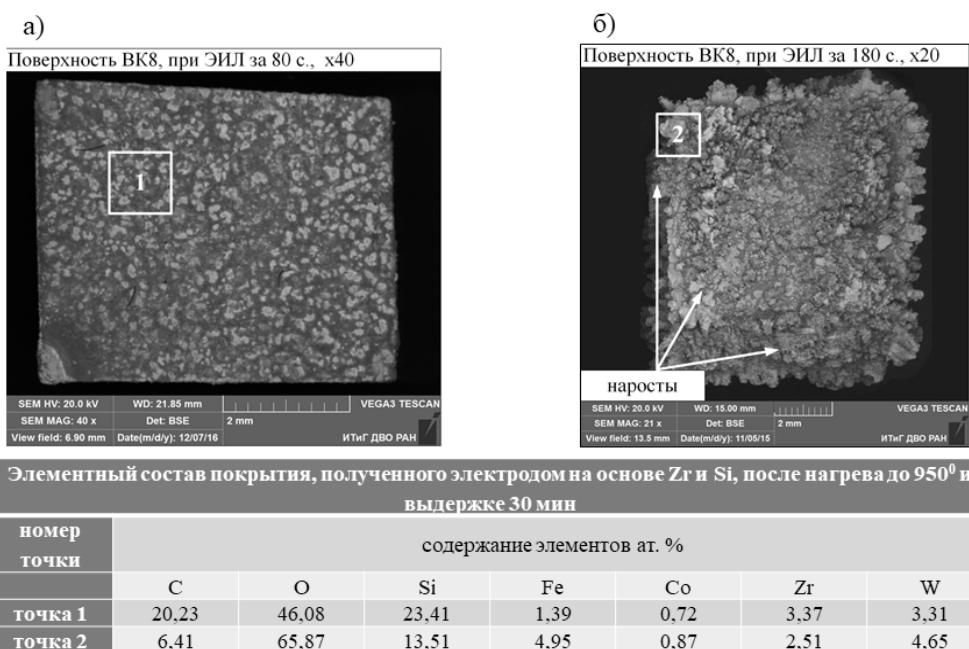


Рис. 2. Макроструктура легированного слоя сплава ВК8 после нагрева до 950 °С:  
а – время формирования покрытия = 1 мин 20 с на 1 см<sup>2</sup>;  
б – время формирования покрытия = 3 мин на 1 см<sup>2</sup>

Установлено, что на легированном слое, сформированном за 80 с, дефекты в виде наростов не обнаружены (см. рис. 2, а). Однако на поверхности твёрдого сплава с защитным покрытием, сформированным за 180 с, на местах дефектов легированного слоя образовались нарости высотой 500...700 мкм, что делает такой сплав непригодным для дальнейшей эксплуатации. Данные нарости образуются вследствие активного взаимодействия кислорода с вольфрамом и кобальтом. Наиболее вероятно элементный анализ поверхности сплавов после нагрева указывает на формирование следующих оксидов: SiO<sub>2</sub>, FeO, CoO, ZrO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub>. Элементный анализ точки 2 на рис. 2, б позволяет предположить, что наиболее вероятный состав образованных наростов – это хрупкие оксиды в виде соединений WO<sub>3</sub> и CoWO<sub>4</sub>.

Далее проводился сравнительный анализ жаростойкости твёрдого сплава ВК8 с покрытием, сформированным электродом из циркония и кремния, и без покрытия. Результаты термогравиметрического анализа сплавов представлены на рис. 3. Формирование покрытия на сплаве ВК8 проводилось в течение 80 с, что соответствует первому этапу электроискрового легирования этого сплава.

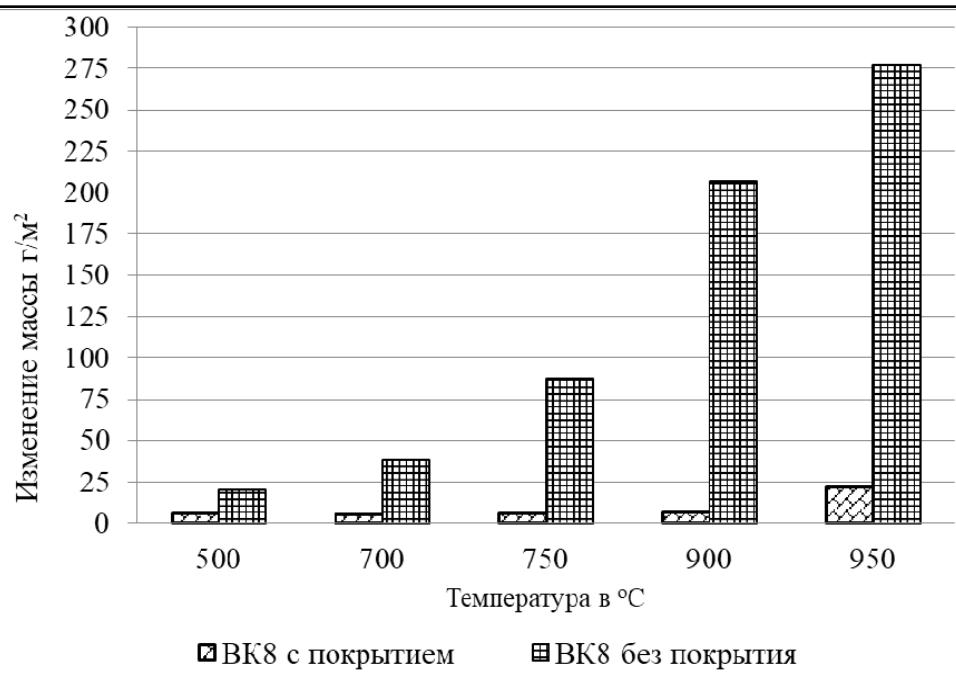


Рис. 3. Окисление твёрдых сплавов с покрытием и без покрытия при нагреве до 950 °C

Анализ исследований показал, что после нагрева до температуры 950 °C и выдержки 30 мин прирост массы сплава ВК8 с покрытием составил 22 г/м<sup>2</sup>, в то время как прирост массы сплава без покрытия составил 120 г/м<sup>2</sup>. Дополнительные исследования показали, что при формировании покрытия на твёрдых сплавах марок ТК и ВК цирконийсодержащим электродом жаростойкость повышается в восемь раз у сплава марки Т5К10, в шесть раз у сплава марки ВК8 и в пять раз у сплава марки ВК15.

Помимо стойкости к химическому окислению на воздухе, важным свойством покрытия является износстойкость, т.к. при обработке стеклопластика преобладает абразивный износ режущего инструмента. К тому же у всех сплавов после электроискрового легирования цирконийсодержащим электродом повысилась микротвёрдость, что связано с воздействием импульсных и механических нагрузок во время искрового разряда. Микротвёрдость сплава ВК3 повысилась на 279 единиц (Hv), сплава ВК15 – на 159 единиц (Hv), при этом у остальных вольфрамсодержащих твёрдых сплавов (ВК8, Т5К10, Т15К6) она повысилась в среднем на 30...80 Hv. Также на повышение микротвёрдости повлияло образование карбидов. В связи с этим проводилось исследование износстойкости сплава ВК8 с покрытием и без покрытия. Показатель износстойкости при сухом трении контртела о материал с защитным покрытием по сравнению с трением контртела о материал без защитного покрытия оценивался по потере 1 г массы на 1 см<sup>2</sup>. При трении контртела из закалённой стали о твёрдый сплав ВК8 без защитного покрытия потеря массы сплава составила 7 г/см<sup>2</sup>, для сплава с защитным покрытием из электрода на основе Zr и Si потеря массы составила 5 г/см<sup>2</sup>. При трении контртела о твёрдый сплав ВК8 без защитного покрытия диаметр отпечатка составил 550 мкм. При трении контртела о сплав с защитным однослойным покрытием из электрода на основе сплава Zr и Si диаметр отпечатка для сплава ВК8 составил 193 мкм. Таким образом, установлено, что покрытие, сформированное электродом, содержащим Zr, повышает стойкость к абразивному износу подложки в 3 раза для сплава ВК8.

### Заключение

Использование цирконийсодержащего электрода, полученного из минерального сырья Дальневосточного региона, для формирования защитного покрытия на твёрдых сплавах марок ВК и ТК повышает жаростойкость в 7 раз, микротвёрдость на 18 % по сравнению с аналогичной подложкой без защитного покрытия, увеличивает износстойкость твёрдого сплава с покрытием в

**Востриков Я. А.**

ФОРМИРОВАНИЕ НА ТВЁРДОМ СПЛАВЕ ЖАРОСТОЙКОГО И ИЗНОСОСТОЙКОГО ОДНОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ АНОДНЫМ МАТЕРИАЛОМ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНИЯ И КРЕМНИЯ

2...3 раза в зависимости от вида износа (сухое трение или абразивный износ). Этого удалось достичь за счёт формирования в защитном покрытии карбидов и оксидов циркония ( $ZrO_2$ ,  $ZrC$ ) и кремния ( $SiO_2$ ,  $SiC$ ).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Верхотуров, А. Д. К вопросу о критерии эффективности процесса электроискрового легирования металлических поверхностей / А. Д. Верхотуров, Л. А. Коневцов, И. А. Астапов // Вестник АмГУ. – 2007. – № 39. – С. 6-9.
2. Золотых, Б. Н. О роли механических факторов в процессе эрозии в импульсном разряде / Б. Н. Золотых, И. П. Коробова, Э. М. Стрыгин. – М.: Наука, 1966. – С. 63-73.
3. Востриков, Я. А. К вопросу повышения жаростойкости твёрдых сплавов / Я. А. Востриков // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: труды Всерос. науч.-практ. конф. творческой молодёжи с международным участием. В 2 т. Т. 1 / под ред. С. А. Кудрявцева. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2015. – С. 22-28.
4. Коневцов, Л. А. Повышение работоспособности режущего инструмента из вольфрамсодержащих твёрдых сплавов электроискровым легированием металлами и боридами: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Коневцов Леонид Алексеевич. – Комсомольск-на-Амуре, 2009. – 154 с.
5. Липатов, А. А. Характер распределения температуры по длине контакта обрабатываемого материала с площадкой износа задней поверхности инструмента при точении аустенитной стали / А. А. Липатов // Известия ВолгГТУ. – 2014. – № 21 (148). – С. 24-26.
6. Минералогическая материология – основа получения материала с использованием минерального сырья. Mineralogical materialogy is the basis of obtaining of material using mineral raw material / А. Д. Верхотуров, Б. А. Воронов, А. И. Евстигнеев, Л. А. Коневцов; Институт водных и экологических проблем ДВО РАН (Хабаровск) // Проблемы комплексного освоения георесурсов: материалы IV Всерос. науч. конф. с участием иностр. учёных, Хабаровск, Россия, 27-29 сент. 2011 г. – Хабаровск, 2011. – Т. 2. – С. 78-85.
7. Мостовой, В. М. К вопросу о сущности процессов при скоростном резании стали / В. М. Мостовой // Известия Томского, Ордена трудового красного знамени, политехнического института им. Кирова. – 1954. – Т. 75. – С. 122-132.
8. Повышение жаростойкости и износостойкости ВТС методом ЭИЛ / Я. А. Востриков, А. С. Бурков, А. А. Рыбалкин, Н. С. Коновалова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2017. – № II-1(30). – С. 90-99.
9. Пат. № 2564646 Российская Федерация, МПК C 23 C 10/52, C 23 C 24/10. Способ диффузионного нанесения защитного покрытия из сплава циркония и кремния на поверхность стальных изделий / Е. М. Баранов, Д. Г. Перваков, Я. А. Востриков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС) № 2014113372/02; заявл. 04.04.2014; опубл. 10.10.2015. Бюл. № 28. – 10 с.
10. Пат. № 2638868 Российская Федерация, МПК C 22 B 34/14 (2006.01), C 22 B 9/20 (2006.01). Установка для электродугового получения циркония / Я. А. Востриков, Е. М. Баранов; патентообладатель ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС) № 2016125006; заявл. 22.06.2016; опубл. 18.12.2017. Бюл. № 35. – 10 с.



Николайчук П. А.  
P. A. Nikolaychuk

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ХИМИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ Cr-Si

## THERMODYNAMIC ASSESSMENT OF CHEMICAL AND ELECTROCHEMICAL STABILITY OF Cr-Si SYSTEM

**Николайчук Павел Анатольевич** – доктор естественных наук, приглашённый исследователь, кафедра аналитической химии и химии окружающей среды Института биохимии Грайфсвальдского университета (Германия, Грайфсвальд). E-mail: npa@csu.ru.

**Mr. Pavel A. Nikolaychuk** – Doctor of Natural Sciences, Visiting Researcher, Department of Analytical and Environmental Chemistry, Institute of Biochemistry, University of Greifswald (Germany, Greifswald). E-mail: npa@csu.ru.

**Аннотация.** Рассмотрены фазовые и химические равновесия в системе Cr-Si при 298 К. Оценена возможная максимальная растворимость кремния в хроме при 298 К, и вычислены термодинамические активности насыщенного раствора. Построена диаграмма состояния системы Cr-Si-O при 298 К, и вычислены характеристики инвариантных состояний этой системы. Построена диаграмма потенциал-рН системы Cr-Si-H<sub>2</sub>O при 298 К, давлении воздуха 1 бар и активностях ионов в растворе, равных 1 моль/л. Выполнен термодинамический анализ химической и электрохимической устойчивости сплавов системы Cr-Si.

**Summary.** The phase and chemical equilibria in the Cr-Si system at 298 K were considered. The possible maximum solid solubility of Si in bcc-Cr at 298 K was estimated. The thermodynamic activities of components in this saturated solution were calculated. The state diagram of the Cr-Si-O system at 298 K was plotted and characteristics of their invariant conditions were calculated. The potential-pH diagram of the Cr-Si-H<sub>2</sub>O system at 298 K, air pressure of 1 bar and activities of ions in solution, equal to 1 mol l<sup>-1</sup> was plotted. The thermodynamic analysis of chemical and electrochemical stability of the Cr-Si system alloys was performed.

**Ключевые слова:** система Cr-Si, силициды хрома, фазовые равновесия, низкотемпературное окисление, химическая и электрохимическая устойчивость.

**Key words:** Cr-Si system, chromium silicides, phase equilibria, low temperature oxidation, chemical and electrochemical stability.

УДК 620.193:669.14

### Введение

Система Cr-Si имеет очень большое значение для металлургической промышленности. Как силициды хрома, так и твёрдые растворы кремния в о.ц.к.-хроме обладают полезными физико-механическими [13; 14; 20; 64; 70; 77; 86; 95], оптическими [16], электрическими [18; 28; 64; 90] свойствами и могут использоваться в качестве покрытий [70; 102]. Хром и кремний также входят в состав различных многокомпонентных сплавов с необычными механическими [19; 52; 80; 110], электрическими [42; 106; 116] и магнитными [7; 35; 42; 47; 48; 58; 66; 89; 113; 116] свойствами, сплавов, обладающих «эффектом памяти» [34; 54; 69; 74; 105], износостойких [39; 40; 41; 65; 75; 91; 111], аморфных [47; 56; 60; 109], порошкообразных [11] и используемых как покрытия [11; 25; 43; 44; 53; 82], высокоэнтропийных [17; 96; 117] и работающих при повышенных температурах [17; 24; 29; 61; 66; 81; 82; 83; 85; 87; 98; 99; 111; 115].

Кроме того, показано, что и силициды хрома [57; 77; 95], и многокомпонентные сплавы, содержащие хром и кремний [8; 12; 17; 29; 58; 59; 60; 65; 81; 87; 88; 91; 98; 99; 103; 109; 111; 112], демонстрируют высокую коррозионную стойкость как на воздухе, так и в водных средах. Поэтому термодинамический анализ процессов окисления двойной системы Cr-Si является важным этапом в понимании механизмов окисления материалов, включающих в себя хром и кремний. Термоди-

намическая оценка химической и электрохимической устойчивости системы Cr-Si ранее уже проводилась [97]. Однако авторы той работы не принимали во внимание всех особенностей системы и использовали устаревшую термодинамическую информацию, поэтому исследование выполнено повторно. Цель данной работы состоит в сборе актуальной термодинамической информации о системах Cr-Si, Cr-Si-O и Cr-Si-H<sub>2</sub>O при 25 °C и термодинамическом анализе процессов окисления хромокремниевых сплавов.

### Фазовые и химические равновесия в системе Cr-Si при 25 °C

Природа хромокремниевых сплавов изучалась неоднократно начиная с начала XX века. При этом результаты ранних работ сильно отличались и зачастую противоречили друг другу [22; 33; 63; 79]. Ранее предполагалось существование различных силицидов хрома (Cr<sub>3</sub>Si, Cr<sub>2</sub>Si, Cr<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>, Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, CrSi, Cr<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>, CrSi<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>Si<sub>7</sub>), однако в настоящее время достоверно идентифицированы лишь четыре силицида (Cr<sub>3</sub>Si, Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, CrSi и CrSi<sub>2</sub>), равно как и твёрдый раствор кремния в хроме с решёткой о.ц.к. [4; 23; 26; 27; 32; 37; 72; 73; 76]. Хотя силициды Cr<sub>3</sub>Si и CrSi<sub>2</sub> и не являются дальтонидами, обладая при повышенных температурах заметными областями гомогенности, при 25 °C их можно считать стехиометрическими соединениями.

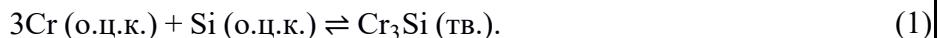
Кремний образует с хромом твёрдый раствор замещения. Твёрдая растворимость кремния в хроме (по массе) составляет ~2,5 % при 750 °C, ~3,5 % при 1000 °C, ~4,5 % при 1550 °C и ~5,5 % при эвтектической температуре [6]. Растворимость хрома в кремнии пренебрежимо мала.

Стандартные энергии Гиббса образования силицидов хрома согласно работе [23] представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Стандартные энергии Гиббса образования силицидов в хроме [23]

Соединение	$-\Delta_f G_{298,15}^0, \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$	Соединение	$-\Delta_f G_{298,15}^0, \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$
Cr <sub>3</sub> Si	124 400	CrSi	76 400
Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	320 100	CrSi <sub>2</sub>	99 700

Предельная твёрдая растворимость кремния в хроме с кристаллической структурой объёмноцентрированного куба (о.ц.к.) при 25 °C может быть оценена путём рассмотрения равновесия



Выражение для энергии Гиббса реакции (1) состоит из двух слагаемых:

$$\Delta_r G_{298,15, (1)}^0 = \Delta_f G_{298,15, \text{Cr}_3\text{Si}}^0 - \Delta_f G_{298,15, \text{Si (алмаз}\rightarrow\text{o.ц.к.)}}^0. \quad (2)$$

Согласно справочнику [30]  $\Delta_f G_{298,15, \text{Si (алмаз}\rightarrow\text{o.ц.к.)}}^0 = 40\ 300 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$ . Избыточная энергия Гиббса этого твёрдого раствора при 25 °C описывается [23] выражением (см. прим. 1)

$$G_{298,15, \text{Cr-Si (о.ц.к.)}}^E = -x_{\text{Si}}(1 - x_{\text{Si}})(98\ 400x_{\text{Si}} + 28\ 800), \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}. \quad (3)$$

Энергия Гиббса реакции (1) связана с термодинамическими активностями кремния и хрома в твёрдом растворе следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta_r G_{298,15, (1)}^0 &= -2478,9562 \ln \frac{a_{\text{Cr}_3\text{Si (тв.)}}}{a_{\text{Cr (о.ц.к.)}}^3 \cdot a_{\text{Si (о.ц.к.)}}} = \\ &= 7436,8686 \ln a_{\text{Cr (о.ц.к.)}} + 2478,9562 \ln a_{\text{Si (о.ц.к.)}}, \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Путём дифференцирования выражения (3) по мольным долям хрома и кремния и применения уравнения связи избыточного химического потенциала компонента с его коэффициентом активности (см. прим. 2) можно получить следующие выражения для активностей компонентов твёрдого раствора:

$$2478,9562 \ln a_{\text{Cr}(\text{o.ц.к.})} = 2478,9562 \ln (1 - x_{\text{Si}}) + 196\,800x_{\text{Si}}^3 - 225\,600x_{\text{Si}}^2, \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} 2478,9562 \ln a_{\text{Si}(\text{o.ц.к.})} &= 2478,9562 \ln x_{\text{Si}} + \\ &+ 196\,800x_{\text{Si}}^3 - 520\,800x_{\text{Si}}^2 + 451\,200x_{\text{Si}} - 127\,200, \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Если подставить выражения (2), (5) и (6) в уравнение (4) и решить его относительно мольной доли кремния, то можно оценить предельную твёрдую растворимость кремния в хроме. Расчитанное значение при 25 °C составляет  $x_{\text{Si}} = 7,198 \cdot 10^{-6}$ . Термодинамические активности компонентов раствора (стандартное состояние – чистый твёрдый компонент с решёткой о.ц.к.) равны соответственно  $a_{\text{Cr}(\text{o.ц.к.})} = 0,9999$  и  $a_{\text{Si}(\text{o.ц.к.})} = 1,4152 \cdot 10^{-29}$ .

### Равновесия в системе Cr-Si-O

В системе Cr-O широко известны три оксида:  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CrO}_2$  и  $\text{CrO}_3$ . Однако полная фазовая диаграмма системы этими тремя соединениями не ограничивается. Существуют и другие кислородосодержащие соединения хрома, хотя они и имеют гораздо меньшее значение и обычно не учитываются в термодинамическом моделировании.

Термическое разложение  $\text{CrO}_3$  до  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  протекает через образование множества промежуточных соединений [21; 36; 38; 55; 68; 107; 108]. Для этих соединений было предложено множество вариантов состава, таких как  $\text{Cr}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Cr}_3\text{O}_8$ ,  $\text{Cr}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{Cr}_6\text{O}_{15}$  и  $\text{Cr}_8\text{O}_{21}$ . Позднее было обнаружено, что  $\text{Cr}_2\text{O}_5$  и  $\text{Cr}_6\text{O}_{15}$  соответствуют одной и той же фазе, так же как  $\text{Cr}_3\text{O}_8$  и  $\text{Cr}_8\text{O}_{21}$ . Кроме того, соединения  $\text{Cr}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{Cr}_6\text{O}_{15}$  и  $\text{Cr}_8\text{O}_{21}$  являются фактически хроматами и дихроматами хрома соответственно  $\text{Cr}_2(\text{CrO}_4)_3$ ,  $\text{Cr}_2(\text{CrO}_4)_2(\text{Cr}_2\text{O}_7)$  и  $\text{Cr}_2(\text{Cr}_2\text{O}_7)_3$ .

Путём восстановления  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  с помощью  $\text{H}_3\text{PO}_2$  или путём термического разложения  $\text{Cr}(\text{CO})_6$  может быть получен оксид хрома (II),  $\text{CrO}$  [45]. Однако в атмосферных условиях он быстро окисляется. Путём восстановления  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  другими металлами или при реакции хрома с водяным паром в присутствии водорода при повышенных температурах может быть получен оксид  $\text{Cr}_3\text{O}$  [2].

Фаза  $\text{Cr}_3\text{O}_4$ , существование которой было предложено ранее, стабильна только в присутствии добавок железа и фактически является твёрдым раствором  $\text{Cr}_3\text{O}_4$  и  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ , а не чистым веществом [2].

В системе Cr-Si-O существует единственное тройное соединение – это метасиликат хрома,  $\text{Cr}_2\text{SiO}_4$  [1; 31; 67].

Стандартные энергии Гиббса образования в справочной литературе наличествуют только для  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{CrO}_3$ . На основе данных работы [104] стандартные энергии Гиббса образования прочих оксидов хрома были оценены с помощью метода Горичева [51]. Получено следующее выражение:

$$3 \cdot \Delta_f G_{298,15, \text{CrO}_x}^0 = 363\,400x^2 - 1\,603\,200x, \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}.$$

Стандартная энергия Гиббса образования силиката  $\text{Cr}_2\text{SiO}_4$  оценена по методу  $\Delta O^{2-}$  [92; 93] и составляет  $\Delta_f G_{298,15, \text{Cr}_2\text{SiO}_4}^0 = -1\,687\,200 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$ .

Диаграмма состояния системы Cr-Si-O (см. прим. 3), включающая только наиболее важные соединения, представлена на рис. 1; соответствующие равновесия перечислены в табл. 2. Гипотетическая диаграмма состояния, включающая в себя все известные оксиды и силикат хрома, представлена на рис. 2; соответствующие равновесия указаны в табл. 3.

Как показывают расчёты, в условиях атмосферы термодинамически устойчивыми продуктами окисления соединений системы Cr-Si будут оксиды  $\text{CrO}_2$  и  $\text{SiO}_2$ . Высшие оксиды хрома образуются при парциальных давлениях кислорода выше 0,21 бар и поэтому неустойчивы на воздухе. Силикат хрома также не может образовывать защитную плёнку на поверхности, поскольку разлагается на оксиды хрома и кремния.

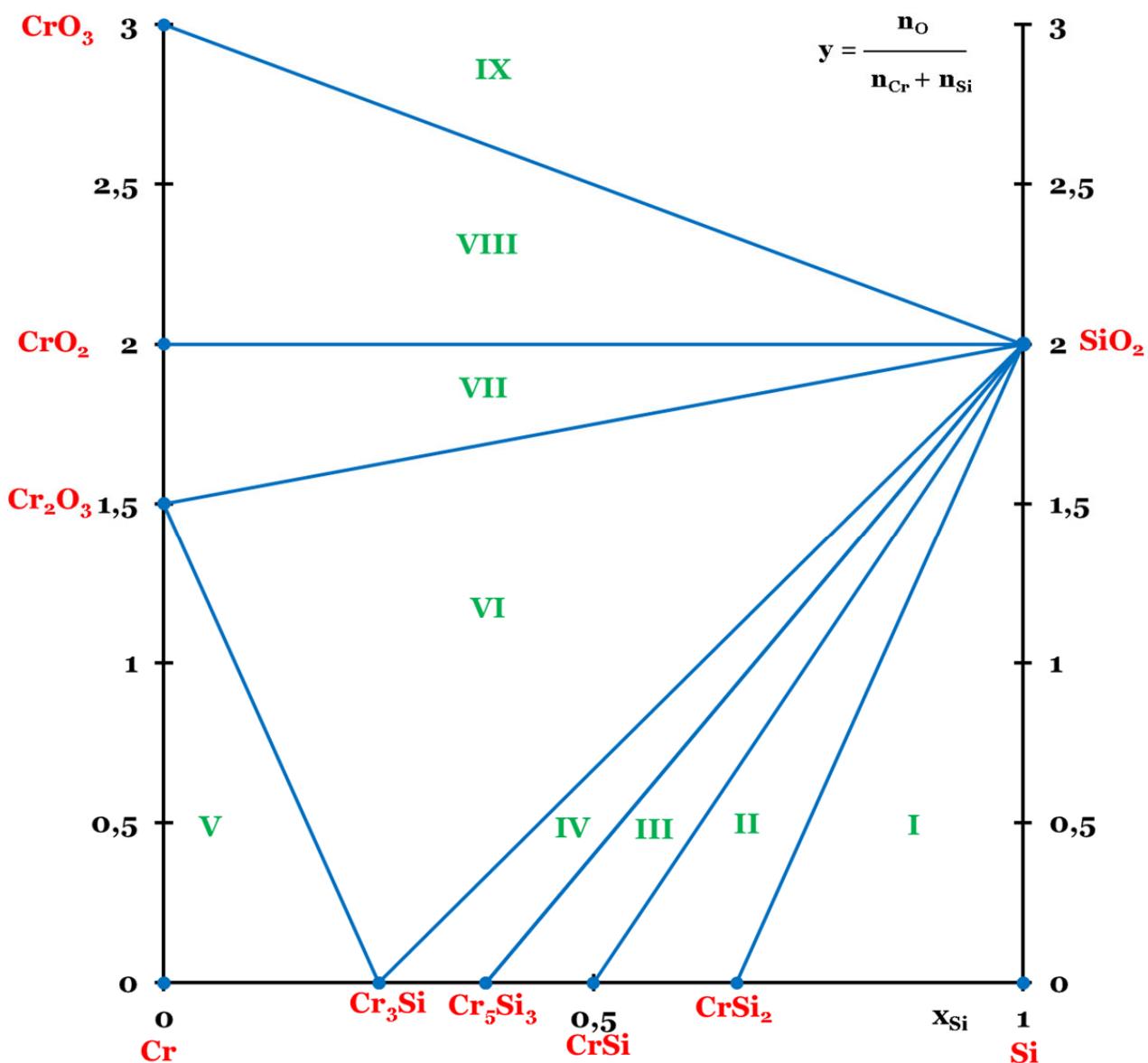


Рис. 1. Диаграмма состояния системы Cr-Si-O, включающая лишь наиболее важные оксиды хрома

Таблица 2  
Список равновесий в системе Cr-Si-O в соответствии с диаграммой на рис. 1

№ области на рис. 1	Равновесные фазы	Уравнение реакции	$P_{O_2}$ , бар
I	Si(алмаз) – CrSi <sub>2</sub> – SiO <sub>2</sub>	Si(алмаз) + O <sub>2</sub> (г.) ⇌ SiO <sub>2</sub>	$7,7 \cdot 10^{-142}$
II	CrSi <sub>2</sub> – CrSi – SiO <sub>2</sub>	CrSi <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> (г.) ⇌ CrSi + SiO <sub>2</sub>	$9,5 \cdot 10^{-138}$
III	CrSi – Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> – SiO <sub>2</sub>	5CrSi + 2O <sub>2</sub> (г.) ⇌ Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> + 2SiO <sub>2</sub>	$2,0 \cdot 10^{-136}$
IV	Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> – Cr <sub>3</sub> Si – SiO <sub>2</sub>	3Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> + 4O <sub>2</sub> (г.) ⇌ 5Cr <sub>3</sub> Si + 4SiO <sub>2</sub>	$5,2 \cdot 10^{-127}$
V	Cr(о.ц.к.) – Cr <sub>3</sub> Si – Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4Cr(о.ц.к.) + 3O <sub>2</sub> (г.) ⇌ 2Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; $a_{Cr(о.ц.к.)} = 0,9999$	$2,3 \cdot 10^{-124}$
VI	Cr <sub>3</sub> Si – Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – SiO <sub>2</sub>	4Cr <sub>3</sub> Si + 13O <sub>2</sub> (г.) ⇌ 6Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 4SiO <sub>2</sub>	$4,9 \cdot 10^{-123}$
VII	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – CrO <sub>2</sub> – SiO <sub>2</sub>	2Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + O <sub>2</sub> (г.) ⇌ 4CrO <sub>2</sub>	$1,9 \cdot 10^{-39}$
VIII	CrO <sub>2</sub> – CrO <sub>3</sub> – SiO <sub>2</sub>	2CrO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> (г.) ⇌ 2CrO <sub>3</sub>	$9,7 \cdot 10^{24}$
IX	CrO <sub>3</sub> – SiO <sub>2</sub> – O <sub>2</sub> (г.)	–	–

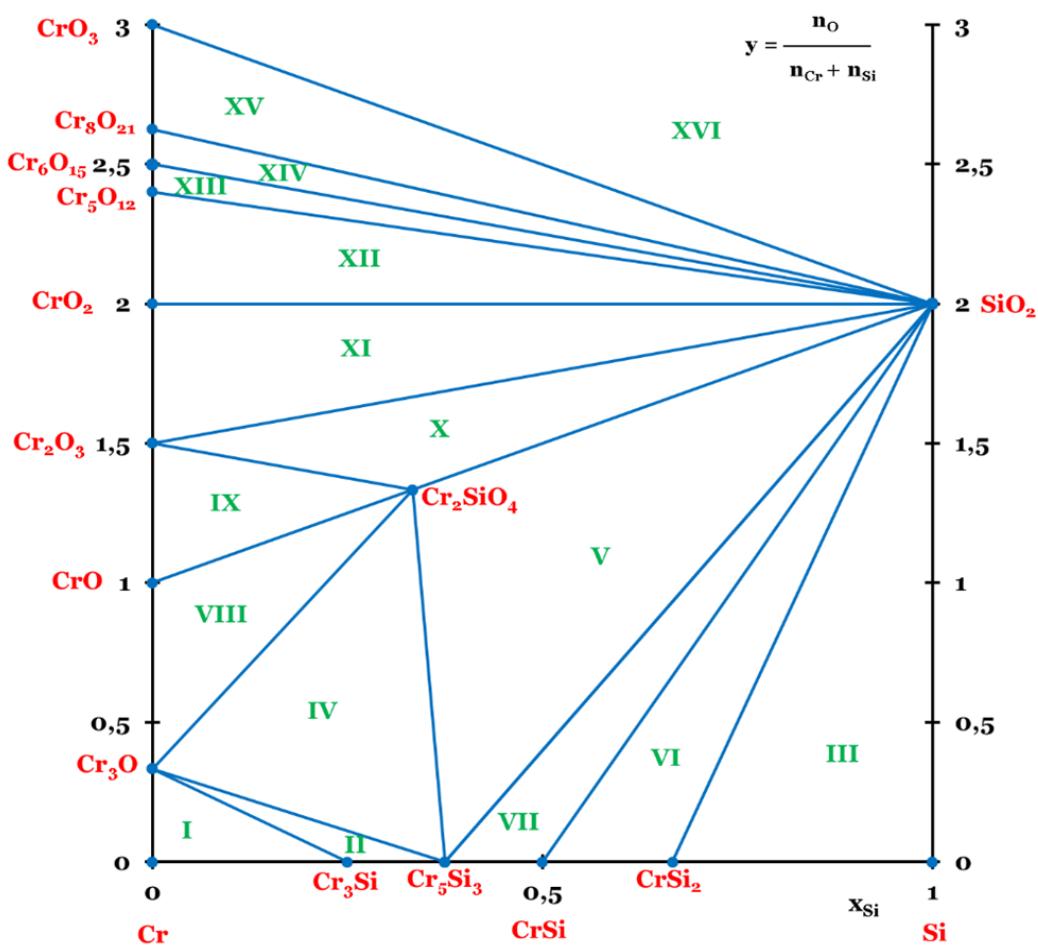


Рис. 2. Диаграмма состояния системы Cr-Si-O, включающая все возможные оксиды и силикат хрома

Таблица 3

Список равновесий в системе Cr-Si-O в соответствии с диаграммой на рис. 2

№ области на рис. 2	Равновесные фазы	Уравнение реакции	P <sub>O<sub>2</sub></sub> , бар
I	Cr(о.ц.к.) – Cr <sub>3</sub> Si – Cr <sub>3</sub> O	6Cr(о.ц.к.) + O <sub>2</sub> (г.) ⇌ 2Cr <sub>3</sub> O; a <sub>Cr (о.ц.к.)</sub> = 0,9999	6,5·10 <sup>-174</sup>
II	Cr <sub>3</sub> Si – Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> – Cr <sub>3</sub> O	18Cr <sub>3</sub> Si + 4O <sub>2</sub> (г.) ⇌ 6Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> + 8Cr <sub>3</sub> O	5,6·10 <sup>-160</sup>
III	Si (алмаз) – CrSi <sub>2</sub> – SiO <sub>2</sub>	Si(алмаз) + O <sub>2</sub> (г.) ⇌ SiO <sub>2</sub>	7,7·10 <sup>-142</sup>
IV	Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> – Cr <sub>3</sub> O – Cr <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	6Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> + 2Cr <sub>3</sub> O + 35O <sub>2</sub> (г.) ⇌ 18Cr <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	3,0·10 <sup>-138</sup>
V	Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> – Cr <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> – SiO <sub>2</sub>	2Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> + 11O <sub>2</sub> (г.) ⇌ 5Cr <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> + SiO <sub>2</sub>	8,9·10 <sup>-138</sup>
VI	CrSi <sub>2</sub> – CrSi – SiO <sub>2</sub>	CrSi <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> (г.) ⇌ CrSi + SiO <sub>2</sub>	9,5·10 <sup>-138</sup>
VII	CrSi – Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> – SiO <sub>2</sub>	5CrSi + 2O <sub>2</sub> (г.) ⇌ Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> + 2SiO <sub>2</sub>	2,0·10 <sup>-136</sup>
VIII	Cr <sub>3</sub> O – CrO – Cr <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	2Cr <sub>3</sub> O + 2O <sub>2</sub> (г.) ⇌ 6CrO	1,9·10 <sup>-131</sup>
IX	CrO – Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – Cr <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	4CrO + O <sub>2</sub> (г.) ⇌ 2Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,7·10 <sup>-82</sup>
X	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – Cr <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> – SiO <sub>2</sub>	2Cr <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> + O <sub>2</sub> (г.) ⇌ 2Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 2SiO <sub>2</sub>	2,0·10 <sup>-62</sup>
XI	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – CrO <sub>2</sub> – SiO <sub>2</sub>	2Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + O <sub>2</sub> (г.) ⇌ 4CrO <sub>2</sub>	1,9·10 <sup>-39</sup>
XII	CrO <sub>2</sub> – Cr <sub>5</sub> O <sub>12</sub> – SiO <sub>2</sub>	5CrO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> (г.) ⇌ Cr <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	0,322
XIII	Cr <sub>5</sub> O <sub>12</sub> – Cr <sub>6</sub> O <sub>15</sub> – SiO <sub>2</sub>	12Cr <sub>5</sub> O <sub>12</sub> + 3O <sub>2</sub> (г.) ⇌ 10Cr <sub>6</sub> O <sub>15</sub>	5,5·10 <sup>20</sup>
XIV	Cr <sub>6</sub> O <sub>15</sub> – Cr <sub>8</sub> O <sub>21</sub> – SiO <sub>2</sub>	8Cr <sub>6</sub> O <sub>15</sub> + 3O <sub>2</sub> (г.) ⇌ 6Cr <sub>8</sub> O <sub>21</sub>	2,0·10 <sup>30</sup>
XV	Cr <sub>8</sub> O <sub>21</sub> – CrO <sub>3</sub> – SiO <sub>2</sub>	2Cr <sub>8</sub> O <sub>21</sub> + 3O <sub>2</sub> (г.) ⇌ 16CrO <sub>3</sub>	3,4·10 <sup>-51</sup>
XVI	CrO <sub>3</sub> – SiO <sub>2</sub> – O <sub>2</sub> (г.)	–	–

### Диаграмма потенциал-рН системы Cr-H<sub>2</sub>O

Хром в водных средах может существовать в различных степенях окисления: +2, +3 и +6. Первые две из них представлены катионами Cr<sup>2+</sup> (водн.) и Cr<sup>3+</sup> (водн.) соответственно. Последняя представлена различными хроматами: CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (водн.), HCrO<sub>4</sub><sup>-</sup> (водн.), H<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> (водн.) и Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup> (водн.). Стандартные энергии Гиббса образования этих ионов взяты из работы [9]. Хром не образует гидридов [10; 49; 100].

На рис. 3 представлена диаграмма активность-рН для соединений хрома (VI).

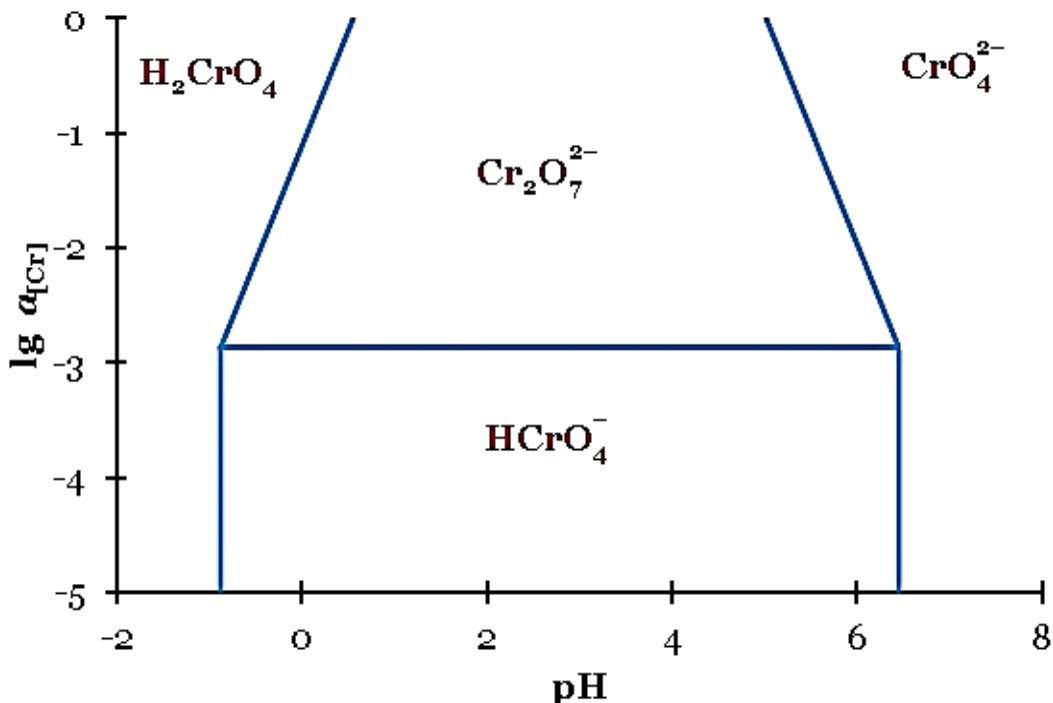


Рис. 3. Диаграмма активность-рН для водных соединений хрома (VI)

Как можно видеть из диаграммы, дихромат-ион Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup> (водн.) термодинамически устойчив в концентрированных растворах (если  $\lg a_{[Cr]} > -2,866$ ), в то время как в более разбавленных (при  $\lg a_{[Cr]} < -2,866$ ) устойчив гидрохромат-ион HCrO<sub>4</sub><sup>-</sup> (водн.).

В литературе [15; 114] имеется лишь диаграмма потенциал-рН системы Cr-H<sub>2</sub>O, включающая лишь наиболее важные соединения хрома, без учёта промежуточных оксидов. Поэтому на рис. 4 представлена диаграмма потенциал-рН для хрома, которая принимает во внимание все его известные кислородосодержащие соединения. Диаграмма построена при 25 °C, давлении воздуха 1 бар и активностях ионов хрома в растворе, равных 1 моль/л.

### Диаграмма потенциал-рН системы Cr-Si-H<sub>2</sub>O

Диаграмма потенциал-рН для кремния опубликована ранее [71]. Диаграмма потенциал-рН системы Cr-Si-H<sub>2</sub>O (см. прим. 4) при 25 °C, давлении воздуха 1 бар и активностях ионов в растворе, равных 1 моль/л, с учётом только наиболее важных оксидов хрома и без учёта его силиката представлена на рис. 5. Верхняя часть диаграммы представляет собой простое наложение диаграмм Пурбе для хрома и кремния. Равновесия с участием силицидов протекают при потенциалах гораздо ниже области электрохимической устойчивости воды. Сечение диаграммы потенциал-рН в области термодинамической устойчивости силицидов хрома представлено на рис. 6.

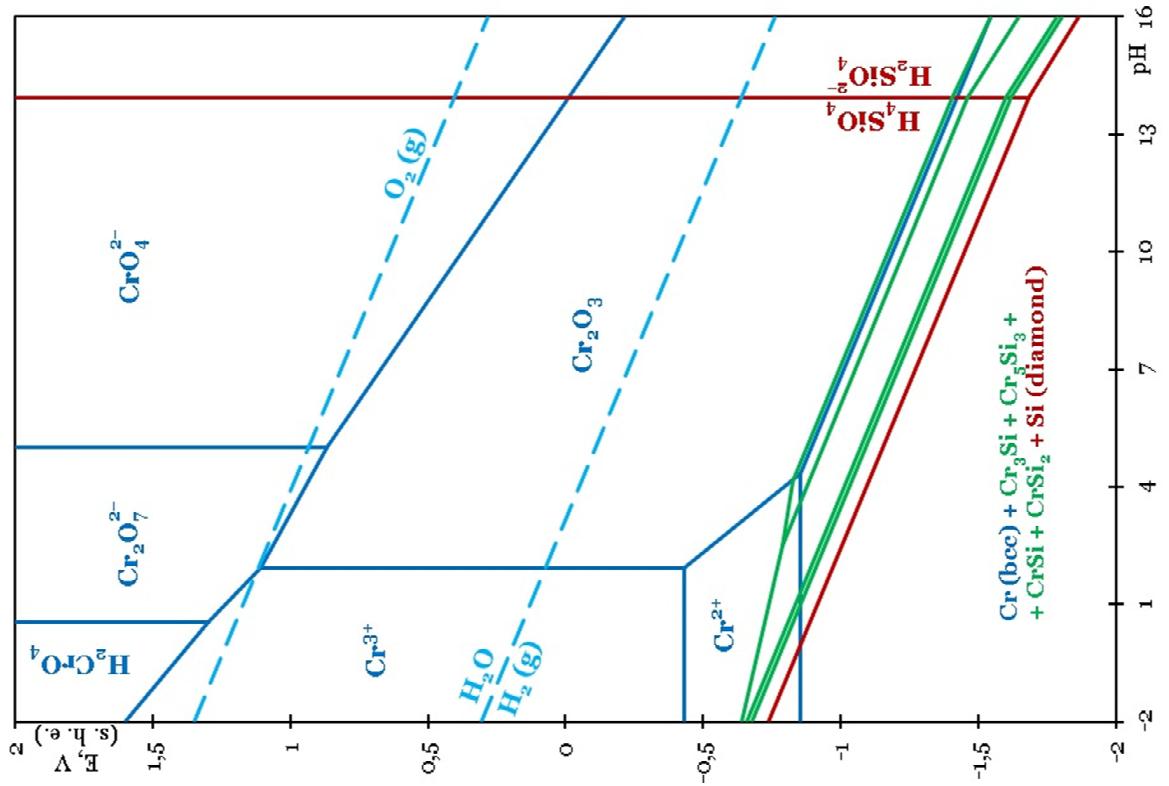


Рис. 5. Диаграмма потенциал-рН системы Cr-Si-H<sub>2</sub>O при 25 °С, давлении воздуха 1 бар и активностях ионов хрома в растворе, равных 1 М, включающая в себя только наиболее важные оксиды хрома и не включающая силикат хрома

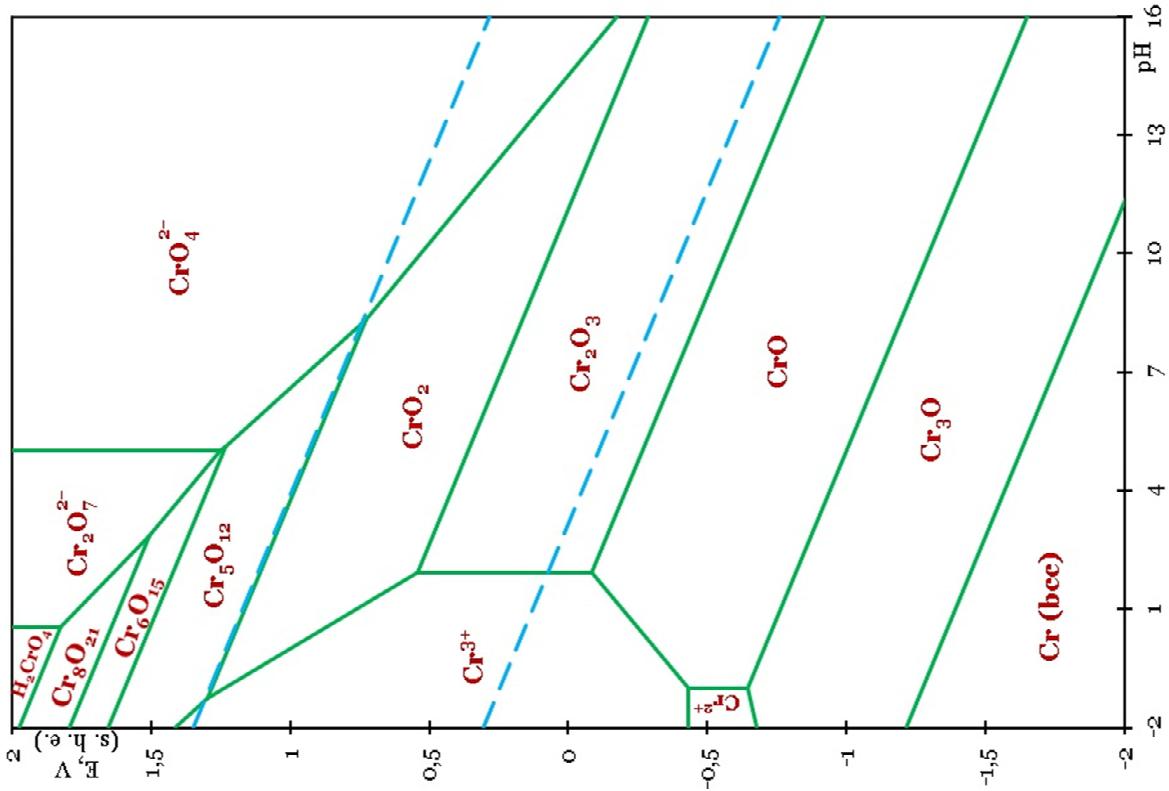


Рис. 4. Диаграмма потенциал-рН системы Cr-H<sub>2</sub>O при 25 °С, давлении воздуха 1 бар и активностях ионов хрома в растворе, равных 1 М, с рассмотрением всех возможных кислородсодержащих соединений хрома

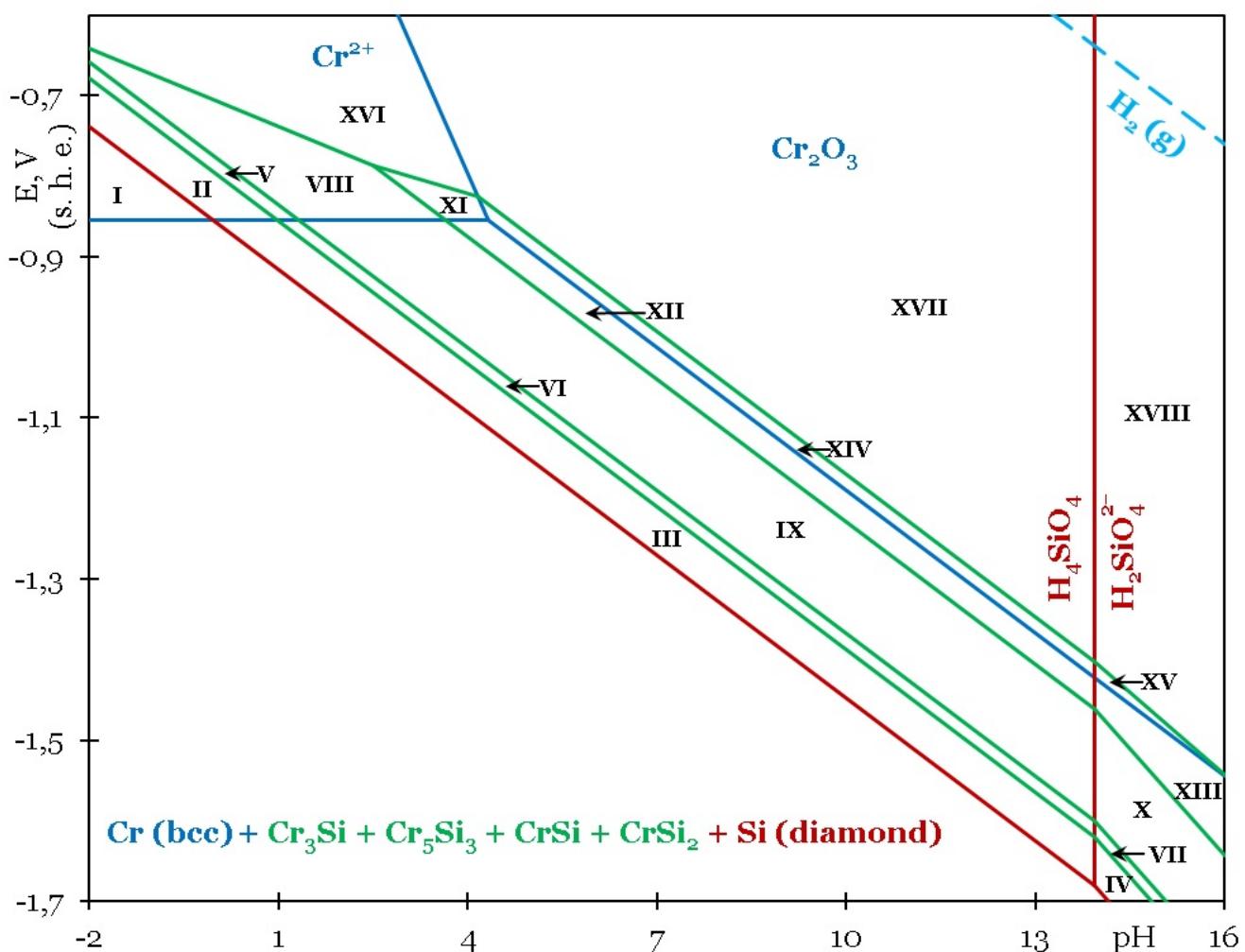


Рис. 6. Сечение диаграммы потенциал-рН системы Cr-Si-H<sub>2</sub>O с рис. 7 в области термодинамической устойчивости силицидов хрома

Можно выделить следующие области устойчивости различных фаз:

- I – Cr<sup>2+</sup> + Cr<sub>3</sub>Si + Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> + CrSi + CrSi<sub>2</sub> + Si (алмаз);
- II – Cr<sup>2+</sup> + Cr<sub>3</sub>Si + Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> + CrSi + CrSi<sub>2</sub> + H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>;
- III – Cr (о.ц.к.) + Cr<sub>3</sub>Si + Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> + CrSi + CrSi<sub>2</sub> + H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>;
- IV – Cr (о.ц.к.) + Cr<sub>3</sub>Si + Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> + CrSi + CrSi<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup>;
- V – Cr<sup>2+</sup> + Cr<sub>3</sub>Si + Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> + CrSi + H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>;
- VI – Cr (о.ц.к.) + Cr<sub>3</sub>Si + Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> + CrSi + H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>;
- VII – Cr (о.ц.к.) + Cr<sub>3</sub>Si + Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> + CrSi + H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup>;
- VIII – Cr<sup>2+</sup> + Cr<sub>3</sub>Si + Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> + H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>;
- IX – Cr (о.ц.к.) + Cr<sub>3</sub>Si + Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> + H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>;
- X – Cr (о.ц.к.) + Cr<sub>3</sub>Si + Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup>;
- XI – Cr<sup>2+</sup> + Cr<sub>3</sub>Si + H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>;
- XII – Cr (о.ц.к.) + Cr<sub>3</sub>Si + H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>;
- XIII – Cr (о.ц.к.) + Cr<sub>3</sub>Si + H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup>;
- XIV – Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Cr<sub>3</sub>Si + H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>;
- XV – Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Cr<sub>3</sub>Si + H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup>;
- XVI – Cr<sup>2+</sup> + H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>;

XVII –  $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{H}_4\text{SiO}_4$ ;

XVIII –  $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ .

Рис. 7 представляет диаграмму потенциал-рН системы Cr-Si-H<sub>2</sub>O при 25 °C, давлении воздуха 1 бар и активностях ионов в растворе, равных 1 моль/л, с учётом всех возможных оксидов и силиката хрома. Вновь верхняя часть диаграммы представляет собой простое наложение диаграмм Пурбе для хрома и кремния. Сечение диаграммы потенциал-рН в области термодинамической устойчивости силицидов хрома представлено на рис. 8. Можно выделить следующие области устойчивости различных фаз:

I –  $\text{Cr}_3\text{O} + \text{Cr}_3\text{Si} + \text{Cr}_5\text{Si}_3 + \text{CrSi} + \text{CrSi}_2 + \text{Si}$  (алмаз);

II –  $\text{Cr}_3\text{O} + \text{Cr}_5\text{Si}_3 + \text{CrSi} + \text{CrSi}_2 + \text{Si}$  (алмаз);

III –  $\text{Cr}_3\text{O} + \text{Cr}_5\text{Si}_3 + \text{CrSi} + \text{CrSi}_2 + \text{H}_4\text{SiO}_4$ ;

IV –  $\text{Cr}_3\text{O} + \text{Cr}_5\text{Si}_3 + \text{CrSi} + \text{CrSi}_2 + \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ ;

V –  $\text{Cr}_3\text{O} + \text{Cr}_5\text{Si}_3 + \text{CrSi} + \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ ;

VI –  $\text{Cr}_3\text{O} + \text{Cr}_5\text{Si}_3 + \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ ;

VII –  $\text{Cr}_3\text{O} + \text{Cr}_5\text{Si}_3 + \text{CrSi} + \text{CrSi}_2 + \text{Cr}_2\text{SiO}_4 + \text{H}_4\text{SiO}_4$ ;

VIII –  $\text{Cr}_3\text{O} + \text{Cr}_5\text{Si}_3 + \text{CrSi} + \text{CrSi}_2 + \text{Cr}_2\text{SiO}_4 + \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ ;

IX –  $\text{Cr}_3\text{O} + \text{Cr}_5\text{Si}_3 + \text{CrSi} + \text{Cr}_2\text{SiO}_4 + \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ ;

X –  $\text{Cr}_3\text{O} + \text{Cr}_5\text{Si}_3 + \text{Cr}_2\text{SiO}_4 + \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ ;

XI –  $\text{Cr}_3\text{O} + \text{CrSi} + \text{CrSi}_2 + \text{Cr}_2\text{SiO}_4 + \text{H}_4\text{SiO}_4$ ;

XII –  $\text{Cr}_3\text{O} + \text{CrSi} + \text{CrSi}_2 + \text{Cr}_2\text{SiO}_4 + \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ ;

XIII –  $\text{Cr}^{2+} + \text{CrSi} + \text{Cr}_2\text{SiO}_4 + \text{H}_4\text{SiO}_4$ ;

XIV –  $\text{Cr}_3\text{O} + \text{CrSi} + \text{Cr}_2\text{SiO}_4 + \text{H}_4\text{SiO}_4$ ;

XV –  $\text{Cr}_3\text{O} + \text{CrSi} + \text{Cr}_2\text{SiO}_4 + \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ ;

XVI –  $\text{Cr}_3\text{O} + \text{Cr}_5\text{Si}_3 + \text{Cr}_2\text{SiO}_4 + \text{H}_4\text{SiO}_4$ ;

XVII –  $\text{Cr}_3\text{O} + \text{Cr}_5\text{Si}_3 + \text{Cr}_2\text{SiO}_4 + \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ ;

XVIII –  $\text{Cr}^{2+} + \text{Cr}_5\text{Si}_3 + \text{Cr}_2\text{SiO}_4 + \text{H}_4\text{SiO}_4$ ;

XIX –  $\text{CrO} + \text{Cr}_5\text{Si}_3 + \text{Cr}_2\text{SiO}_4 + \text{H}_4\text{SiO}_4$ ;

XX –  $\text{CrO} + \text{Cr}_5\text{Si}_3 + \text{Cr}_2\text{SiO}_4 + \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ .

В области электрохимической устойчивости воды термодинамически устойчивыми продуктами окисления системы Cr-Si являются оксиды  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{CrO}_2$  и соединение  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ . Включение в термодинамическую модель силиката хрома существенно изменяет порядок и механизм окисления силицидов хрома как в воздушных, так и в водных средах. Полное разложение всех силицидов хрома на хром и кремний становится термодинамически невыгодным. Это согласуется с выводом, сделанным в работе [97], о том, что силициды хрома участвуют в образовании защитной пассивирующей плёнки на сплавах системы хром-кремний.

Однако представленная в настоящей работе схема окисления системы Cr-Si, принимающая во внимание все известные оксиды и силикат хрома, является лишь приближённой термодинамической оценкой и открыта для дальнейшей дискуссии ввиду недостаточности достоверных данных об энергиях Гиббса образования некоторых оксидов хрома и  $\text{Cr}_2\text{SiO}_4$ .

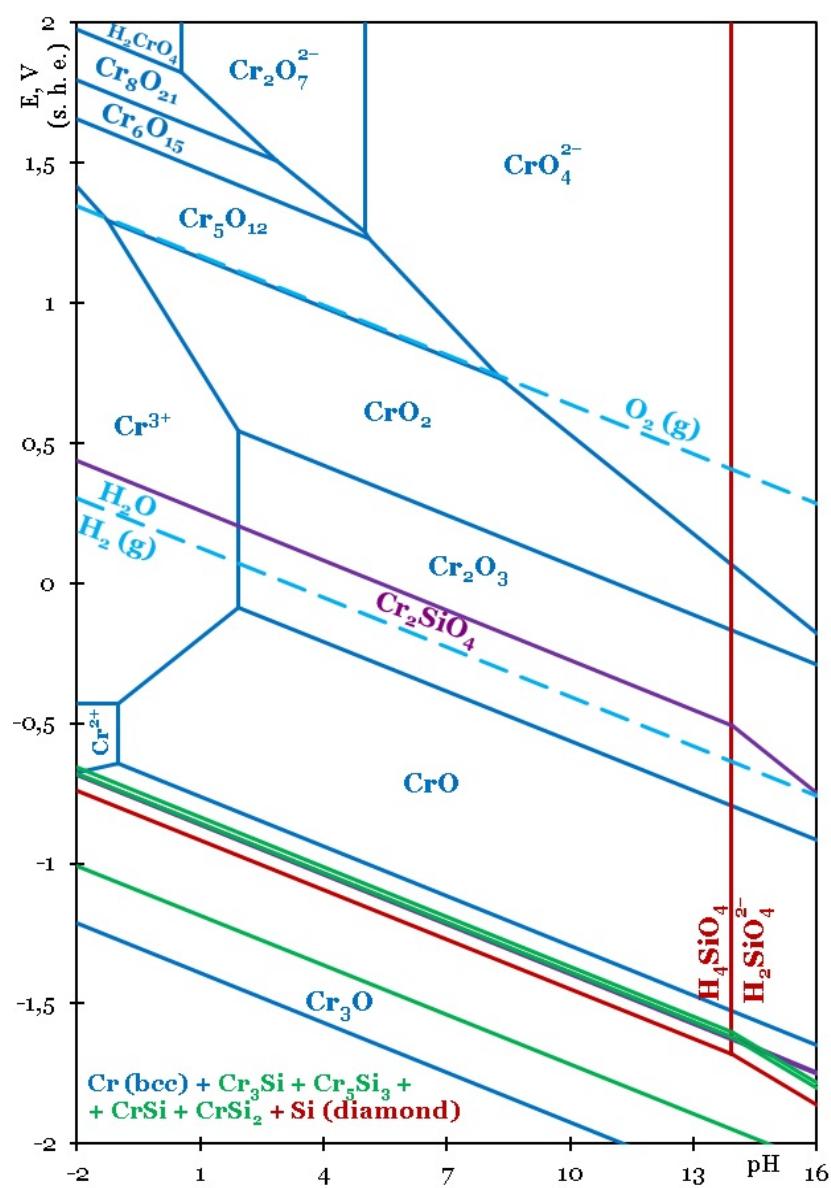


Рис. 7. Диаграмма потенциал-рН системы Cr-Si-H<sub>2</sub>O при 25 °C, давлении воздуха 1 бар и активностях ионов хрома в растворе, равных 1 М, включающая в себя все оксиды и силикат хрома

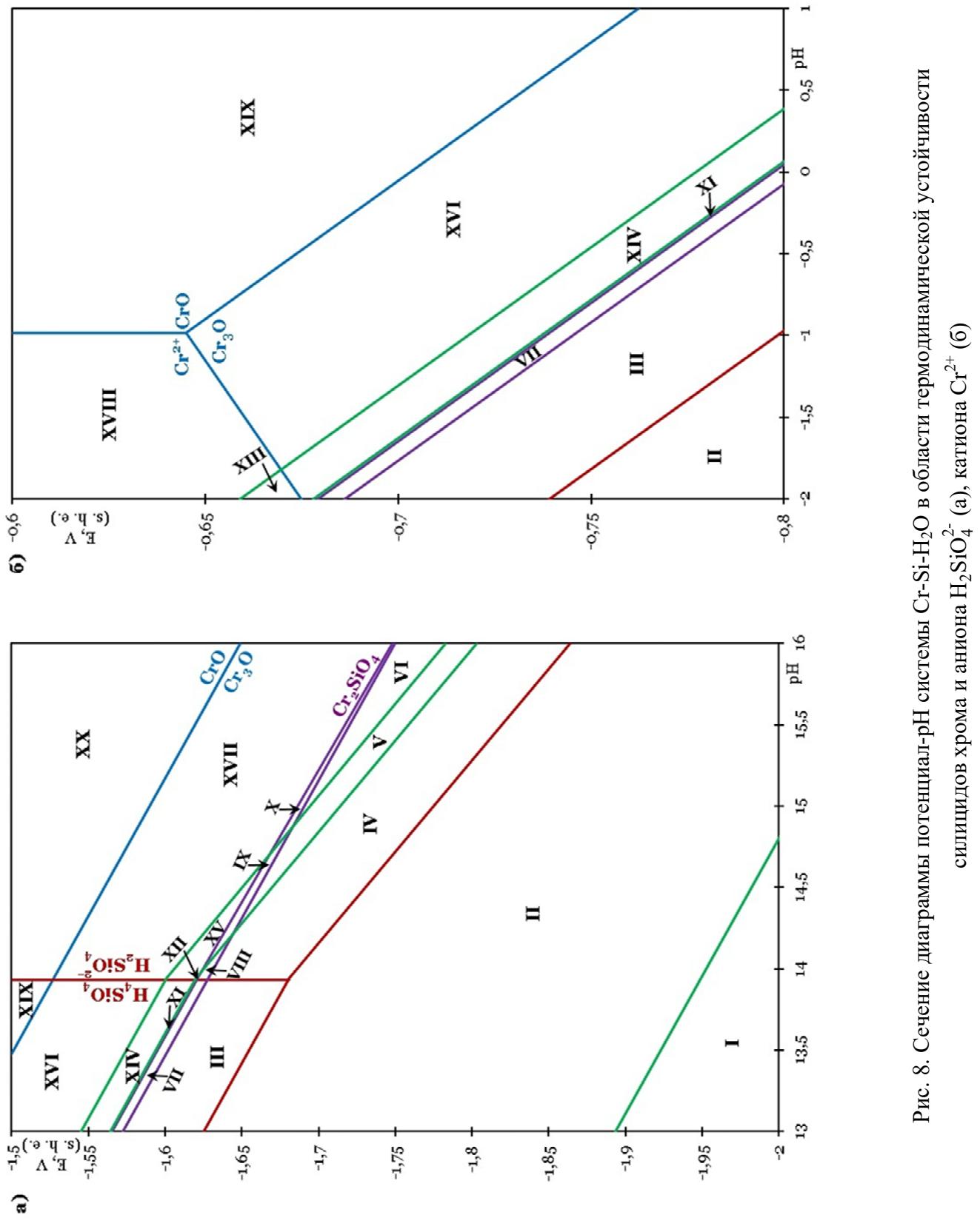


Рис. 8. Сечение диаграммы потенциал-рН системы Cr-Si-H<sub>2</sub>O в области термодинамической устойчивости силицидов хрома и аниона H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (а), катиона Cr<sup>2+</sup> (б)

## Выводы

1. Проанализированы термодинамические свойства двойной системы Cr-Si при 298 К, вычислена максимальная растворимость кремния в хроме и активности компонентов насыщенного раствора.
2. Построены диаграммы состояния тройной системы Cr-Si-O, и рассчитаны термодинамические характеристики инвариантных состояний системы Cr-Si-O при 298 К. Показано, что термодинамически устойчивыми продуктами окисления системы Cr-Si в атмосферных условиях являются оксиды  $\text{CrO}_2$  и  $\text{SiO}_2$ .
3. Построены диаграмма активность-рН для соединений хрома (VI) и диаграмма потенциал-рН для хрома, включающая в себя все известные кислородсодержащие соединения хрома.
4. Построены диаграммы потенциал-рН системы Cr-Si-H<sub>2</sub>O при 25 °C, давлении воздуха 1 бар и активностях ионов в растворе, равных 1 моль/л, как в варианте, включающем только самые важные оксиды хрома, так и в варианте, включающем все его известные кислородсодержащие соединения. Показано, что термодинамически устойчивыми продуктами окисления системы Cr-Si в водных средах являются оксиды  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CrO}_2$  и соединение  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Акимов, Е. Н. Термодинамический анализ получения низкоуглеродистого феррохрома с применением модели ассоциированных растворов / Е. Н. Акимов, А. В. Сенин, В. Е. Рощин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 182-185.
2. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справ. / под ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 2001. – 872 с.
3. Лаптев, Д. М. Термодинамика metallургических растворов / Д. М. Лаптев. – Челябинск: Металлургия, 1992. – 352 с.
4. Свечников, В. Н. Диаграмма хром – кремний / В. Н. Свечников, Ю. А. Кочергинский, Л. М. Юлко // Сборник научных трудов института металлофизики АН УССР. – 1964. – № 19. – С. 212-218.
5. Третьяков, Ю. Д. Термодинамика ферритов / Ю. Д. Третьяков. – Л.: Химия, 1967. – 305 с.
6. Тюрин, А. Г. Термодинамика химической и электрохимической устойчивости твёрдых сплавов железа, хрома и никеля / А. Г. Тюрин. – Челябинск: Изд-во Челябинского гос. ун-та, 2012. – 241 с.
7. Alberts, H. L. Magnetic effects in dilute Cr-Si alloys / H. L. Alberts, J. A. J. Lourens // Journal of Physics F: Metal Physics, 1988. – Т. 18. – № 1. – Р. 123-135.
8. Armijo, J. S. Influence of Si content on the corrosion resistance of austenitic Fe-Cr-Ni alloys in oxidizing acids / J. S. Armijo, B. E. Wilde // Corrosion Science. – 1968. – Т. 8. – № 9. – Р. 649-664.
9. Ball, J. W. Critical Evaluation and Selection of Standard State Thermodynamic Properties for Chromium Metal and Its Aqueous Ions, Hydrolysis Species, Oxides, and Hydroxides / J. W. Ball, D. K. Nordstrom // Journal of Chemical & Engineering Data. – 1998. – Т. 43. – № 6. – Р. 895-918.
10. Baranowski, B. Thermodynamics of metal/hydrogen systems at high pressures / B. Baranowski // Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie. – 1972. – Т. 76. – № 8. – Р. 714-724.
11. Structure and properties of rapidly solidified Al-Cr-Fe-Ti-Si powder alloys / B. Bártová [etc] // Journal of Alloys and Compounds. – 2005. – Т. 387. – № 1-2. – Р. 193-200.
12. Basu, S. N. Effect of alloy grain size and silicon content on the oxidation of austenitic Fe-Cr-Ni-Mn-Si alloys in pure O<sub>2</sub> / S. N. Basu, G. J. Yurek // Oxidation of Metals. – 1991. – Т. 36. – № 3-4. – Р. 281-315.
13. Directional solidification and microstructures of near-eutectic Cr-Cr<sub>3</sub>Si alloys / H. Bei [etc] // Acta Materialia. – 2003. – Т. 51. – № 20. – Р. 6241-6252.
14. Bei, H. Effects of composition on lamellar microstructures of near-eutectic Cr-Cr<sub>3</sub>Si alloys / H. Bei, E. P. George, G. M. Pharr // Intermetallics. – 2003. – Т. 11. – № 4. – Р. 283-289.
15. Beverskog, B. Revised Pourbaix diagrams for chromium at 25-300 °C / B. Beverskog, I. Puigdomenech // Corrosion Science. – 1997. – Т. 39. – № 1. – Р. 43-57.
16. Bost, M. C. An investigation of the optical constants and band gap of chromium disilicide / M. C. Bost, J. E. Mahan // Journal of Applied Physics. – 1988. – Т. 63. – № 3. – Р. 839-844.
17. High-Temperature Oxidation Behavior of Al-Co-Cr-Ni-(Fe or Si) Multicomponent High-Entropy Alloys / T. M. Butler [etc] // JOM: The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS). – 2015. – Т. 67. – № 1. – Р. 246-259.



18. Detailed Study of Amorphous Silicon Ultraviolet Sensor With Chromium Silicide Window Layer / D. Caputo [etc] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2008. – Т. 55. – № 1. – P. 452-456.
19. The brazing of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  with Ni-Cr-Si alloys / G. Ceccone [etc] // Journal of the European Ceramic Society. – 1995. – Т. 15. – № 6. – P. 563-572.
20. Microstructural characterization of as-cast Cr-Si alloys / V. M. Chad [etc] // Materials Characterization. – 2008. – Т. 59. – № 1. – P. 74-78.
21. Chamberland, B. L. The chemical and physical properties of  $\text{CrO}_2$  and tetravalent chromium oxide derivatives / B. L. Chamberland // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. – 1977. – Т. 7. – № 1. – P. 1-31.
22. Chart, T. G. Thermodynamic Properties of the Tungsten-Silicon and Chromium-Silicon Systems / T. G. Chart // Metal Science. – 1975. – Т. 9. – № 1. – P. 504-509.
23. Chen, H. On the melting of  $\text{Cr}_5\text{Si}_3$  and update of the thermodynamic description of Cr-Si / H. Chen, Y. Du, J. C. Schuster // Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. – 2009. – Т. 33. – № 1. – P. 211-214.
24. Evaluation of nanoscaled precipitates in a Cu-Ni-Si-Cr alloy during aging / J. Y. Cheng [etc] // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – Т. 614. – P. 189-195.
25. Conde, A. Cladding of Ni-Cr-B-Si coatings with a high power diode laser / A. Conde, F. Zubiri, Y. J. de Damborenea // Materials Science and Engineering. – 2002. – Т. 334. – № 1-2. – P. 233-238.
26. Coughanowr, C. A. Assessment of the Cr-Si System / C. A. Coughanowr, I. Ansara, H. L. Lukas // Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. – 1994. – Т. 18. – № 2. – P. 125-140.
27. Cui, S. Thermodynamic assessments of the Cr-Si and Al-Cr-Si systems / S. Cui, I.-H. Jung // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – Т. 708. – P. 887-902.
28. Dasgupta, T. Role of milling parameters and impurity on the thermoelectric properties of mechanically alloyed chromium silicide / T. Dasgupta, A. M. Umarji // Journal of Alloys and Compounds. – 2008. – Т. 461. – № 1-2. – P. 292-297.
29. Demir, O. Reduction of Chromite in Liquid Fe-Cr-C-Si Alloys / O. Demir, R. H. Eric // Metallurgical and Materials Transactions B. – 1994. – Т. 25. – № 4. – P. 549-559.
30. Dinsdale, A. T. SGTE data for pure elements / A. T. Dinsdale // Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. – 1991. – Т. 15. – № 4. – P. 317-425.
31. Dollase, W. A. Structure of  $\text{Cr}_2\text{SiO}_4$  and possible metal-metal interactions in crystal and melt / W. A. Dollase, F. Seifert, H. S. C. O'Neill // Physics and Chemistry of Minerals. – 1994. – Т. 21. – № 1-2. – P. 104-109.
32. Du, Y. Experimental reinvestigation of the CrSi-Si partial system and update of the thermodynamic description of the entire Cr-Si system / Y. Du, J. C. Schuster // Journal of Phase Equilibria. – 2000. – Т. 21. – № 3. – P. 281-286.
33. Thermodynamic properties of chromium silicides / V. N. Eremenko [etc] // Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 1972. – Т. 11. – № 7. – P. 563-567.
34. Farjami, S. Shape Memory Effect and Crystallographic Investigation in VN Containing Fe-Mn-Si-Cr Alloys / S. Farjami, K. Hiraga, H. Kubo // Materials Transactions. – 2004. – Т. 45. – № 3. – P. 930-935.
35. Fukamichi, K. Nonferromagnetic Cr-Si-Mn Invar alloys / K. Fukamichi, H. Saito // AIP Conference Proceedings, 1975. – P. 384-385.
36. Fukunaga, O. Phase Equilibrium in the System  $\text{CrO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$  / O. Fukunaga, S. Saito // Journal of the American Ceramic Society. – 1968. – Т. 51. – № 7. – P. 362-363.
37. Gokhale, A. B. The Cr-Si (Chromium-Silicon) system / A. B. Gokhale, G. J. Abbaschian // Journal of Phase Equilibria. – 1987. – Т. 8. – № 5. – P. 474-484.
38. Goto, Y. On the Phase Diagram of the Cr-O System at High Pressure of Oxygen and Some Properties of the Compound  $\text{CrO}_{2+x}$  / Y. Goto, T. Kitamura // 粉体および粉末冶金. – 1962. – Т. 9. – № 3. – P. 109-113.
39. Halstead, A. Structure and hardness of Co-Mo-Cr-Si wear resistant alloys (Triballoys) / A. Halstead, R. D. Rawlings // Metal Science. – 1984. – Т. 18. – № 10. – P. 491-500.
40. Halstead, A. The fracture behaviour of two Co-Mo-Cr-Si wear resistant alloys («Triballoys») / A. Halstead, R. D. Rawlings // Journal of Materials Science. – 1985. – Т. 20. – № 4. – P. 1248-1256.
41. Halstead, A. The effect of iron additions on the microstructure and properties of the «Tribaloy» Co-Mo-Cr-Si wear resistant alloys / A. Halstead, R. D. Rawlings // Journal of Materials Science. – 1985. – Т. 20. – № 5. – P. 1693-1704.
42. Hasegawa, R. Exchange Interaction in Amorphous Cr-Pd-Si and Mn-Pd-Si Alloys / R. Hasegawa, C. C. Tsuei // Physical Review B. – 1970. – Т. 2. – № 6. – P. 1631-1643.
43. Microstructural design of hardfacing Ni-Cr-B-Si-C alloys / I. Hemmati [etc] // Acta Materialia. – 2013. – Т. 61. – № 16. – P. 6061-6070.

44. Hemmati, I. Dilution effects in laser cladding of Ni-Cr-B-Si-C hardfacing alloys / I. Hemmati, V. Ocelík, J. T. M. de Hosson // Materials Letters. – 2012. – Т. 84. – P. 69-72.
45. Holleman, A. F. Holleman-Wiberg's Inorganic Chemistry / A. F. Holleman, E. Wiberg, N. Wiberg. – Amsterdam: Elsevier, 2001. – 1924 p.
46. Hubbard, K. J. Thermodynamic stability of binary oxides in contact with silicon / K. J. Hubbard, D. G. Schloss // Journal of Materials Research. – 1996. – Т. 11. – № 11. – P. 2757-2776.
47. Inomata, K. Magnetic properties of amorphous Fe-Cr-Si-B alloys / K. Inomata, M. Hasegawa, S. Shimanuki // IEEE Transactions on Magnetics. – 1981. – Т. 17. – № 6. – P. 3076-3078.
48. Pressure Dependence of the Magnetic Transition in Cr-Rich Cr-Si Alloys / A. Jayaraman [etc] // Physical Review Letters. – 1976. – Т. 37. – № 14. – P. 926-928.
49. Katsura, M. Thermodynamics of nitride and hydride formation by the reaction of metals with flowing NH<sub>3</sub> / M. Katsura // Journal of Alloys and Compounds. – 1992. – Т. 182. – № 1. – P. 91-102.
50. Kiss, L. Kinetics of Electrochemical Metal Dissolution / L. Kiss. – Budapest: Akadémiai Kiado, 1988.
51. Klyushin, N. G. Stability regions of ferric oxides in an iron-water system / N. G. Klyushin, I. G. Gorichev, N. V. Malov // Zhurnal Fizicheskoi Khimii. – 1973. – Т. 45. – № 4. – P. 834-837.
52. Knippscheer, S. Intermetallic TiAl (Cr, Mo, Si) Alloys for Lightweight Engine Parts / S. Knippscheer, G. Frommeyer // Advanced Engineering Materials. – 1999. – Т. 1. – № 3-4. – P. 187-191.
53. Knotek, O. Structure of Ni-rich Ni-Cr-B-Si coating alloys / O. Knotek, E. Lugscheider, H. Reimann // Journal of Vacuum Science and Technology. – 1975. – Т. 12. – № 4. – P. 770-772.
54. Characterization of Fe-Mn-Si-Cr shape memory alloys containing VN precipitates / H. Kubo [etc] // Materials Science and Engineering: A. – 2004. – Т. 378. – № 1-2. – P. 343-348.
55. Kubota, B. Decomposition of Higher Oxides of Chromium Under Various Pressures of Oxygen / B. Kubota // Journal of the American Ceramic Society. – 1961. – Т. 44. – № 5. – P. 239-248.
56. Large unit cell crystal approximant in Ti-Cr-Si alloys / J. L. Libbert [etc] // Journal of Non-Crystalline Solids. – 1993. – Т. 153-154. – P. 53-57.
57. Behavior and Influence of Oxygen in Chromium Silicide Formation / C.-D. Lien [etc] // MRS Proceedings. – 1982. – Т. 18. – P. 235-242.
58. Cr effects on magnetic and corrosion properties of Fe-Co-Si-B-Nb-Cr bulk glassy alloys with high glass-forming ability / Z. L. Long [etc] // Intermetallics. – 2007. – Т. 15. – № 11. – P. 1453-1458.
59. Manufacturing of self-passivating W-Cr-Si alloys by mechanical alloying and HIP / P. López-Ruiz [etc] // Fusion Engineering and Design. – 2011. – Т. 86. – № 9-11. – P. 1719-1723.
60. Corrosion behaviour of amorphous Fe-Cr-Ni-(Si, P) alloys / M. F. López [etc] // Electrochimica Acta. – 1997. – Т. 42. – № 4. – P. 659-665.
61. Lugscheider, E. Melting behaviour of nickel-chromium-silicon alloys / E. Lugscheider, O. Knotek, K. Klöhn // Thermochimica Acta. – 1979. – Т. 29. – № 2. – P. 323-326.
62. Lukas, H. L. Computational Thermodynamics: The Calphad Method / H. L. Lukas, S. G. Fries, B. Sundman. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 323 p.
63. Lukashenko, G. M. Thermodynamic properties of chromium silicides / G. M. Lukashenko, V. R. Sidorko, L. M. Yupko // Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 1986. – Т. 25. – № 9. – P. 763-765.
64. Metallurgical and electrical properties of chromium silicon interfaces / A. Martinez [etc] // Solid-State Electronics. – 1980. – Т. 23. – № 1. – P. 55-64.
65. Mason, S. E. Structure and hardness of Ni-Mo-Cr-Si wear and corrosion resistant alloys / S. E. Mason, R. D. Rawlings // Materials Science and Technology. – 1989. – Т. 5. – № 2. – P. 180-185.
66. Structural, thermal, and magnetic properties of icosahedral Al-Cr-Mn-Si alloys / M. E. McHenry [etc] // Physical Review B. – 1989. – Т. 39. – № 6. – P. 3611-3615.
67. High-pressure crystal chemistry of chromous orthosilicate, Cr<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. A single-crystal X-ray diffraction and electronic absorption spectroscopy study / R. Miletich [etc] // Physics and Chemistry of Minerals. – 1999. – Т. 26. – № 6. – P. 446-459.
68. Some Thermodynamic Aspects of the Oxides of Chromium / A. Mittal [etc] // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2014. – Т. 45. – № 2. – P. 338-344.
69. Properties of Fe-Cr-Ni-Mn-Si (-Co) shape memory alloys / Y. Moriya [etc] // Le Journal de Physique IV. – 1991. – Т. 01. – № C4. – P. 433-437.
70. Formation and properties of Cr-Si sputtered alloys / M. Naka [etc] // Vacuum. – 2002. – Т. 65. – № 3-4. – P. 503-507.
71. Nikolaychuk, P. A. The revised Pourbaix diagram for silicon / P. A. Nikolaychuk // Silicon. – 2014. – Т. 6. – № 2. – P. 109-116.



72. Okamoto, H. Cr-Si (Chromium-Silicon) / H. Okamoto // Journal of Phase Equilibria. – 1997. – Т. 18. – № 2. – P. 222.
73. Okamoto, H. Cr-Si (Chromium-Silicon) / H. Okamoto // Journal of Phase Equilibria. – 2001. – Т. 22. – № 5. – P. 593.
74. Shape Memory Effect in Fe-Mn-Si-Cr-Ni Polycrystalline Alloys / H. Otsuka [etc] // Materials Science Forum. – 1991. – Т. 56-58. – P. 655-660.
75. Pashechko, M. I. Segregation of atoms of the eutectic alloys Fe-Mn-C-B-Si-Ni-Cr at friction wear / M. I. Pashechko, K. S. Lenik // Wear. – 2009. – Т. 267. – № 5-8. – P. 1301-1304.
76. Predel, B. Cr-Cs ... Cu-Zr / B. Predel. – Berlin, Heidelberg: Springer, 1994. – 354 p.
77. Raj, S. V. A preliminary assessment of the properties of a chromium silicide alloy for aerospace applications / S. V. Raj // Materials Science and Engineering: A. – 1995. – Т. 192-193. – P. 583-589.
78. Redlich, O. Algebraic representation of thermodynamic properties and the classification of solutions / O. Redlich, A. T. Kister // Industrial and Engineering Chemistry. – 1948. – Т. 40. – № 2. – P. 345-348.
79. Robins, D. The heats of formation of some transition metal silicides / D. Robins, I. Jenkins // Acta Metallurgica. – 1955. – Т. 3. – № 6. – P. 598-604.
80. Tensile behavior of helium charged V-Ti-Cr-Si type alloys / M. Satou [etc] // Journal of Nuclear Materials. – 1996. – Т. 233-237. – № 1. – P. 447-451.
81. Satou, M. High-temperature deformation of modified V-Ti-Cr-Si type alloys / M. Satou, K. Abe, H. Kayano // Journal of Nuclear Materials. – 1991. – Т. 179-181. – P. 757-761.
82. Satou, M. Tensile properties and microstructures of neutron irradiated V-Ti-Cr-Si type alloys / M. Satou, K. Abe, H. Kayano // Journal of Nuclear Materials. – 1994. – Т. 212-215. – P. 794-798.
83. Satou, M. Neutron irradiation damage of helium-charged V-Ti-Cr-Si-type alloys / M. Satou, K. Abe, H. Matsui // Journal of Nuclear Materials. – 1992. – Т. 191-194. – P. 938-941.
84. Schmalzried, H. Zur geometrischen Darstellung von Phasengleichgewichten / H. Schmalzried, A. D. Pelton // Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie. – 1973. – Т. 77. – № 2. – P. 90-94.
85. Sekimura, N. Silicon's role in determining swelling in neutron-irradiated Fe-Ni-Cr-Si alloys / N. Sekimura, F. A. Garner, J. W. Newkirk // Journal of Nuclear Materials. – 1992. – Т. 191-194. – P. 1244-1247.
86. Šimůnek, A. Si K, Si L, and Cr K x-ray valence-band studies of bonding in chromium silicides: Experiment and theory / A. Šimůnek, M. Polčík, G. Wiech // Physical Review B. – 1995. – Т. 52. – № 16. – P. 11865-11871.
87. Soleimani-Dorcheh, A. Oxidation and Nitridation Behavior of Cr-Si Alloys in Air at 1473 K / A. Soleimani-Dorcheh, M. C. Galetz // Oxidation of Metals. – 2015. – Т. 84. – № 1-2. – P. 73-90.
88. Improvement in the oxidation resistance of Nb-Ti-Si-Cr-Al-Hf alloys containing alloyed Ge and B / L. Su [etc] // Corrosion Science. – 2014. – Т. 88. – P. 460-465.
89. Suzuki, T. First Order Transition of the Spin Density Wave State in Cr-Si Alloys / T. Suzuki // Journal of the Physical Society of Japan. – 1977. – Т. 43. – № 3. – P. 869-874.
90. Single-Crystal Semiconducting Chromium Disilicide Nanowires Synthesized via Chemical Vapor Transport / J. R. Szczech [etc] // Chemistry of Materials. – 2007. – Т. 19. – № 13. – P. 3238-3243.
91. Tam, K. F. Enhancement of cavitation erosion and corrosion resistance of brass by laser surface alloying with Ni-Cr-Si-B / K. F. Tam, F. T. Cheng, H. C. Man // Surface and Coatings Technology. – 2002. – Т. 149. – № 1. – P. 36-44.
92. Tardy, Y. A method of estimating the Gibbs energies of formation of layer silicates / Y. Tardy, R. M. Garrels // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1974. – Т. 38. – № 7. – С. 1101-1116.
93. Tardy, Y. Prediction of Gibbs energies of formation of compounds from the elements-II. Monovalent and divalent metal silicates / Y. Tardy, R. M. Garrels // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1977. – Т. 41. – № 1. – P. 87-92.
94. Pourbaix Diagrams for Multielement Systems / W. T. Thompson [etc] // Uhlig's corrosion handbook. – Wiley, 2011. – P. 103-110.
95. Microstructure and oxidation behaviour of chromium-molybdenum silicides / A. Tomasi [etc] // Materials Science and Engineering: A. – 1997. – Т. 239-240. – P. 877-881.
96. Tsai, K.-Y. Sluggish diffusion in Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloys / K.-Y. Tsai, M.-H. Tsai, J.-W. Yeh // Acta Materialia. – 2013. – Т. 61. – № 13. – P. 4887-4897.
97. Tyurin, A. G. Thermodynamic analysis of the silicon effect on chemical and electrochemical stability of iron-chromium alloys / A. G. Tyurin // Protection of Metals. – 2004. – Т. 40. – № 1. – P. 14-22.
98. Microstructures and high temperature oxidation resistance of alloys from Nb-Cr-Si system / S. K. Varma [etc] // Journal of Materials Science. – 2010. – Т. 45. – № 14. – P. 3931-3937.
99. Vazquez, A. High-temperature oxidation behavior of Nb-Si-Cr alloys with Hf additions / A. Vazquez, S. K. Varma // Journal of Alloys and Compounds. – 2011. – Т. 509. – № 25. – P. 7027-7033.

100. Venkatraman, M. The Cr-H (Chromium-Hydrogen) system / M. Venkatraman, J. Neumann // Journal of Phase Equilibria. – 1991. – Т. 12. – № 6. – Р. 672-677.
101. Vernik, E. D. Simplified Procedure for Constructing Pourbaix Diagrams / E. D. Vernik // Corrosion. – 1967. – Т. 23. – № 12. – Р. 371-373.
102. Influence of IR-laser irradiation on  $\alpha$ -SiC-chromium silicides ceramics / M. Vlasova [etc] // Materials Science and Engineering: A. – 2005. – Т. 404. – № 1-2. – Р. 64-70.
103. Voglewede, B. The effects of uncommon silicides on the oxidation behavior of alloys from the Nb-Cr-Si system / B. Voglewede, V. R. Rangel, S. K. Varma // Corrosion Science. – 2012. – Т. 61. – Р. 123-133.
104. The NBS tables of chemical thermodynamic properties. Selected values for inorganic and C<sub>1</sub> and C<sub>2</sub> organic substances in SI units / D. D. Wagman [etc] // Journal of Physical and Chemical Reference Data. – 1982. – Т. 11. – Supplement № 2.
105. Wen, Y. Effects of carbon addition and aging on the shape memory effect of Fe-Mn-Si-Cr-Ni alloys / Y. Wen, M. Yan, N. Li // Scripta Materialia. – 2004. – Т. 50. – № 4. – Р. 441-444.
106. Weydanz, W. A room temperature study of the binary lithium-silicon and the ternary lithium-chromium-silicon system for use in rechargeable lithium batteries / W. Weydanz, M. Wohlfahrt-Mehrens, R. Huggins // Journal of Power Sources. – 1999. – Т. 81-82. – Р. 237-242.
107. White, W. B. The system chromium-oxygen at high oxygen pressures / W. B. White, R. Roy // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1975. – Т. 39. – № 6-7. – Р. 803-817.
108. Formation of Chromium Oxides in the Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CrO<sub>3</sub> Region at Elevated Pressures up to 4 Kilobar. / K.-A. Wilhelmi [etc] // Acta Chemica Scandinavica. – 1968. – Т. 22. – № 8. – Р. 2565-2573.
109. Formation of amorphous and nanocrystalline phases in high velocity oxy-fuel thermally sprayed a Fe-Cr-Si-B-Mn alloy / Y. Wu [etc] // Materials Science and Engineering: A. – 2006. – Т. 430. – № 1-2. – Р. 34-39.
110. Yamamoto, K. Phase constitution and microstructure of the Fe-Si-Cr ternary ferritic alloys / K. Yamamoto, Y. Kimura, Y. Mishima // Scripta Materialia. – 2004. – Т. 50. – № 7. – Р. 977-981.
111. High temperature wear and corrosion resistance of a Laves phase strengthened Co-Mo-Cr-Si alloy / M. X. Yao [etc] // Materials Science and Engineering: A. – 2006. – Т. 435-436. – Р. 78-83.
112. Yao, M. X. Microstructural characteristics and corrosion resistance in molten Zn-Al bath of Co-Mo-Cr-Si alloys / M. X. Yao, J. B. C. Wu, R. Liu // Materials Science and Engineering: A. – 2005. – Т. 407. – № 1-2. – Р. 299-305.
113. Yoshizawa, Y. Magnetic properties of Fe-Cu-M-Si-B (M = Cr, V, Mo, Nb, Ta, W) alloys / Y. Yoshizawa, K. Yamauchi // Materials Science and Engineering: A. – 1991. – Т. 133. – Р. 176-179.
114. Potential-pH diagrams of Cr-H<sub>2</sub>O system at elevated temperatures / H.-X. You [etc] // 中国有色金属学报. – 2010. – Т. 20. – Supplement № 1. – Р. s26-s31.
115. Zhang, X. Icosahedral phase formation in Ti<sub>68-x</sub>Cr<sub>32</sub>Si<sub>x</sub> alloys / X. Zhang, K. F. Kelton // Philosophical Magazine Letters. – 1990. – Т. 62. – № 4. – Р. 265-271.
116. Compositional dependence of the Néel transition, structural stability, magnetic properties and electrical resistivity in Fe-Mn-Al-Cr-Si alloys / Y. S. Zhang [etc] // Materials Science and Engineering: A. – 2002. – Т. 334. – № 1-2. – Р. 19-27.
117. Synthesis and properties of multiprincipal component AlCoCrFeNiSi<sub>x</sub> alloys / J. M. Zhu [etc] // Materials Science and Engineering: A. – 2010. – Т. 527. – № 27-28. – Р. 7210-7214.

## ПРИМЕЧАНИЯ

1. В оригинальной работе [23] выражение (3) приводится в виде ряда Редлиха-Кистера [78], коэффициенты которого зависят от температуры. В данной работе для упрощения выражения в него подставлена температура 298,15 К и приведены подобные члены.
2. Активность  $i$ -го компонента твёрдого раствора (стандартное состояние – чистый твёрдый компонент) связана с его избыточным химическим потенциалом соотношением  $RT \ln a_i = RT \ln x_i + \mu_i^E$ . Последний, в свою очередь, может быть выражен из молярной избыточной энергии Гиббса твёрдого раствора, см., например, [3].
3. Методика построения и анализа диаграмм состояния систем Me<sub>1</sub> – Me<sub>2</sub> – O представлена в работах [5; 6; 46]. По классификации диаграмм состояния металлических систем, предложенной авторами [62; 84], подобные диаграммы относятся к третьему типу.
4. Методика построения и анализа диаграмм потенциал-рН для многокомпонентных систем представлена во множестве работ [50; 94; 101].

# УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ КНАГТУ: НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ 2019

## **АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА**

ФЕОКТИСТОВ С. И., ЧЖО ЗАЯР СО

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТИТАНОВЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ РАЗДАЧЕ

СОЛЕЦКИЙ В. В., НЮНЯЙКИНА М. С., ПЕРЕВАЛОВ А. А., КУРИНЫЙ В. В.

ДВУХСРЕДНЫЙ БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ

## **ЭНЕРГЕТИКА**

ИВАНОВ С. Н., БУНЬКОВ Н. А., ГОРБУНОВ А. В., ДАДЫНСКИЙ А. А.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАЛОИНЕРЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ

ПЛЕТНЁВ С. А., ШАЛОМОВ В. И.

ОБЗОР РАБОТ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН

НА СВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА

ГРОМОВ А. А., КОЛЯКИН В. Л., ТОЛОЧКИН А. С.

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ АВТОНОМНЫХ УСТАНОВОК

МИРОШНИЧЕНКО А. А., КУЛГАНАТОВ А. З., ГОРДИЕВСКИЙ Е. М., КОВАЛЁВ А. А., СОЛОМИН Е. В.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ ВЕТРО-СОЛНЕЧНЫХ УСТАНОВОК

ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ РОССИИ

ШАЛОМОВ В. И., КОБЛОВ А. Ю.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ

НА ДОКРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА МОЩНОСТЬЮ 180-230 МВт (ОБЗОР)

БУРКОВ А. Ф.

КРАТКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ДО КОНЦА XIX ВЕКА

## **УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА**

СОЛОВЬЕВ В. А., ПОПОВА В. С.

ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА ПРОВОДАХ ЛЭП

ЧЕРНЫЙ С. П., БУЗИКАЕВА А. В., ШЕВЧЕНКО М. В., ТИМОФЕЕВ А. К.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ НА

КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОЛИНОМА В АЛГОРИТМЕ ВЫВОДА СУГЕНО ПЕРВОГО ПОРЯДКА

СТЕЛЬМАЩУК С. В., КАПУСТЕНКО Д. В.

СОГЛАСОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ УСТРОЙСТВОМ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЛЕНТЫ

С МОДАЛЬНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

АЛЕКСАНДРОВ И. А.

ВЗАИМОСВЯЗЬ КЛЮЧЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

С ПОЗИЦИИ КОНЦЕПЦИИ ДОСТИЖЕНИЯ ИЗДЕЛИЕМ ЦЕЛЕВЫХ СВОЙСТВ

ПУТЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

СОЧЕЛЕВ А. Ф.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛЯТОРА ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

С ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫМ КАНАЛОМ

БЕРДОНОСОВ В. Д., ЖУРАВЛЁВ Д. О., ЗАУХТЕТ НАИНГ

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ БПЛА

ГУСЕНИЦА Я. Н., ШЕРСТОБИТОВ С. А.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ФОРМАЛИЗАЦИИ АДЕКВАТНОСТИ ИНФОРМАЦИИ

ЖАРИКОВА Е. П., ТРЕЩЕВ И. А., ГРИГОРЬЕВ Я. Ю., ГРИГОРЬЕВА А. Л.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

ОЛЕЩУК В. А., РАДЖАБОВ Д. У.

ВЛИЯНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОТОКА

НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА

РЫБАКОВ А. В., ЕВДОКИМОВ С. А., КРАСНОВ А. А., ШЕПТУНОВ С. А., ШУРПО А. Н.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ В КОМПЬЮТЕРНОЙ СРЕДЕ

ЗАЙЧЕНКО И. В., БАЖЕРЯНУ В. В., СОКОЛОВА В. С.

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ РЕМОНТА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ

КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СОСТАВЕ ИЗДЕЛИЯ И ОЦЕНКА ЭНЕРГОЗАТРАТ

КУПОВА А. В., ЛАНОВЕНКО Е. В., СОЛОВЬЕВ В. А., ГУДИМ А. С.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДУГОВОЙ ПЕЧИ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

В MATLAB И ОЦЕНКА ЭНЕРГОЗАТРАТ

КИМ К.И., КИМ К.К.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ РОТОРА АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

НА ХАРАКТЕР ПРОТЕКАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ



## МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

ГУЛЬКОВ А. Н., ПАНИЧЕВ А. М., САВЧЕНКО В. Н.

ВРАЩАТЕЛЬНАЯ ДИНАМИКА ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТЕЛ, ЭФФЕКТ ДЖАНИБЕКОВА  
И САЛЬТАЦИОННАЯ ГИПОТЕЗА ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

КОЗИН В. М., ЗЕМЛЯК В. Л., КОЖАЕВ А. В

ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЬДА НА ПАРАМЕТРЫ

РЕЗОНАНСНЫХ ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

МИХАЛЬКОВА Л. А., ЩЕТИНИН В. А., СТУПИН А. В., САРИЛОВ М. Ю.

ДИАГНОСТИКА ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ НЕФТЕПРОВОДА, НАХОДЯЩЕГОСЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

САРИЛОВ М. Ю., ЛИСКОВ П. А., ЖМАК М. Д.

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКОВ-ОТРАЖАТЕЛЕЙ И РЕЗЕРВУАРОВ-ГАЗГОЛЬДЕРОВ  
С ЦЕЛЬЮ СОКРАЩЕНИЯ ПОТЕРЬ НЕФТЕПРОДУКТОВ ИЗ РЕЗЕРВУАРОВ

САБЛИН П. А., ЖИГАЛКИН К. А.

ДИНАМИКА СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

ГОРЕЛОВ Д. А., САРИЛОВ М. Ю.

РЕКОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ИЗОМЕРИЗАЦИИ

С ЦЕЛЬЮ ВОВЛЕЧЕНИЯ В ПРОЦЕСС ГЕПТАН-ОКТАНОВОЙ ФРАКЦИИ

РОМАНОК Е. В.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА ОБЩЕГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

НА ДВУХСЛОЙНЫХ ФИЛЬТРАХ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА

ИВАНОВ С. Н., САРИЛОВ М. Ю., ПРОСОЛОВИЧ А. А., РЕШЕТНИК У. Е.

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРИВОДА

ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

ВЕРЕЩАГИНА А. С., ХАРИТОНОВ А. А.

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

В УСЛОВИЯХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

ИВАНОВ С. Н., КИМ К. К., САРИЛОВ М. Ю.

РАСЧЁТ НАДЁЖНОСТИ ПРИВОДА ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ГРАКОВ С. А., БОХАН В. В., БОБРОВ С. П., ЗУБАРЕВ А. В.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И РАСЧЁТА КОМПЕНСИРУЮЩИХ

ПОЛУЖЁСТКИХ МЕМБРАННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МУФТ

ИВАНОВ С. Н., КИМ К. К., САРИЛОВ М. Ю., СЕМИБРАТОВА М. В.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИВОДНОГО МЕХАНИЗМА СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА

КОНЮХОВА Я. В., КИМ В. А., МОКРИЦКИЙ Б. Я.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЁС

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

КИМ В. А., БЕЛОВА И. В.

СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ МЕЖЗЁРЕННЫХ ГРАНИЦ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ЛАЗЕРНОМ ЛЕГИРОВАНИИ

ПОЛЯНСКАЯ И. Л., БЕЛОВА Л. В., УСТЮГОВА Н. В., СТАСЕЛЬКО О. Л.

ПРЕВРАЩЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО АУСТЕНИТА ПРИ НАГРЕВЕ СТАЛИ 95Х18Ш

БАШКОВ О. В., КИМ В. А., ЛОНЧАКОВ С. З., ФИЗУЛАКОВ Р. А., БЕЛОВА И. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ 12Х18Н10Т

ПЯЧИН С. А., БУРКОВ А. А., МОКРИЦКИЙ Б. Я., ВЛАСОВА Н. М.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ТІЗАІ ПОКРЫТИЙ В ЗАВИСИМОСТИ

ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ДОБАВКИ В4С И ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА

ПРОЦЕНКО А. Е., МАЛЫШЕВА Д. П., ПЕТРОВ В. В., ШПИЛЕВ А. М.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЭНДВИЧ-КОНСТРУКЦИЙ

БАХМАТОВ П. В., ПЛЕТНЕВ Н. О.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

КИМ В. А., АУНГ НГВЕ ТЭЙН, ЛЫСЕНКО В. В., АФАНАСЬЕВА А. А.

РОЛЬ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА НА МУЛЬТИФРАКТАЛЬНУЮ ПАРАМЕТРИЗАЦИЮ МИКРОСТРУКТУР

ПЕТРОВ В. В., ШПИЛЕВ А. М., ЕВСТИГНЕЕВ А. И., МОКРИЦКИЙ Б. Я., КОНЕВЦОВ Л. А.

Д. И. МЕНДЕЛЕЕВ – СИМВОЛ НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ И ПАТРИОТ РОССИИ



# Учёные записки

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета

№ IV-1 (40)

2019

БАХМАТОВ П. В., МОСКАЕВА А. В., СТАРЦЕВ Е. А., УСАНОВ Г. И.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ФЛЮСА OK FLUX 10.71 И ПРОВОЛОКИ 12-22 ДЛЯ СВАРКИ ДВУХСТОРОННИХ СТЫКОВЫХ СО-ЕДИНЕЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

ПОЛЯНСКАЯ И. Л., БЕЛОВА Л. В., ЗЕМЛЯНОВА О. В.

ПРЕВРАЩЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО АУСТЕНИТА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ СТАЛИ 95Х18Ш

САРИЛОВ М. Ю., РЕШЕТНИК У. Е.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В МЕЖЭЛЕКТРОДНОМ ПРОМЕЖУТКЕ

ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

СИТАМОВ Э. С., МОКРИЦКИЙ Б. Я., ШАКИРОВА О. Г.

ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТВЁРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА

ПРИ ОБРАБОТКЕ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

КИМ В. А., СУЛЕЙМАНОВ Р. И., ДЖЕМИЛОВ Э. Ш.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПРИ СВЕРЛЕНИИ БРОНЗЫ БРА9-ЖЗЛ

С ПРИМЕНЕНИЕМ АКТИВИРОВАННЫХ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

КИМ В. А., ФАДЕЕВ В. С., АФАНАСЬЕВА А. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НОВОГО

КОМПОЗИЦИОННОГО ФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

ЛУКАЧЕВСКАЯ И. Г., ЛЕБЕДЕВ М. П., КЫЧКИН А. К.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ

КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРИМЕРЕ ТЕКСТОЛИТОВ

НЕЧИПАС Ю. П., ЗАГОРСКИЙ М. Ю.

К ВОПРОСАМ ОБ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО

ЗОНДИРОВАНИЯ В ЦИФРОВОЙ ФОРМЕ

ВОСТРИКОВ Я. А.

ФОРМИРОВАНИЕ НА ТВЁРДОМ СПЛАВЕ ЖАРОСТОЙКОГО И ИЗНОСОСТОЙКОГО

ОДНОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ АНОДНЫМ МАТЕРИАЛОМ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНИЯ И КРЕМНИЯ

НИКОЛАЙЧУК П. А.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ХИМИЧЕСКОЙ

И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ CR-SI

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНEDЕЯТЕЛЬНОСТИ

СИДОРОВ А. И., ЕВСТИГНЕЕВ А. И.

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ ЗА СЧЁТ ПРИЛИВОВ И ОТЛИВОВ МОРЯ

ЧЕРНЫШОВ Е. А., РОМАНОВ И. Д., РОМАНОВ А. Д., ГОРБАТОВ Р. О.

РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ИСПЫТАНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ШЛЕМОВ

## НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

ЕВСТИГНЕЕВ А. И., ШПИЛЕВ А. М., КОНЕВЦОВ Л. А.

РУССКОМУ УЧЁНОМУ-МАТЕРИАЛОВЕДУ ГРИГОРИЮ ВАЛЕНТИНОВИЧУ САМСОНОВУ 100 ЛЕТ

# Содержание

Научное издание

## Энергетика

Шаломов В. И., Коблов А. Ю.	
ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ НА ДОКРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА МОЩНОСТЬЮ 180-230 МВТ (ОБЗОР) .....	4
Бурков А. Ф.	
КРАТКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ДО КОНЦА XIX ВЕКА.....	11

## Управление, вычислительная техника и информатика

Зайченко И. В., Бажеряну В. В., Соколова В. С.	
УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ РЕМОНТА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СОСТАВЕ ИЗДЕЛИЯ И ОЦЕНКА ЭНЕРГОЗАТРАТ .....	16
Купова А. В., Лановенко Е. В., Соловьев В. А. Гудим А. С.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДУГОВОЙ ПЕЧИ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ В MATLAB И ОЦЕНКА ЭНЕРГОЗАТРАТ .....	22
Ким К.И., Ким К.К.	
ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ РОТОРА АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ НА ХАРАКТЕР ПРОТЕКАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ .....	28

## Машиностроение

Граков С. А., Бохан В. В., Бобров С. П., Зубарев А. В.	
ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И РАСЧЁТА КОМПЕНСИРУЮЩИХ ПОЛУЖЁСТКИХ МЕМБРАННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МУФТ .....	37
Иванов С. Н., Ким К. К., Сарилов М. Ю., Семибрата М. В.	
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИВОДНОГО МЕХАНИЗМА СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА .....	46
Конюхова Я. В., Ким В. А., Мокрицкий Б. Я.	
РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЁС .....	52

## Металлургия и материаловедение

Ким В. А., Сулейманов Р. И., Джемилов Э. Ш.	
ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПРИ СВЕРЛЕНИИ БРОНЗЫ БРА9-ЖЗЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ АКТИВИРОВАННЫХ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД .....	56
Ким В. А., Фадеев В. С., Афанасьева А. А.	
ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НОВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА.....	62
Лукачевская И. Г., Лебедев М. П., Кычкин А. К.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРИМЕРЕ ТЕКСТОЛИТОВ ...	69
Нечипас Ю. П., Загорский М. Ю.	
К ВОПРОСАМ ОБ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ЦИФРОВОЙ ФОРМЕ .....	74
Востриков Я. А.	
ФОРМИРОВАНИЕ НА ТВЁРДОМ СПЛАВЕ ЖАРОСТОЙКОГО И ИЗНОСОСТОЙКОГО ОДНОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ АНОДНЫМ МАТЕРИАЛОМ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНИЯ И КРЕМНИЯ .....	82
Николайчук П. А.	
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ХИМИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ CR-SI .....	88
УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ КНАГТУ: НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ 2019 .....	104

Учёные записки КнАГТУ

2019 № IV-1(40)

Науки о природе и технике

Выпускающий редактор  
Н. Ю. Костюрина

Подписано в печать 30.12.2019

Формат А4.

Бумага офисная 80 г/м<sup>2</sup>.

Усл. печ. л. 13,63.

Уч.-изд. л. 17,18.

Тираж 200. Заказ 29972.

Отпечатано в типографии  
КнАГУ  
681013, г. Комсомольск-на-А-  
муре,  
пр. Ленина, д. 27.

