

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ВЫПУСК 2(57)/2020

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-73606 от 31 августа 2018 г.

г. Ханты-Мансийск
2020 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА «ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА»

Карминская Татьяна Дмитриевна – главный редактор, кандидат технических наук, доцент, ректор Югорского государственного университета, ugrasu@ugrasu.ru, +7 (3467) 377-000 (доб. 101);

Шарова Полина Сергеевна – ответственный секретарь редакционной коллегии, заведующий единой редакцией научных журналов ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;

Исламутдинов Вадим Фаруарович – ответственный за выпуск, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет».

05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление по специальности 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки):

Карминская Татьяна Дмитриевна – кандидат технических наук, доцент, ректор ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет» – главный редактор;

Быстров Виталий Викторович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института информатики и математического моделирования – обособленное подразделение ФГБУН ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук»;

Вохминцев Александр Владиславович – кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Интеллектуальные информационные технологии и системы» ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет» совместно с ФИЦ «Информатика и управление» Российской академии наук, Институт системного анализа;

Попков Юрий Соломонович – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института (НОЦ) технических систем и информационных технологий ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;

Мельников Андрей Витальевич – доктор технических наук, профессор базовой кафедры ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет» на базе АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий», директор АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий»;

Полищук Юрий Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник центра дистанционного зондирования Земли АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий»;

Пятков Сергей Григорьевич – доктор физико-математических наук, профессор Института цифровой экономики ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;

Славский Виктор Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор Института цифровой экономики ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;

Халиуллина Дарья Николаевна – кандидат технических наук, научный сотрудник Института информатики и математического моделирования – обособленного подразделения ФГБУН ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук».

05.16.00 Металлургия и материаловедение по специальности 05.16.09 Материаловедение (по отраслям) (технические науки):

Баев Владимир Константинович – доктор технических наук, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт теоретической и прикладной механики имени С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук»;

Бороненко Марина Петровна – кандидат технических наук, доцент Института цифровой экономики ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;

Долматов Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент Института цифровой экономики ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;

Иордан Владимир Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»;

Алымов Михаил Иванович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института цифровой экономики ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;

Гуляев Павел Юрьевич – доктор технических наук, профессор Института цифровой экономики ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;

Котванова Маргарита Кондратьевна – кандидат химических наук, доцент Института нефти и газа ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;

Милюкова Ирина Васильевна – кандидат физико-математических наук, доцент Института цифровой экономики ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет».

12.00.00 Юридические науки по специальности 12.00.08 Уголовное право и криминология; уголовно-исполнительное право (юридические науки):

Авдеев Вадим Авдеевич – профессор, доктор юридических наук, профессор кафедры уголовного права и уголовного процесса ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;

Козаченко Иван Яковлевич – доктор юридических наук, профессор, заведующий кафедрой уголовного права ФГБОУ ВО «Уральский государственный юридический университет»;

Рарог Алексей Иванович – доктор юридических наук, профессор, научный руководитель кафедры уголовного права ФГБОУ ВО «Московский государственный Юридический университет имени О. Е. Кутафина»;

Кибальник Алексей Григорьевич – доктор юридических наук, профессор, заведующий кафедрой уголовного права и процесса ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»;

Ким Евгений Петрович – доктор юридических наук, профессор, заведующий кафедрой уголовного права ФГКОУ ВО «Московская Академия Следственного комитета Российской Федерации»;

Наваан Гантулга – кандидат юридических наук, профессор, начальник Института исполнения судебных решений МНР;

Сергеевич Владимир Анатольевич – доктор юридических наук, профессор, директор Центра прикладного уголовного правосудия, профессор Школы Правоохранения и управления юстицией Западного Иллинойского университета;

Розенко Станислав Васильевич – кандидат юридических наук, доцент, директор Юридического института ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;

Понятовская Татьяна Григорьевна – профессор, доктор юридических наук, профессор кафедры уголовного права ФГБОУ ВО «Московский государственный юридический университет имени О. Е. Кутафина»;

Анисимов Валерий Филиппович – доктор юридических наук, доцент, профессор кафедры правоохранительной деятельности и адвокатуры ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет».

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

РОССИЙСКИЙ ИНДЕКС
НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ
Science Index 

ISSN 1816-9228 (печатная версия)
ISSN 2078-9114 (электронная версия)
Журнал издается с 2005 года
Журнал включен в РИНЦ

© ФГБОУ ВО «Югорский
государственный университет», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ	5
Долматов А. В.	
Методы контроля структурообразования в процессах высокотемпературного синтеза (обзор)	7
Еськов А. В., Кирюшин И. И.	
Оптический метод контроля распыливания топлива с использованием скоростной видеосъемки	19
Умбетов С. В., Пронин С. П.	
Классификация и анализ средств контроля коррозионных повреждений внутренних поверхностей подземного металлического трубопровода	27
НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ	39
Цуи Х. Ж., Григорьевская А. А., Гуляев П. Ю.	
Сценарии структурообразования в волне горения системы Ni-Al с упрочняющими добавками	41
Кудреватых А. А., Клименко Л. С.	
Синтез и свойства галогенсодержащих макроциклических иминов антрахинона – хемосенсоров на катионы металлов	50
Бороненко М. П., Милюкова И. В., Чеклов С. А.	
СВ-синтез алюмо-марганцевого сплава на основе системы Al-MnO ₃	57
Шахназаров К. Ю.	
Экстремумы на температурных зависимостях физико-механических свойств железа как следствие превращения в нем при ~ 650 °С	66
Иордан В. И., Шмаков И. А.	
Компьютерное молекулярно-динамическое моделирование микрокинетики СВС в атомной структуре с шахматноподобным расположением наноразмерных блоков из атомов Ni и Al	71
Тамбовцев А. С., Беляев В. В., Гуляев И. П.	
CFD-анализ взаимодействия частиц с поверхностью в условиях суспензионного плазменного напыления	78
АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РЕАЛИЗАЦИИ УГОЛОВНО-ПРАВОВЫХ И КРИМИНОЛОГИЧЕСКИХ МЕР ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ПРЕСТУПНОСТИ	89
Авдеева Е. В.	
Актуальные вопросы исчисления срока лишения свободы при зачете времени содержания под стражей и домашнего ареста	91
Розенко С. В., Игоница Е. О.	
Противодействие ятрогенным преступлениям: уголовно-правовые и уголовно-процессуальные проблемы	99
Хармаев Ю. В., Васильева Ж. А.	
Вопросы виктимного поведения граждан как объект исследований, проводимых научными коллективами приграничных государств	107
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	113
Сафонов Е. И., Шиленьков Д. В., Кузнецова И. Е.	
Автоматизация составления справки об обеспеченности учебно-методической документацией образовательной программы по направлению обучения	115
Наши авторы	124

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ
ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

*Работа выполнена в рамках проектов
РФФИ №18-08-01475 и 18-08-01152.*

А. В. Долматов

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ПРОЦЕССАХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА (ОБЗОР)

В работе приведен обзор современных методов изучения динамики структурообразования материалов. Выполнен анализ возможностей методов динамической электронной микроскопии и оптических методов контроля структурно-фазового состояния материалов в высокотемпературных быстропротекающих процессах. Рассмотрены методы пирометрии в области СВС, газотермического напыления покрытий и аддитивного синтеза изделий из металла и керамики. Представлен обзор нового бесконтактного метода измерения температуры и спектральной степени черноты материалов. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на реализацию подхода пирометрического контроля структурообразования в высокотемпературных процессах. Приведен пример комплексных исследований динамики структурных образований: металл-кислород, металл-углерод – на поверхности фольги вольфрама, молибдена и тантала, нагреваемой электрическим током в инертной газовой среде. В нем результаты пирометрических исследований сопоставлены с микроструктурой и микроэлементным составом фаз замороженных образцов. В завершении работы приведен вывод о рациональной организации контроля структурообразования в процессах высокотемпературного синтеза с точки зрения построения системы автоматического регулирования.

Ключевые слова: СВС, газотермическое напыление, аддитивный синтез, фаза, структура, температура, динамическая электронная микроскопия, тепловизионная съемка, степень черноты, материал.

A. V. Dolmatov

METHODS OF CONTROL OF STRUCTURE FORMATION IN THE PROCESSES OF HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS (REVIEW)

The paper provides an overview of modern methods for studying the dynamics of structure formation of materials. The analysis of the possibilities of dynamic electron microscopy methods and optical methods for controlling the structural-phase state of materials in high-temperature fast-flowing processes is carried out. Methods of pyrometry in the field of SHS, gas-thermal spraying of coatings, and additive synthesis of metal and ceramic products are considered. A review of a new non-contact method for measuring the temperature and spectral degree of blackness of materials is presented. The results of theoretical and experimental studies aimed at implementing the approach of pyrometric control of structure formation in high-temperature processes are presented. An example is given of complex studies of the dynamics of structural formations: metal-oxygen, metal-carbon, on the surface of a tungsten, molybdenum and tantalum foil heated by electric current in an inert gas medium. It compares the results of pyrometric studies with the microstructure and microelement composition of the phases of frozen samples. At the end of the work, a conclusion is drawn on the rational organization of the observation of structure formation in high-temperature synthesis processes from the point of view of constructing an automatic control system. The work was carried out within the framework of the RFBR projects No. 18-08-01475 and 18-08-01152.

Key words: SHS, thermal spraying, additive synthesis, phase, structure, temperature, dynamic electron microscopy, thermal imaging, degree of blackness, material.

Введение

В быстропротекающих процессах создания материалов важно понимание механизмов реорганизации вещества и стадий, на которых можно эффективно осуществлять внешнее воздействие для управления качеством конечного продукта. Регулирование процессов в технологиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) материалов, газотермического напыления (ГТН) функциональных покрытий, прямого лазерного построения готовых изделий из металла и керамики возможно при решении таких задач контроля, как идентификация фазового состояния вещества или перехода между состояниями, измерение характерной температуры перехода, определение свойств материала до и после превращения. Причем в случае автоматического регулирования указанные задачи должны решаться в режиме реального времени.

Характерные особенности технологий СВС, ГТН и лазерного построения металлических и керамических изделий: температура формирования продукта – 800–5000 К; дисперсность исходных веществ (характерный размер реакционных областей) – 1–100 мкм; время протекания (наблюдения) явления – 0.1–100 мкс – предъявляют высокие требования к способу контроля структурно-фазовой динамики материала в процессе синтеза.

Цель данной работы заключалась в сравнении известных методов контроля структурообразования в материалах, выявлении их достоинств при наблюдении высокотемпературных быстропротекающих процессов и выборе стратегии разработки нового измерительного подхода для внедрения в системы автоматического управления.

Обзор методов

В области контроля структурообразования разработку 4D электронной микроскопии под руководством Ahmed H. Zewail заслуженно назвали революционной [1]. Возможность следить за поведением атомных или молекулярных систем во времени, видеть их отклик на внешнее воздействие дает несравненно больше информации, чем анализ только начальной и конечной фазы материала. Развитие средств субпикосекундной электрографии, сверхбыстрой электронной дифракции, сверхбыстрой электронной кристаллографии, сверхбыстрой электронной микроскопии и 4D электронной томографии позволяет наблюдать физические процессы с фемтосекундным разрешением по времени и субангстремным разрешением по пространству. Выполнены интереснейшие исследования динамики структуры электронных оболочек молекул, процесса расталкивания электронного сгустка фемтосекундной длительности, процесса колебания кристаллической решетки, фазового перехода в тонких пленках, отклик наноматериалов на импульсное освещение или нагрев и др. [2–6].

В аддитивных технологиях, ГТН и методе СВС оценку качества изготавливаемого изделия в режиме реального времени можно дать, если отслеживать значительную долю актов взаимодействия отдельных частиц, в которых наблюдаются стадии соударения, деформации, нагрева, плавления, кристаллизации и остывания. Проконтролировать каждый из этих процессов не способна даже сверхбыстрая электронная микроскопия – по той причине, что она осуществляет не прямую съемку акта структурообразования в веществе, а реконструирует динамику этого процесса на основе статистических изображений его различных стадий. Для этого трансмиссионные электронные микроскопы имеют два источника. Первый из них формирует лазерный или электронный импульс, который воздействует на объект исследования, как правило, нагревая его. Второй источник после заданной временной задержки генерирует электронный сгусток фемтосекундной длительности, который, проходя сквозь образец, формирует сигнал, попадающий на ПЗС-детектор. Однако для накопления детектором

изображения приемлемого уровня сигнала требуется повторить синхронную работу первичного и вторичного источников от 100 до 10000 раз, после чего будет получено статистическое изображение одной фазы нагрева образца. Изменяя время задержки между импульсами первичного и вторичного источников, создается серия подобных изображений, отражающих различные фазы нагрева. Прецизионная синхронизация источников позволяет реконструировать физический процесс с фемтосекундным разрешением [7].

В работе [8] приведен обзор результатов и история применения динамической электронной микроскопии и динамической дифрактографии в области СВС. Ее содержание позволяет сделать следующие выводы. Организация процесса высокотемпературного синтеза внутри электронного микроскопа – очень сложная задача. Для регистрации процесса горения нужны сверхчувствительные детекторы, которые могли бы регистрировать электронное изображение микроструктуры образца за более короткое время, чем время реакции. Объектом исследования может выступать модельная реакционная ячейка или многослойная нанопленка. Рентгеновские дифрактографы имеют сравнительно слабый источник, который не позволяет получать более 10 снимков в секунду. Интенсивность синхротронного источника излучения на несколько порядков выше, чем у рентгеновского. Это позволяет получать дифрактограммы с разрешением порядка 0.1–1 мс. При этом глубина проникновения излучения в массивный образец составляет 10–50 мкм, а приемлемый уровень сигнала на детекторе может быть получен при облучении области 5х5 мм. На многослойной Ni-Al фольге толщиной 30 мкм при фокусировке синхротронного пучка в пятно диаметром 60 мкм может быть получено дифракционное кино с наилучшим разрешением 55 мкс.

В целом анализ применения методов динамической электронной микроскопии и динамической дифрактографии в области СВС материалов показывает, что их использование в настоящее время возможно только на уровне научных исследований. При этом наиболее распространенным является использование дифрактографии рентгеновского излучения, обладающего наименьшей разрешающей способностью среди рассмотренных подходов. Исследования фазовой динамики в СВС на синхротроне являются дорогими и требуют предварительной подготовки на более простых рентгеновских установках. Применение динамической электронной микроскопии в научных исследованиях скорее экзотика, чем повседневная реальность. Следует также отметить, что интенсивные пучки излучения, воздействующие на экспериментальный образец в ходе наблюдения динамики фаз и микроструктуры материала, могут вносить серьезное возмущение в процесс СВС. Использование рассмотренных выше методов в областях газотермического напыления и аддитивного синтеза изделий из металла и керамики представляет собой на порядок более сложную задачу, и примеры научных исследований на их основе автором не обнаружены.

В области оптического контроля структурообразования в СВС применяют видеокамеры, которые позволяют отслеживать динамику топографии реакционной системы в течение всех циклов превращений [9]. Для этого используют лазерную подсветку, интенсивность которой сравнима с интенсивностью теплового излучения реагирующей системы. В ряде случаев по резкому изменению уровня сигнала на кадрах видеосъемки в условиях лазерной подсветки удастся обнаружить в волне горения разные фазовые компоненты [10]. Однако такие наблюдения являются в основном бинарными, когда низкие уровни сигнала сопоставляются с одной фазой, а высокие – с другой. В таком подходе индикатором фазы материала выступает его поглощательная способность. К недостаткам метода с лазерной подсветкой можно отнести два фактора. Во-первых, тепловое излучение в этом методе выступает в роли шума, затрудняя установление взаимосвязи между уровнем регистрируемого сигнала и фазой, т. к. интенсивность теплового излучения, кроме фазы, зависит еще от температуры. Во-вторых, повышенная интенсивность лазерного излучения (например, на порядок или два превосходящая тепловую составляющую) способствует идентификации нескольких фаз вещества в поле изображения, но может существенно влиять на ход процесса СВС в зоне реакции.

В области контроля температуры процесса СВС наиболее популярными являются измерения на основе вольфрам-рениевых термопар ВР5/20 диаметром 10, 50, 100 мкм. Погрешность измерений в волне СВС данным методом составляет около 10–50 градусов, разрешение по времени – около 0,1 мс [8]. Известные экспериментальные исследования с применением яркостной пирометрии в области СВС позволяют контролировать температуру с пространственным разрешением до 10 мкм и временным 1 мкс [11]. Однако из-за неопределенности коэффициента излучения реагирующего образца точность измерения температуры хуже, чем у термопары. Использование тепловизоров дальнего инфракрасного диапазона (длина волны 2–5 мкм) для СВС оказалось неэффективным из-за низкой частоты съемки – около 30 кадров в секунду. В настоящее время появились быстродействующие модели (до 15000 кадров в секунду), но для работы с разрешением 10 мкм они требуют дорогостоящей инфракрасной оптики и специальных окон для наблюдения за процессом (флюорит, NaCl) [8].

Очень перспективными для массового применения в технологиях аддитивного и высокотемпературного синтеза в качестве средств контроля динамики фазы материала и его температуры являются скоростные тепловизионные камеры видимого и ближнего инфракрасного диапазона. По своей сути они также работают в 4D-континууме (две пространственные координаты, интенсивность теплового излучения и время). Наилучшее сочетание пространственного и временного разрешения имеют монохромные камеры технического зрения (соответственно 1–10 мкм и 1–100 мкс). В комплексе с процессорами параллельной обработки данных и машинным обучением они становятся передовым средством исследования быстропротекающих процессов в дисперсных системах [12–14]. Узкополосный светофильтр в оптическом тракте камеры превращает каждый фотоэлемент ее матричного сенсора в отдельный канал яркостной пирометрии, а регулярная структура сенсора и высокоскоростная съемка позволяют следить за динамикой поля температуры. Причем метод яркостной пирометрии, работающий в области Вина, имеет наибольшую чувствительность среди методов бесконтактного температурного контроля. Его недостаток состоит в необходимости определять абсолютный уровень сигнала, на который оказывают влияние свойства исследуемого объекта и характеристики измерительного тракта прибора. Как правило, наиболее отрицательным фактором выступает излучательная способность исследуемых материалов, которая может изменяться в физико-химическом процессе из-за структурно-фазовых превращений и искажать уровень измеряемой температуры. Реализация пирометрии спектрального отношения на основе цветных или системы пространственно совмещенных камер не позволяет решить эту проблему окончательно. Слабая температурная чувствительность метода спектральных отношений дает погрешность около 50 градусов при наблюдении феномена СВС [9; 10]. В потоках напыления неконтролируемое излучение плазмы и высокий квантовый шум детектируемого сигнала от быстро движущихся частиц приводят к погрешности измерения температуры на уровне 10–25 %, а зачастую дают просто абсурдные результаты [15–17].

Подход спектральной пирометрии основан на измерении температуры по форме спектра теплового излучения [18]. Его преимущество перед вышеописанным методом заключается в возможности обнаружения и блокировки линий резонансного излучения, большой выборке регистрируемых данных из области визирования (выборка на 3–4 порядка превосходит количество измерений в методе спектральных отношений), а также инвариантности измеряемой температуры к излучательной способности материала в приближении серого тела. Однако на современном этапе развития оптоэлектронных приборов реализовать данный метод в системах регистрации двумерных изображений быстропротекающих процессов невозможно. Гиперспектральные камеры строят изображения либо с помощью сканирования области визирования, либо последовательной регистрацией набора монохромных снимков на разных длинах волн [19; 20]. Это является принципиальным ограничением, которое не позволяет им контролировать процессы с разрешением лучше 500–100 мс.

В потоке газотермического напыления величина сигнала от отдельной частицы практически не регулируется временем экспозиции КМОП или ПЗС-сенсора, а зависит от времени

прохождения объекта мимо фотоэлемента, которое составляет доли или единицы микросекунд. С учетом спектрального разложения оптического излучения соотношение сигнал – шум в большинстве случаев измерения температуры объекта методом спектральной пирометрии стремится к единице. Лучшие результаты подход спектральной пирометрии дает в интегральных методах контроля запыленных высокотемпературных потоков, когда анализируется суммарный тепловой спектр от всего ансамбля частиц дисперсной фазы. Известные способы редукции и подгонки спектра в области Вина позволяют восстанавливать температурное распределение дисперсной фазы для потока напыления в целом, без пространственной и временной локализации [21; 22]. Однако и они испытывают проблемы, связанные с низкой температурной чувствительностью и неустойчивостью решений к шуму. Приемлемый уровень погрешности достигается только при оценке единственной температуры. В ряде работ показано, что для ансамбля частиц с одинаковыми оптическими свойствами и равномерным температурным распределением по суммарному тепловому спектру в области Вина с вероятностью 0.95 будет определена максимальная температура дисперсной фазы [23; 24].

Пирометрический контроль структурообразования

В 2017 году с участием автора запатентован новый метод бесконтактного измерения температуры – метод спектрально-яркостной пирометрии (СЯП) [25]. СЯП объединяет в средствах измерения лучшие качества яркостной и спектральной пирометрии: высокую температурную чувствительность и точность определения опорной (единственной) температуры. Наиболее значимым свойством СЯП является самокалибровка средства измерения в режиме *in situ*, т. е. калибровка осуществляется по объекту исследования в процессе наблюдения за ним. Оно позволяет отказаться от процедуры калибровки по специальным температурным эталонам или, наоборот, расширить спектр материалов и процессов для калибровки вторичных пирометров путем сравнения их показаний с данными прибора на базе метода СЯП [26; 27].

Подход СЯП реализован в тепловизионной системе YuNA (Yugra – Novosibirsk – Altai) (рис. 1), нацеленной на определения свойств конденсированной фазы потоков ГТН и аддитивного синтеза [28]. В работах [29–33] представлены результаты исследования пространственных распределений скорости и температуры частиц в стационарных потоках, генерируемых напылительным оборудованием различного типа, мощности и производителя.

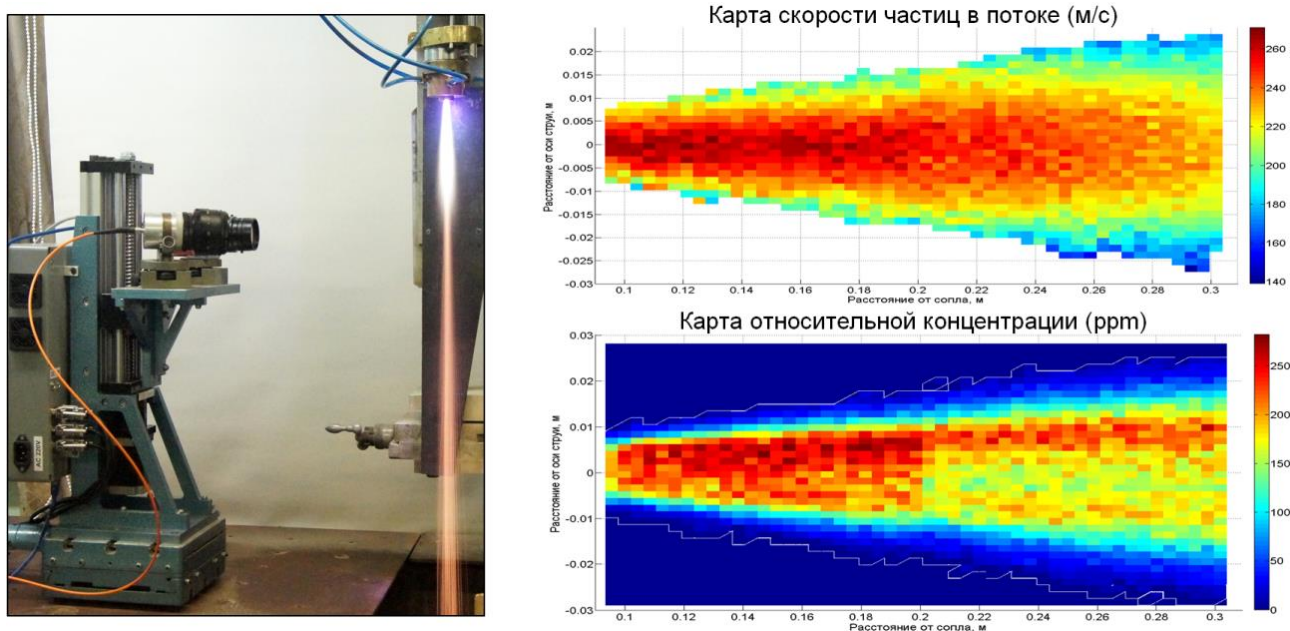


Рисунок 1 – Определение системой YuNA параметров конденсированной фазы
потока напыления плазмотрона ПНК-50 [28]

Метод СЯП, совмещающий два принципиально отличных способа пирометрии, обладает еще одним интересным качеством. Дополнительная калибровка средств измерения на базе СЯП по эталону яркостной температуры делает возможной бесконтактную оценку спектрального коэффициента излучения (спектральной степени черноты) объекта наблюдения. В работе [34] показано, что такая оценка – яркостно-спектральный коэффициент излучения (ЯСКИ) $\varepsilon_s(\lambda, T)$ – совпадает со спектральным коэффициентом излучения материала $\varepsilon_o(\lambda, T)$ на участке спектра, где величина ε_o не зависит от длины волны:

$$\frac{\varepsilon_s(\lambda_b, T)}{\varepsilon_o(\lambda_b, T)} = \exp \left(\lambda_b \cdot \left(\frac{d(\ln \varepsilon_o(\lambda, T))}{d\lambda} \right)_{\lambda_b} \right), \quad (1)$$

здесь λ_b – длина волны излучения в канале яркостной пирометрии, T – температура. Анализ справочных данных о спектральной степени черноты материалов с помощью формулы (1) показывает, что у многих из них в диапазоне температур 1200–2500 К на участке спектра от 300 до 1100 нм можно найти отрезок, где систематическая ошибка ЯСКИ не превышает 5 % (рис. 2).

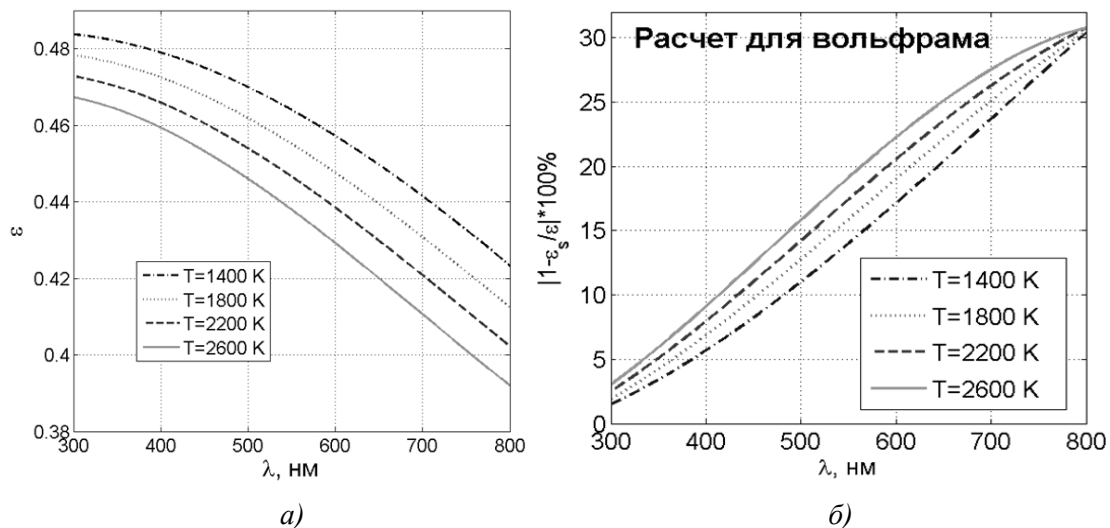


Рисунок 2 – Справочные данные по спектральному коэффициенту излучения вольфрама (а) и систематическая ошибка ЯСКИ вольфрама (б) [34]

Фундаментальные причины зависимости $\varepsilon_o(\lambda, T)$ материалов от длины волны и температуры кроются в строении вещества, его структурном и фазовом составе. У непрозрачных материалов эта величина будет определяться микро- и макроструктурой поверхности кристалла либо взаимодействием атомов в приповерхностном слое расплава. При достижении температуры фазового перехода, как правило, скачком меняются структурные свойства материала, а, следовательно, также резко должна измениться их спектральная степень черноты или ее поведение при дальнейшем изменении температуры. Эта идея лежит в основе пирометрического контроля структурообразования с помощью ЯСКИ. Для проверки описанного подхода авторами работы [35] создан экспериментальный комплекс с контролем ЯСКИ в локальной области диаметром 50–100 мкм с частотой до 100 кГц в температурном диапазоне 1000–4000 К. Эксперимент включал стационарный нагрев электрическим током в инертной газовой среде образцов фольги вольфрама, молибдена и тантала со степенью чистоты металла 99.95 %. Смысл данного воздействия заключался в том, чтобы заставить примесные атомы углерода, кислорода и азота диффундировать в приповерхностный слой образца с образованием там твердых растворов и химических соединений с металлом, нагреть сформировавшиеся системы до температуры фазового перехода и проследить за поведением ЯСКИ.

Детали исследований и основные результаты пирометрического контроля структурообразования представлены в работах [34–37]. Увеличение мощности источника тока в эксперименте вызывало перестройку температурного поля на поверхности образца. Все измерения температуры и ЯСКИ производились после завершения переходных процессов.

В опытах с молибденовой фольгой установлено, что в разных измерительных зонах на оси образца, параллельной линиям тока, скачок спектрального коэффициента излучения наблюдался при различной мощности источника, но на одной и той же температуре (рис. 3).

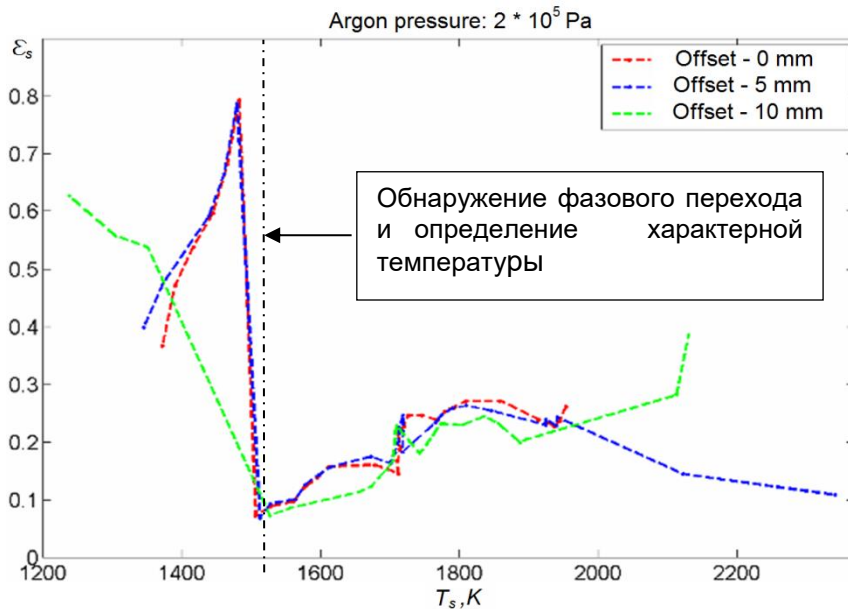


Рисунок 3 – Идентификация фазового перехода по поведению ЯСКИ

Данный факт показывает, что с высокой вероятностью причиной скачка ЯСКИ является фазовый переход, хотя вариация по измерительным зонам величины перепада и поведения ЯСКИ говорят о наличии других факторов, влияющих на абсолютное значение спектрального коэффициента излучения образца. Однако их мощность значительно ниже, чем у фазового превращения, и они не способны маскировать его.

При нагреве вольфрамовой фольги в температурном диапазоне 1450–2050 К на контролируемой поверхности наблюдалась эволюция нитевидных кристаллов и полусферических образований. При этом величина ЯСКИ активно изменялась, а ее абсолютная величина существенно отличалась от справочных данных для чистого вольфрама. За пределами указанного температурного диапазона изменения структуры поверхности образца отсутствовали, а отклонение ЯСКИ от спектрального коэффициента излучения вольфрама не превышало 2–4 % (рис. 2 а, 4).

Стационарность поля температуры и фазового состава в эксперименте позволила авторам выполнить комплексные исследования. В них были сопоставлены данные локальных пирометрических измерений при различной мощности тепловыделения с микроструктурой и микроэлементным составом фаз замороженных образцов, изученных на электронном микроскопе. Для интерпретации результатов эксперимента на танталовых образцах использовались фазовые диаграммы систем: Ta-O и Ta-C. С помощью кривой ЯСКИ обнаружены 5 характерных температур и построены вероятные траектории состояния материала в области наблюдения, соответствующие процессу нагрева образца (рис. 5).

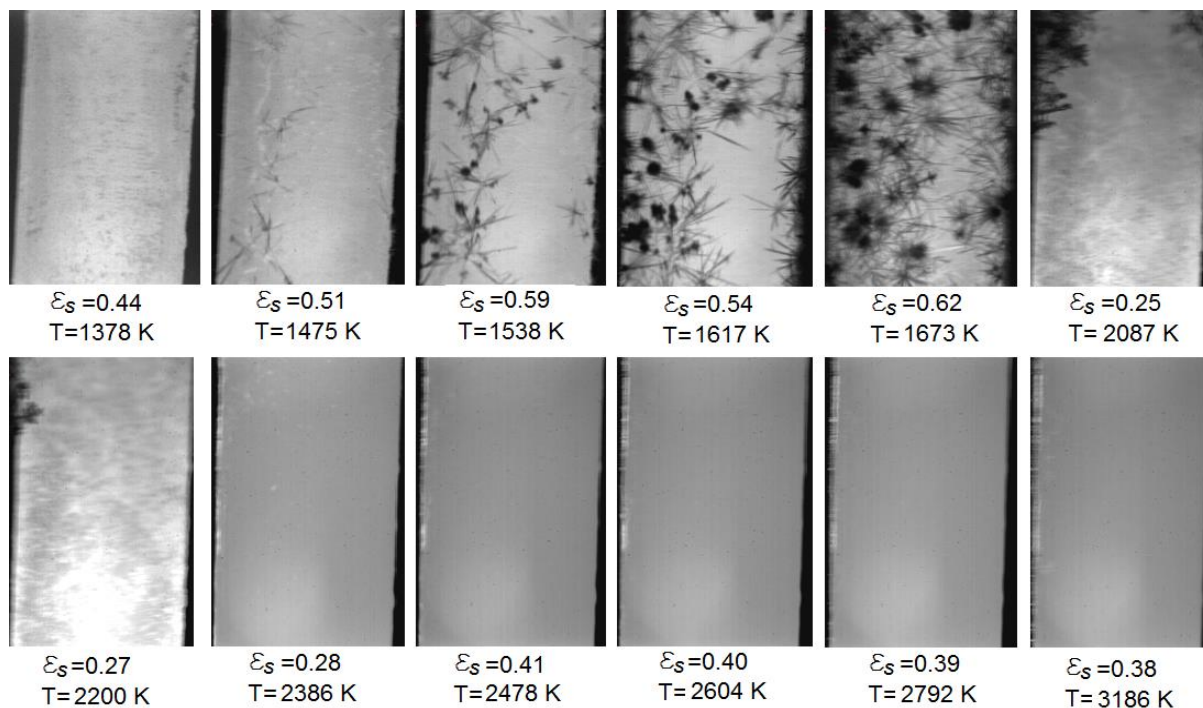


Рисунок 4 – Тепловизионные изображения (размер кадра 2х2.9 мм) эволюции структурных образований на поверхности вольфрамовых образцов с измеренными значениями температуры и ЯСКИ на длине волны 725 нм [37]

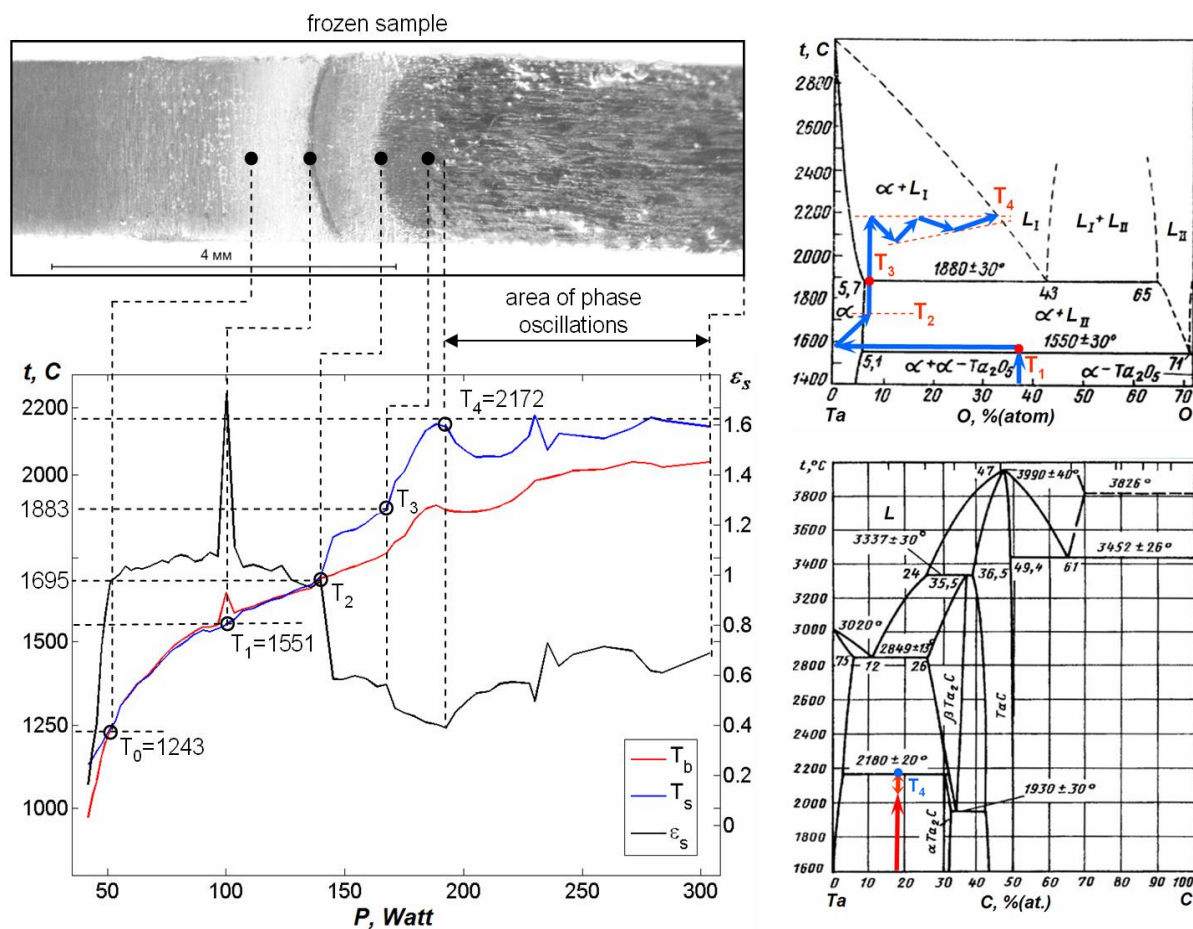


Рисунок 5 – Определение характерных температур структурно-фазовых переходов и построение вероятных траекторий состояния вещества на поверхности танталовых образцов [37]

T_0 – температура насыщения поверхностного слоя образца примесными атомами О и С. На основании анализа фазовой диаграммы Та-О сделан вывод, что T_1 соответствует температуре плавления эвтектики α -Та(О)+ α -Та₂О₅. В расплаве стало возможным растворение примесных атомов С из соседних областей и возникновение изотермического сгорания с образованием газообразных оксидов углерода, которые покидают образец. Снижение концентрации О и С вследствие горения ведет к образованию твердого раствора α -Та(О) и снова запускает процесс накопления примесных атомов на поверхности образца. Резкое уменьшение ЯСКИ образца тантала при температуре T_2 соответствует неравновесному переходу α -Та(О) $\rightarrow$ α -Та(О) + L2. T_3 соответствует фазовому переходу α -Та(О) + L2(65 ат. %) $\rightarrow$ α -Та(О) + L1(43 ат. %). При нагреве до T_4 на поверхности образца инициировались фазовые колебания. Дальнейшее увеличение мощности тепловыделения в образце привело к увеличению частоты колебаний «жидкость – твердое», но не способствовало превышению температурного порога T_4 . Причиной разрушения образца, по мнению авторов, стала его сильная эрозия и охрупчивание. Ошибка измерения в эксперименте температур T_1 , T_3 , T_4 методом СЯП с использованием ЯСКИ составила менее 1 %.

Выводы

Среди рассмотренных методов 4D электронная микроскопия имеет наилучшее пространственное и временное разрешение для исследования динамики структурных свойств материалов. Однако такое разрешение характерно для реконструкции эволюции явления из статистических изображений его различных стадий. В случае прямой диагностики временное разрешение динамической электронной микроскопии ограничивается чувствительностью твердотельных приемников изображения и зависит от мощности электронного пучка. Повышение временного разрешения требует увеличения мощности пучка, что отрицательно сказывается на качестве исследования процессов, особенно в химически реагирующих системах. Такой пучок способен вносить существенное возмущение в развитие наблюдаемого явления. В области контроля процессов высокотемпературного синтеза современные средства динамической электронной микроскопии ограниченно применяются для научных исследований СВС, но их невозможно использовать в системах автоматического управления процессами ГТН и аддитивного синтеза изделий из металла и керамики.

Оптические средства способны осуществлять косвенный контроль структурно-фазовой динамики. При этом в качестве посредника ими используется поглощательная или излучательная способность материалов. По временному разрешению оптические методы сопоставимы со средствами электронной микроскопии в случае прямой диагностики синтеза продукта. Однако их можно применить для большего спектра технологий высокотемпературного синтеза материалов и изделий, использовать как в области научных исследований, так и для разработки систем автоматизированного управления.

По мнению автора, на современном этапе развития приборов наилучшего качества контроля структурообразования в процессах высокотемпературного синтеза можно добиться за счет интеграции методов электронной микроскопии и оптической пирометрии. Первый подход обеспечит определение структурных свойств для дискретного набора фазовых состояний, которые возможны на траекториях синтеза материала. Второй выявит реализуемую траекторию синтеза, позволит исследовать динамику широкого круга высокотемпературных процессов и построить систему их автоматического регулирования.

Литература

1. Нобелевский лауреат создал первый 4D-микроскоп. – Текст : электронный // Время электроники. – URL: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/news/9318/doc/27941/> (дата обращения: 14.05.2020).

2. Tomographic imaging of molecular orbitals / J. Itatani [et al.]. – Nature. – 2004. – Vol. 432. – P. 867–871.
3. Space charge effects in ultrafast electron diffraction and imaging / Z. Tao [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2012. – Vol. 111, № 4. – P. 044316.
4. Zewail, A. H. 4D ultrafast electron diffraction, crystallography, and microscopy / A. H. Zewail // Annual Review of Physical Chemistry. – 2006. – № 57. – P. 65–103.
5. Ultrafast Electron Diffraction / V. A. Lobastov [et al.] // Ultrafast Optics IV : Selected Contributions to the 4th International Conference on Ultrafast Optics, Vienna, Austria / editors F. Krausz [et al.]. – New York : Springer, 2004. – P. 419–435.
6. Zewail, A. H. 4D Electron Microscopy : Imaging in Space and Time / A. H. Zewail, J. M. Thomas. – London : Imperial College Press, 2010. – 346 p.
7. Сверхбыстрая электронная дифракция и электронная микроскопия: современное состояние и перспективы / А. А. Ищенко, С. А. Асеев, В. Н. Баграташвили. – Текст : непосредственный // УФН. – 2014. – № 184. – С. 681–722.
8. Рогачев, А. С. Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетику / А. С. Рогачев, А. С. Мукасян. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 398 с. – ISBN 978-5-9221-1441-7. – Текст : непосредственный.
9. Капиллярные гидродинамические явления в процессе без газового горения / А. И. Кирдяшкин, В. Д. Китлер, В. Г. Саламатов. – Текст : непосредственный // Физика горения и взрыва. – 2007. – Т. 43. – № 6. – С. 31–39.
10. Особенности структурной динамики высокотемпературных металлотермических процессов на примере системы FeO-Al-Al₂O₃ / А. И. Кирдяшкин, В. Д. Китлер, В. Г. Саламатов, Р. А. Юсупов. – Текст : непосредственный // Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. 44. – № 1. – С. 80–84.
11. New procedure of high-rate brightness pyrometry for studying the SHS processes / D. A. Garkol', P. Y. Gulyaev, V. V. Evstigneev, A. B. Mukhachev. – Текст : непосредственный // Физика горения и взрыва. – 1994. – Т. 30. – № 1. – С. 72–77.
12. Рябченко, И. К. Программно-аппаратная реализация модуля обработки изображений потока частиц в составе интеллектуальной цифровой видеокамеры / И. К. Рябченко, А. И. Постоев, В. И. Иордан. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 8-3. – С. 342–347.
13. Ермаков, К. А. Система оптического контроля скорости и температуры частиц в технологиях газотермического напыления // Вестник Югорского государственного университета / К. А. Ермаков, А. В. Долматов, И. П. Гуляев. – Текст : непосредственный // 2014. – № 2 (33). – С. 56–68.
14. Исследования гомогенной и гетерогенной плазмы методами спектроскопии и скоростной визуализации / Т. Ш. Белялетдинов, С. В. Горячев, В. В. Щербаков, В. Ф. Чиннов. – Текст : непосредственный // Вестник МЭИ. – 2009. – № 4. – С. 61–69.
15. Mauer, G. Detection of Melting Temperatures and Sources of Errors Using Two-Color Pyrometry During In-Flight Measurements of Atmospheric Plasma-Sprayed Particles / G. Mauer, R. Vassen, D. Stover // International Journal of Thermophysics. – 2008. – № 29. – P. 764–786.
16. SprayWatch Systems // AEROMAC. – URL: <http://www.aeromac.com.sg/index.html> (Дата обращения: 25.04.2020).
17. NIR Sensor // SprayWerx Technologies. – URL: <http://www.spraywerx.com/equipment/nir-sensor/> (Дата обращения: 15.05.2020).
18. Магунов, А. Н. Спектральная пирометрия (обзор) / А. Н. Магунов. – Текст : непосредственный // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 4. – С. 5–28.
19. Шведов, А. Гиперспектральные сенсоры компании IMEC. Решения для высококачественного спектрального анализа / А. Шведов. – Текст : электронный // Фотоника : научно-производственная компания. – URL: <http://www.npk-photonica.ru/images/giperspektralnye-sensory-kompanii-imec-pdf163406.pdf> (Дата обращения: 14.05.2020).

20. Гиперспектральные регистрирующие системы видимого и ближнего ИК диапазонов на основе акустооптических фильтров / М. М. Мазур, В. Н. Шорин, В. М. Епихин [и др.]. – Текст : непосредственный // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Гиперспектральные приборы и технологии». – Красногорск : КОНТЕНАНТ, 2013. – С. 35–38.
21. Иордан, В. И. Редукция температурного распределения частиц гетерогенных потоков методом «обращения» их интегрального теплового спектра / В. И. Иордан, А. А. Соловьев. – Текст : непосредственный // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2010. – Т. 2. – № 98. – С. 85–95.
22. A New Sensor System for Industrial Combustion Monitoring and Control using UV Emission Spectroscopy and Tomography / R. Obertacke, H. Wintrich, F. Wintrich, A. Leipertz // Combustion Science and Technology. – 1996. – Vol. 121. – P. 133–151.
23. Магунов, А. Н. Спектральная пирометрия объектов с неоднородной температурой / А. Н. Магунов. – Текст : непосредственный // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80. – № 7. – С. 78–82.
24. Русин, С. П. Восстановление температуры непрозрачных тел по спектру теплового излучения: использование относительной излучательной способности для выбора оптимального спектрального участка / С. П. Русин. – Текст : непосредственный // Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – Т. 20. – № 5. – С. 643–659.
25. Способ спектрально-яркостной пирометрии объектов с неоднородной температурой поверхности : Патент № 2616937, МПК G01J 5/50 : № 2015123315 : заявл. 17.06.2015 : опубл. 18.04.2017 / И. П. Гуляев, А. В. Долматов, П. Ю. Гуляев, М. П. Бороненко. – 12 с. – Текст : непосредственный.
26. Control of dispersed-phase temperature in plasma flows by the spectral-brightness pyrometry method / A. V. Dolmatov, I. P. Gulyaev, P. Y. Gulyaev, V. I. Jordan. – DOI 10.1088/1757-899X/110/1/012058// IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – Tomsk, 2016. – P. 012058.
27. Gulyaev, I. P. Spectral-brightness pyrometry: Radiometric measurements of non-uniform temperature distributions / I. P. Gulyaev, A. V. Dolmatov. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.084 // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – № 116. – P. 1016–1025.
28. Gulyaev, I. P. Diagnostic system YuNA for disperse phase properties control in plasma and laser powder deposition processes / I. P. Gulyaev, A. V. Dolmatov. – DOI 10.1088/1742-6596/1115/3/032072 // Journal of Physics : Conference Series. – 2018. – № 1115(3). – P. 032072.
29. Dolmatov, A. V. The optical control system of dispersed phase properties in thermal spray process / A. V. Dolmatov, I. P. Gulyaev, V. I. Jordan. – DOI 10.1088/1757-899X/81/1/012041 // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 81(1). – P. 012041.
30. Arc-plasma wire spraying: an optical study of process phenomenology / I. P. Gulyaev, A. V. Dolmatov, P. Y. Gulyaev [et al.]. – DOI 10.1007/s11666-015-0356-6 // Journal of Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol. 24(8). – P. 1566–1573.
31. Anomalous high-velocity outbursts ejected from the surface of tungsten microdroplets in a flow of argon-air plasma / I. P. Gulyaev, A. V. Dolmatov, P. Y. Gulyaev [et al.]. – DOI 10.1088/1757-899X/110/1/012057 // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 110. – P. 012057.
32. Analysis and optimization of gas-thermal spray process in terms of condensed phase velocity and temperature / A. V. Dolmatov, I. P. Gulyaev, V. I. Kuzmin [et al.]. – DOI 10.1134/S0869864317010097 // Thermophysics and Aeromechanics. – 2017. – Vol. 24(1). – P. 83–94.
33. Сверхзвуковые плазменные потоки в процессах нанесения покрытий и получения дисперсных материалов / В. И. Кузьмин, И. П. Гуляев, Е. Е. Корниенко [и др.]. – Текст : непосредственный // Климовские чтения – 2016: перспективные направления развития

авиадвигателестроения : сборник докладов международной научно-технической конференции. – 2016. – С. 309–316.

34. Долматов, А. В. Оценка спектральной степени черноты материалов средствами оптической пирометрии / А. В. Долматов, И. В. Милюкова, А. Э. Алиев.]. – Текст : непосредственный // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. – 2018. – Т. 2. – № 1. – С. 147–155.

35. Пирометрические исследования структурообразования в процессе стационарного нагрева вольфрама / А. В. Долматов, И. В. Милюкова, А. М. Пургин, И. М. Исакова // Современные научные исследования и инновации. – 2016. – № 12 (68). – С. 281–290.

36. Автоматизированный комплекс пирометрического контроля структурообразования в материалах / А. В. Долматов, И. В. Милюкова, И. М. Исакова, А. В. Калачев. – Текст : непосредственный // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов. – 2017. – Т. 1. – № 7. – С. 172–183.

37. Dolmatov, A. V. Investigation of structure formation in thin films by means of optical pyrometry / A. V. Dolmatov, I. V. Milyukova, P. Y. Gulyaev. – DOI 10.1088/1742-6596/1281/1/012010 // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1281. – P. 012010.

А. В. Еськов, И. И. Кирюшин

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКОРОСТНОЙ ВИДЕОСЪЕМКИ

В статье рассматривается описание одного из оптических методов определения параметров распыливания топлива в атмосферных условиях и фиксация результатов с использованием высокоскоростной видеокамеры. Показана возможность интерпретировать изображения топливной струи в развитии по времени как распределение концентрации дисперсной среды с постоянным объемно-поверхностным диаметром Заутера, что составляет оптический метод контроля распыливания топлива.

Ключевые слова: дисперсная среда, оптические методы, качество распыливания, концентрация.

F. V. Eskov, I. I. Kiryushin

OPTICAL METHOD FOR FUEL ATOMIZATION CONTROL USING HIGH-SPEED VIDEO

The article discusses the description of one of the optical methods for determining the parameters of fuel atomization in atmospheric conditions and recording the results using a high-speed video camera. The possibility of interpreting images of a fuel jet in development over time as the distribution of the concentration of a dispersed medium with a constant volume-surface diameter (Sauter), which is an optical method for controlling fuel atomization, is shown.

Key words: dispersed medium, optical methods, spray quality, concentration.

В последние десятилетия постоянно повышаются требования к двигателям внутреннего сгорания. Даже небольшое улучшение характеристик двигателей по экономичности и экологии приводит к большому эффекту в масштабах страны.

Важнейшей из систем работы двигателя внутреннего сгорания является система топливоподачи, в которой процесс подготовки топливо-воздушной смеси зависит от точности изготовления отдельных элементов и степени их износа со временем эксплуатации, в частности от топливных распылителей, где качество их изготовления можно контролировать по параметрам струи распыленного топлива.

Среди существующих косвенных методов контроля структуры топливных струй наиболее предпочтительными являются оптические. В настоящей работе предложен метод, основанный на высокоскоростной видеорегистрации процесса формирования струи с последующей обработкой кадров и расчетом массовой концентрации капель топлива.

Основными параметрами, описывающими импульсный дисперсный поток распыляемой жидкости, являются распределение частиц по размерам или средний размер частиц (капель), их однородность и равномерность распределения концентрации по объему струи, скорость и направление движения частиц, а также геометрические параметры: угол раскрытия, длина струи. Для практических целей наиболее важными являются такие параметры, как мелкость распыливания, концентрация топлива в сечениях струи, длина струи.

Поток распыляемой жидкости (струи) представляется в виде конусообразного тела, из вершины которого происходит распыление, ось конуса совпадает с осью струи, а основание конуса может считаться передней частью струи. Передняя часть струи в данной работе не

исследуется. В поперечном сечении потока распыляемой жидкости плотность, концентрация, размеры частиц и их скорости будут различны [1; 2; 3].

При прохождении света через топливную струю в поперечном направлении используют спектральный коэффициент пропускания T_λ для излучения с длиной волны λ , величина которого определяется из закона Бугера – Ламберта – Бера $I = I_0 T_\lambda$ как

$$T_\lambda = \exp\{-\tau_1\} = \exp\{-K_\lambda l\}, \quad (1)$$

где τ_1 – оптическая толщина среды,

l – толщина среды,

K_λ – показатель ослабления единичным объемом среды.

В приближении равномерно распределенных частиц в объеме между двумя сечениями струи, образующих тонкий слой, содержащей n_s рассеивающих частиц площадью S_0 , показатель ослабления преобразуется к виду

$$K_\lambda = S_0 n_s = \frac{\pi \delta^2}{4} n_s Q_0(\rho, m), \quad (2)$$

где Q_0 – фактор эффективности ослабления,

$\rho = \pi \delta / \lambda$, δ – диаметр частиц,

$m = n - i\chi$ – комплексный показатель преломления частиц.

Если среда не монодисперсная, а размеры капель соответствуют некоторой функции распределения частиц по размерам $C(\delta)$ в достаточно тонком слое частиц, показатель ослабления будет иметь вид

$$K_\lambda = \frac{\pi n_s}{4} \int_0^\infty Q_0(\rho, m) \delta^2 C(\delta) d\delta. \quad (3)$$

Заменим n_s на n_m – массовую концентрацию частиц, учитывая $n_s = \frac{6n_m}{\pi \rho_w \int_0^\infty \delta^3 C(\delta) d\delta}$,

показатель ослабления:

$$K_\lambda = \frac{3n_m}{2\rho_w} \cdot \frac{\int_0^\infty Q_0(\rho, m) \delta^2 C(\delta) d\delta}{\int_0^\infty \delta^3 C(\delta) d\delta}. \quad (4)$$

Используя усредненный фактор эффективности ослабления $\bar{Q}_0$ для полидисперсной

среды $\bar{Q}_0 = \frac{\int_0^{\infty} Q_0(\rho, m) \delta^2 C(\delta) d\delta}{\int_0^{\infty} \delta^2 C(\delta) d\delta}$, спектральный коэффициент пропускания T_λ можно за-

писать, используя $\delta_{32} = \frac{\int_0^{\infty} \delta^3 C(\delta) d\delta}{\int_0^{\infty} \delta^2 C(\delta) d\delta}$ – диаметр (Заутера), в виде

$$T_\lambda = \exp \left\{ - \frac{1,5 n_m l \bar{Q}_0}{\rho_w \delta_{32}} \right\}. \quad (5)$$

Для практического применения при нахождении массовой концентрации частиц в сечении струи из закона Бугера – Ламберта – Бера $\ln \frac{I_0}{I} = \frac{1,5 n_m l \bar{Q}_0}{\rho_w \delta_{32}}$ и

$$n_m = \frac{\rho_w \delta_{32}}{1,5 l \bar{Q}_0 \ln \frac{I_0}{I}}. \quad (6)$$

Для длины волны $\lambda = 0,63$ мкм при исследовании капель бензина функция распределения по размерам $C(\delta)$ может быть применима в виде обобщенного гамма-распределения, вид фактора эффективности ослабления $\bar{Q}_0(\delta_{32})$ хорошо известен и находится вблизи значения 2; показатели преломления $n = 1,4$ для бензина [4] и $n = 1,385$ для дизельного топлива близки; в видимой части спектра значение показателя поглощения χ также мало, и можно рассуждать о принятии $\bar{Q}_0(\rho_{32}) = 2$ для $\rho = \frac{\pi \delta}{\lambda} > 40$ при распылении дизельного топлива

$$n_m = \frac{\rho_w \delta_{32}}{3 l \ln \frac{I_0}{I}}. \quad (7)$$

Из (7) можно найти выражение для массовой концентрации капель топлива из изображения топливной струи, если известен объемно-поверхностный диаметр (Заутера). Световой поток, проходя через струю распыленного топлива и попадая на фоточувствительную матрицу видеокамеры, сформирует изображение, яркость пикселей в котором будет описываться матрицей $I(i, j) = f(n_m(i, j))$.

С другой стороны, при исследовании струи распыленного топлива может быть использован подход к расчету параметров струи, описанный в работе [3]. Концентрация капель топлива P_s на расстоянии Z от сопла распылителя и расстоянии r от оси потока определяется по формуле [1–3; 5]

$$n_s = n_{s \max} \exp \left\{ -\frac{r^2}{6a_c^2 z^2} \right\}, \quad (8)$$

где $M = \frac{\mu_w^2}{\rho_w G d_c}$, $We = \frac{P_g}{P_w} = \frac{\rho_g u^2 \delta}{G}$, $a_c = 0,003 We^{0,3} \left(\frac{\rho_g}{\rho_w} \right)^{0,4} M^{-0,1}$, $n_{s \max} = \frac{n_{m \max}}{m_k}$,

$n_{m \max}$ – массовая концентрация топлива, z – расстояние от сопла распылителя до сечения струи, $m_k = \rho_w V_w$ – масса капли, ; μ_w , ρ_w , G – коэффициент динамической вязкости, плотность и коэффициент поверхностного натяжения жидкости, d_c – диаметр сопла; ρ_g – плотность газа; u – скорость полета капли в газе [5].

Распределение концентрации в поперечном сечении струи (8) по написанию напоминает нормальный закон распределения вероятностей [3]:

$$n_s(r) = \frac{n_{s \max}}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{r^2}{2\sigma^2} \right\}, \quad (9)$$

где $r^2 = x^2 + y^2$ – координаты малого объема частиц, σ – стандартное отклонение.

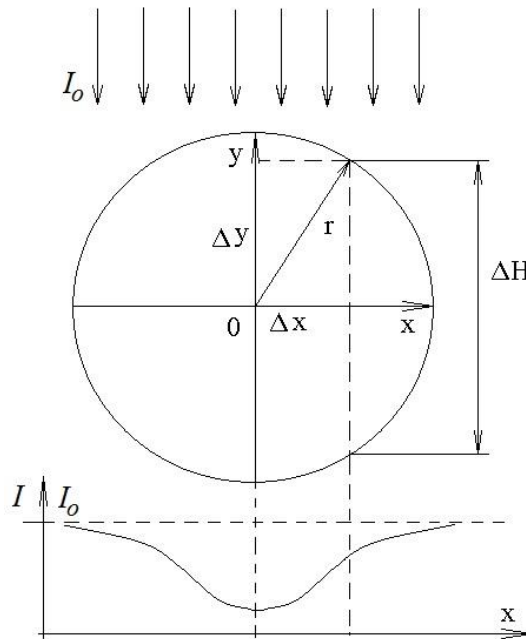


Рисунок 1 – Оптическое сечение топливной струи

Выражение (9) преобразуется к виду

$$n_s(\Delta x, \Delta y) = \frac{n_{s \max}}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{x^2}{2\sigma^2} \right\} \exp \left\{ -\frac{y^2}{2\sigma^2} \right\}. \quad (10)$$

По оси абсцисс располагаются ячейки фотокамеры, регистрирующие интенсивность оптического излучения, прошедшего через топливную струю. Поэтому в выражении для оптической толщины среды, зависящей от концентрации, интегрирование по координате x не проводится. Коэффициент пропускания (1) с учетом нормального распределения концентрации частиц струи (2) и закона Бугера преобразуется к виду:

$$I(x) = I_0 T = I_0 \exp \left\{ -C(x) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\Delta y} \exp \left\{ -\frac{y^2}{2\sigma^2} \right\} dy \right\}, \quad (11)$$

где $\Delta y = \sqrt{r^2 - \Delta x^2}$, за величину $C(x) = \frac{n_{s \max}}{\sigma^2 2\sqrt{\pi}} \exp \left\{ -\frac{x^2}{2\sigma^2} \right\}$ – обозначим постоянную величину для фиксированного значения x . Свет пройдет слой частиц дисперсной среды протяженностью $\Delta H = 2\Delta y$ на расстоянии Δx от центра струи, и перед знаком интеграла в (11) появится 2. Вынесем множитель $\exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \right\}$ из-под интеграла в (11)

$\int_0^{\Delta y} \exp \left\{ -\frac{\Delta y^2}{2\sigma^2} \right\} dy$ и внесем его во вновь введенную константу

$D(x) = C(x) \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \right\}$, получим выражение

$$I(x) = I_0 \exp \left\{ -D(x) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\Delta y} \exp \left\{ -t^2 \right\} dt \right\}, \quad (12)$$

используя функцию ошибок $\text{Erf } \Delta y = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\Delta y} \exp \left\{ -t^2 \right\} dt$.

Из (11) и (12) получаем выражение для расчета концентрации $n_{s \max}(x)$

$$\ln \frac{I_0}{I(x)} = D(x) \text{Erf}(\Delta y). \quad (13)$$

Исходя из симметричности струи, по ее изображению определяется значение Δy , используя табличные значения или встроенную в язык программирования функцию ошибок $\text{Erf } \Delta y$, находится константа $D(x)$ и концентрация $n_{s \max}(x)$. Левая часть выражения (13) определяется из изображения поперечного сечения топливной струи. Далее возможно найти массовую концентрацию n_m и используя (7) среднеобъемный диаметр Заутера δ_{32} .

Предложенный подход позволяет обработкой изображений топливных струй, получаемых на разработанном стенде [6; 7; 8; 9; 10], с учетом программного обеспечения [11] определять концентрацию капель топлива по значению яркости в различных зонах струи. Использование скоростной видеосъемки дает возможность отследить динамику изменения яркостных зон и концентрации топлива в струе по времени.

В Алтайском государственном техническом университете им. И. И. Ползунова разработан стенд контроля параметров топливной струи с использованием скоростной видеосъемки процесса распыливания топлива. Топливная система имеет электронное управление впрыском Common-rail [9; 12–15].

В качестве примера на рисунке 2 изображена топливная струя на 1341 мкс (9 кадр).

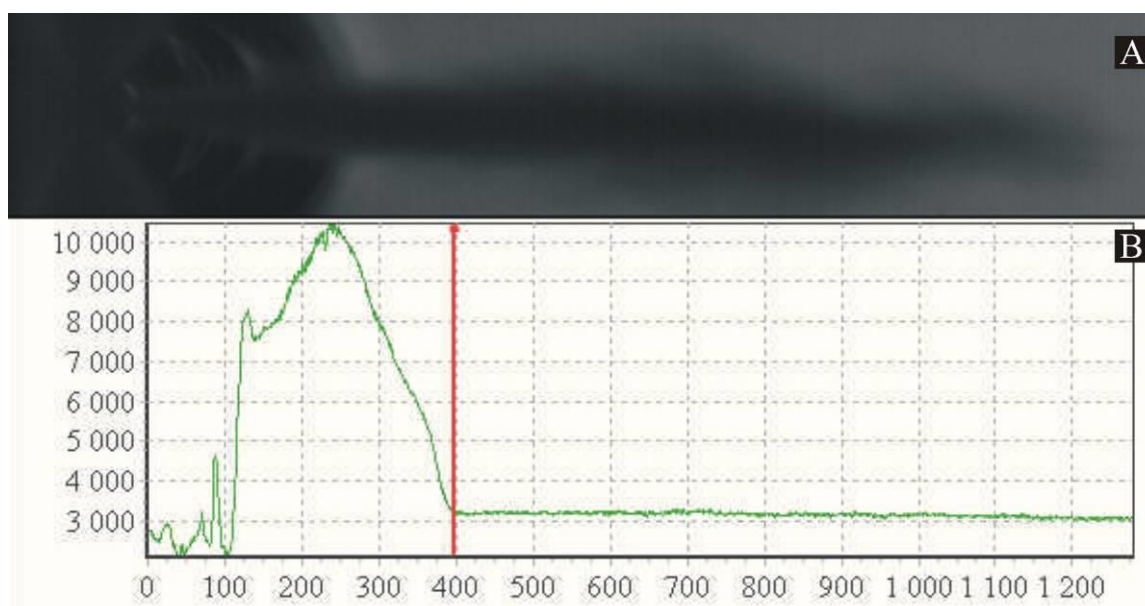


Рисунок 2 – Граница струи, рассчитанная программой для кадра № 9

На рисунке 3 по изображению 2А построена яркостная гистограмма, где виден максимум в районе малых значений яркости.



Рисунок 3 – Яркостная гистограмма изображения струи для кадра № 9

На рисунке 4 приведены экспериментальные данные изменения площади струи дизельного топлива для различных давлений впрыска по времени.

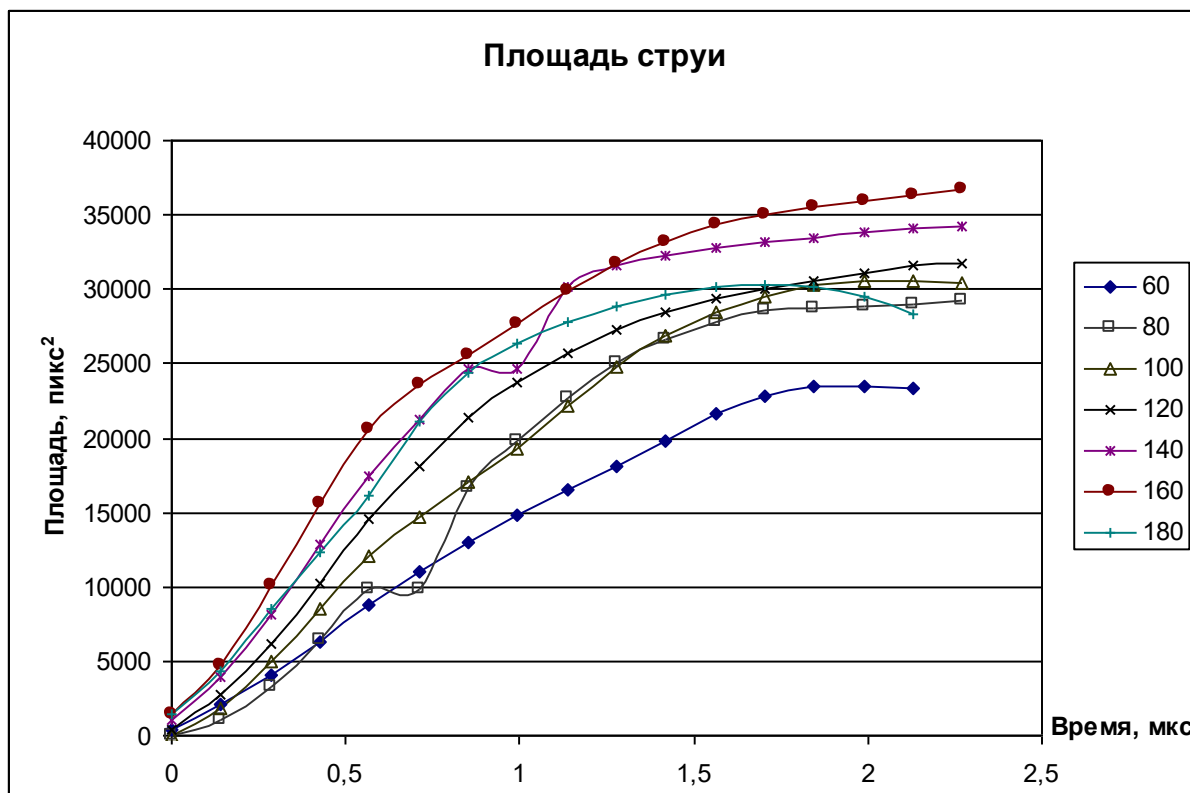


Рисунок 4 – Изменение площади струи дизельного топлива
для различных давлений впрыска по времени

Длина струи, угол раскрыва и диаметр Заутера зависят от давления под носиком распылителя (давления впрыска). Площадь струи на изображении меняется в зависимости от давления впрыска: больше давление – больше площадь и наоборот: меньше давление – меньше площадь.

Описанный в работе оптический метод контроля распыливания топлива с использованием скоростной видеосъемки реализован в виде стенда скоростной видеосъемки контроля параметров струи распыленного топлива. Стенд позволяет записывать видеоизображение струи по синхроимпульсу от клапана форсунки. Далее видеоряд обрабатывается программой на компьютере, результатом чего являются динамические параметры струи распыленного топлива: скорость струи, угол распыления, длина струи, площадь струи. Площадь струи в свою очередь состоит из площадей различных по оптической плотности ярких зон, в которых диаметр капель Заутера с учетом некоторого приближения считается одинаковым. Динамическое изменение площадей ярких зон выражает характер распыления топлива, динамику топливной струи, зависящую от многих факторов (давления впрыска, вида топлива и так далее). Разработанный метод и стенд используются для проведения научных исследований в АлтГТУ для различных режимов работы двигателя и различных видов топлива. На производстве топливных распылителей возможно применение описанного подхода для контроля качества изготовления распыляющих дюз и распылителей по изображениям топливных струй.

Литература

1. Семидетнов, Н. В. Анализ характеристик топливного факела как объекта исследования лазерным доплеровским методом / Н. В. Семидетнов. – Текст : непосредственный // Двигателестроение. – 1983. – № 12. – С. 5–9.

2. Кукушкин, В. Л. Методы оценки характеристик нестационарной струи распыленного дизельного топлива с помощью лазеров непрерывного излучения / В. Л. Кукушкин. – Текст : непосредственный // Двигателестроение. – 1988. – № 12. – С. 28–32.
3. Лышевский, А. С. Закономерности дробления жидкостей механическими форсунками давления / А. С. Лышевский. – Новочеркасск : Издательство НПИ, 1961. – 186 с. – Текст : непосредственный.
4. Архипов, В. А. Лазерные методы диагностики потоков : учебное пособие / В. А. Архипов. – Томск : Издательство Томского университета, 1987. – 140 с. – Текст : непосредственный.
5. Гидродинамика и теория горения потока топлива / Б. В. Канторович, В. И. Миткалинный, Г. Н. Делягин, В. М. Иванов. – Москва : Металлургия, 1971. – 488 с. – Текст : непосредственный.
6. Еськов, А. В. Средство оптического контроля качества распыливания топлива с использованием скоростной видеосъемки / А. В. Еськов, А. В. Маецкий. – Текст : непосредственный // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 3. – С. 71–75.
7. Еськов, А. В. Оптический метод исследования процесса распыливания рапсового и дизельного топлива / А. В. Еськов, А. В. Маецкий, А. М. Сагалаков. – Текст : непосредственный // Датчики и системы. – 2013. – № 5. – С. 21–24.
8. Еськов, А. В. Многофункциональное устройство управления регистрацией изображений быстропротекающих процессов / А. В. Еськов, А. Б. Добряк. – Текст : непосредственный // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – № 3. – С. 160–163.
9. Еськов, А. В. Экспериментальный стенд и пакет программ для оптического контроля качества распыливания топлива с использованием скоростной видеосъемки / А. В. Еськов, А. В. Маецкий. – Текст : непосредственный // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/1. – С. 75–78.
10. Еськов, А. В. Динамика яркостных зон топливной струи из видеозаписи / А. В. Еськов, С. П. Кулманаков, И. И. Кирюшин. – Текст : непосредственный // Известия Алтайского государственного университета. – 2015. – Т. 2, № 1. – С. 26–29.
11. Еськов, А. В. Программа для обработки изображений топливных струй и расчета площадей оптических неоднородностей : свидетельство № 2012616678 Российская Федерация : зарегистр. 25.07.2012 / А. В. Еськов, А. В. Маецкий, С. И. Гибельгауз ; заявитель и правообладатель Алтайский государственный университет им. И.И. Ползунова. – Текст : непосредственный.
12. Экспериментальное исследование характеристик топливных струй дизельных форсунок / А. Е. Свистула, Д. Д. Матиевский, П. Ю. Гуляев, А. В. Еськов. – Текст : непосредственный // Двигателестроение. – 1999. – № 1. – С. 29–31.
13. Способ определения скорости импульсного аэродисперсного потока : Патент на изобретение RU 2147749 C1 : № 98105869/28 : Заявл. 23.03.1998 : Оpubл. 20.04.2000 / В. В. Евстигнеев, П. Ю. Гуляев, А. В. Еськов. – 8 с. – Текст : непосредственный.
14. Бороненко, М. П. Телевизионная измерительная система наносекундного разрешения / М. П. Бороненко, П. Ю. Гуляев. – Текст : непосредственный // Доклады ТУСУР. – 2014. № 1 (31). – С. 60–64.
15. Increasing the noise immunity of optical-electronic systems based on video cameras with an optical converter / М. Р. Boronenko, Р. Yu. Gulyaev, А. Е. Seregin, К. G. Poluhina. – DOI: 10.1088/1742-6596/643/1/012028 // Journal of Physics : Conference Series. – 2015. – Vol. 643. – P. 012028.

С. В. Умбетов, С. П. Пронин

**КЛАССИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ
КОРРОЗИЙНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ПОДЗЕМНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТРУБОПРОВОДА**

В данной работе представлена классификация коррозионных повреждений внутренней поверхности трубопровода, сравнительная характеристика влияния коррозионных повреждений на внутреннюю поверхность металлических труб. Наибольшее распространение на внутренних поверхностях металлического трубопровода получили язвенная, точечная, межкристаллитная, растрескивающая, питтинговая, щелевая и сквозная коррозии. Приведены методы и средства контроля коррозионных повреждений, выполнен анализ их возможностей. Показано, что развитие диагностики внутренней поверхности трубопроводов идет по пути создания робототехнических средств. Существующие робототехнические устройства на сегодняшний день имеют недостатки. Во-первых, при некоторых повреждениях необходимо присутствие оператора в месте прохождения трубопровода, что не исключает субъективной диагностики. Во-вторых, как правило, методы требуют аварийных раскопок. В-третьих, являются узконаправленными, не позволяют диагностировать все виды коррозионных повреждений в целом. В заключении предложен модульный робототехнический комплекс, который объединяет в себе ряд функций, исключающих эти недостатки.

Ключевые слова: коррозия, повреждение, металл, трубопровод, магистраль, методы контроля, средства контроля.

S. V. Umbetov, S. P. Pronin

**CLASSIFICATION AND ANALYSIS OF INSTRUMENTS
FOR MEASURING CORROSION DAMAGE TO INTERNAL SURFACES
OF UNDERGROUND METAL PIPELINE**

This paper presents a classification of corrosion damage to the inner surface of the pipeline, a comparative description of the effect of corrosion damage on the inner surface of metal pipes. The most common on the inner surfaces of a metal pipeline are ulcerative, pitting, intergranular, cracking, pitting, crevice and through corrosion. Methods and tools for controlling corrosion damage are presented, and their capabilities are analyzed. It is shown that the development of diagnostics of the inner surface of pipelines is on the path to creating robotic tools. Existing robotic devices today have disadvantages. Firstly, for some injuries, the presence of an operator at the place of passage of the pipeline is necessary, which does not exclude subjective diagnostics. Secondly, as a rule, methods require emergency excavations. Thirdly, they are narrowly targeted, they do not allow to diagnose all types of corrosion damage in general. In conclusion, a modular robotic complex is proposed, which combines a number of functions that exclude these shortcomings.

Key words: corrosion, damage, metal, pipeline, highway, control methods, means of control.

Введение

Для определения степени опасности, оценки возможности и сроков безопасной эксплуатации трубопроводных магистралей с заданными параметрами уровня надежности примени-

тельно к большинству магистральных трубопроводов, подверженных коррозии, актуальна задача классификации коррозионных повреждений внутренних поверхностей.

Исходя из уровня изначальной защиты металлического трубопровода от воздействия различных факторов окружающей среды и агрессивности этого воздействия, можно определить коррозионное состояние металлического трубопровода. Любое воздействие окружающей среды на поверхность трубопровода изменяется не только от природно-климатических условий, но и от иных дополнительных факторов опасности, таких как разрастание различных видов коррозии, давление грунта и строений на трубопровод, химический состав вод и стоков, блуждающие токи [1; 2].

При изменении степени воздействия различается и скорость роста коррозионных повреждений. Это воздействие может колебаться от 0,25 до 1,5 мм/год в зависимости от региона России. Такую скорость разрушения трубопровода значительной не назовешь, поэтому основную опасность представляет собой внутренняя коррозия, скорость разрушения которой может превышать внешнюю коррозию в несколько раз и достигать до 10 мм/год [3; 4].

Цель работы: классифицировать наиболее частые и возможные коррозионные повреждения, выполнить аналитический обзор известных методов обнаружения коррозии на внутренней поверхности трубопровода и обозначить функции перспективного средства контроля поверхности трубопровода.

Своевременное обнаружение повреждений, их анализ и оперативное их устранение позволят решить проблему прогнозирования износа труб, их своевременную замену или ремонт.

Постановка задачи: виды коррозии

Трубопроводы всегда были и будут объектом коррозии. Коррозионный процесс зависит от многих факторов, но всегда происходит в коррозионной системе, которая состоит из объекта коррозии – металла и коррозионной среды – вещества. В итоге происходит потеря механической прочности металла – коррозионное разрушение. Коррозионные повреждения внутренней поверхности трубопроводов всегда присутствуют в системах горячего и холодного водоснабжения, в канализационных системах. Поэтому для того, чтобы понимать, каким образом можно более точно и с минимальными затратами диагностировать коррозионные повреждения, рассмотрим более подробно коррозионные изменения, образуемые на внутренней поверхности водопроводных и канализационных труб, а также методы их обнаружения.

Существует несколько видов определения коррозии, однако общепринятым считается определение коррозии как разрушение металла в результате электрохимического или химического взаимодействия с коррозионной средой. В нашем случае речь идет не просто о коррозии металлов, а о коррозии трубопроводных магистралей. Металл в таких магистралах, представляет собой линейно-трубную сталь, которая в большей своей части состоит из железа со сплавом до 2 % [5].

Классифицировать коррозию принято по механизму, условиям протекания процесса и характеру разрушения.



Рисунок 1 – Электрохимическая коррозия: $4\text{Fe}_2^{++} + 6\text{H}_2\text{O} + 4\text{e} = 4\text{Fe}(\text{OH})_3$

Внутреннюю коррозию по механизму протекания можно классифицировать на электрохимическую (рис. 1) и химическую (рис. 2).



Рисунок 2 – Химическая коррозия: $4\text{Fe} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3$

Основным фактором, ухудшающим состояние внутренней поверхности труб, является реакция ионов железа с водой и кислородом и, как следствие, образование коррозионного выпадения – ржавчины или иного оксида железа (электрохимическая коррозия) [6]. Выглядит это так. При взаимодействии металла с водой и кислородом ионы металла переходят в раствор. В результате происходит реакция окисления – анодная реакция. На катоде же происходит реакция восстановления. Коррозия металла происходит именно на аноде. Но в некоторых случаях ионы железа могут реагировать и с углеродом, и с сероводородом, в результате чего образуется карбонат железа или сульфида железа, который выделяется в виде осадка. При электрохимической коррозии все процессы коррозионных изменений сопровождаются образованием электрического тока. Кроме того, происходят одновременно оба процесса – восстановительный и окислительный [1].

Химическая коррозия происходит при непосредственном химическом взаимодействии металла с агрессивной средой и, в отличие от электрохимической, протекает в средах, не проводящих электрический ток [1]. Продукты коррозии образуются непосредственно при взаимодействии металла и агрессивной среды.

Коррозию по условиям протекания можно классифицировать на следующие виды:

1. Жидкостная коррозия – вид коррозии металла в жидкой среде. Этот вид коррозии подразделяется на коррозию в электролитах (процессы происходят в кислотных средах) и неэлектролитах, когда процессы происходят в жидкостях, не проводящих электрический ток.

2. Биокоррозия – вид коррозии, связанной с разрушением поверхности металла под влиянием живых микроорганизмов [7]. В случае микробиологической коррозии имеет значение восстановление сульфатов до сульфидов (анаэробные бактерии, обычно обитающие в сточных водах) [8]. В результате их деятельности образуется сероводород H_2S , который хорошо растворяется, например, в нефти, и, взаимодействуя с железом, образует сульфид железа, выпадающий в осадок: $\text{Fe} + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{FeS} + \text{H}_2$ [9]. Под воздействием сероводорода поверхность легко смачивается водой, и на ней образуется тонкий слой электролита, в котором и происходит накопление сульфида железа. А сульфид железа, участвуя в образовании гальванической микропары $\text{Fe}-\text{FeS}$, является катодом, следовательно, железо будет разрушаться как анод. Ряд ионов, в том числе и ионы хлора, активируют металлы. Ионы хлора имеют высокую абсорбируемость на металле. Они способствуют растворению пассивирующих пленок и облегчают переход ионов металла в раствор. Биокоррозию классифицируют на микробиологическую и бактериальную, а микроорганизмы – на аэробные, которые существуют и размножаются только при наличии кислорода, и анаэробные, для жизнедеятельности которых кислород не требуется. Биокоррозия является одной из наиболее разрушительных коррозий исходя из того, что бактерии очень быстро размножаются и приспосабливаются к любым изменениям окружающей среды. Однако чаще всего микроорганизмы стимулируют коррозионный процесс, но могут и разрушать.

3. Структурная коррозия – вид коррозии, связанной с неоднородностью структуры металлов [1].

4. Коррозия блуждающими токами – вид электрохимического разрушения, которое происходит под воздействием блуждающих токов. Например, в результате работы трамвайных линий, электрических железных дорог происходит частичная утечка тока, который блуждает по грунту и находящимся в нем металлическим сооружениям.

5. Коррозия под напряжением – это разрушение металла при одновременном воздействии механических напряжений и агрессивной среды. Механическое напряжение проявляется посредством давления грунта, наземных построек на места прохождения теплотрасс, канализаций и водопроводов. Поэтому исходя из характера нагрузок можно выделить коррозию при постоянных (постоянное давление) и переменных (непостоянное) нагрузках.

Коррозийные повреждения по типу имеют следующую классификацию:

1. Сплошная коррозия, которая подразделяется на равномерную и неравномерную.

Равномерная, или общая, коррозия – это коррозия, равномерно распределенная по поверхности металла. Такая коррозия приводит к одинаковому утончению толщины труб.

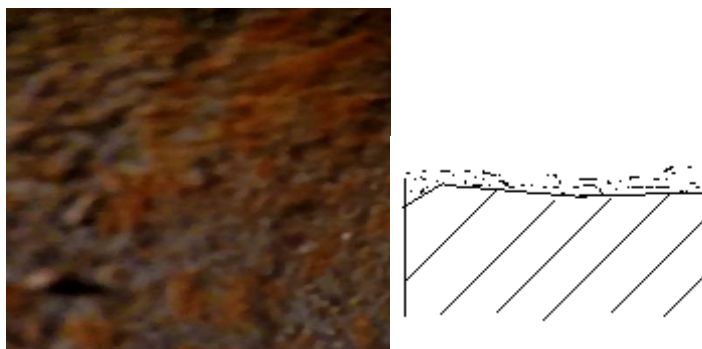


Рисунок 3 – Равномерная коррозия поверхности металла

Неравномерная коррозия (рис. 4) – коррозия, охватывающая только определенную часть поверхности трубы.

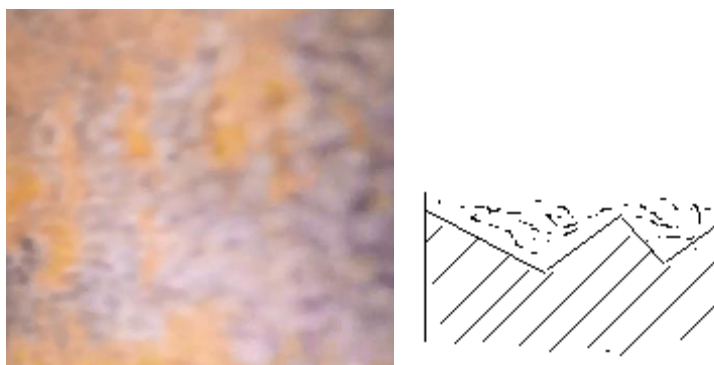


Рисунок 4 – Неравномерная коррозия поверхности металла

2. Местная, или локальная, коррозия – это коррозия, сосредоточенная на отдельных участках поверхности. Такую коррозию можно разделить на несколько видов:

- в виде пятен (рис. 5). Поражение распространяется сравнительно неглубоко и занимает относительно большие участки поверхности;



Рисунок 5 – Коррозия поверхности металла в виде пятен

- в виде язв (рис. 6). Коррозия протекает на небольших участках поверхности в форме локальных поражений. Опасность ее заключается в разрушении металла при незначительной потере общего веса. Поражение занимает небольшие участки поверхности, и обнаружить его сложнее, чем сплошную коррозию, что в дальнейшем может привести к образованию свища.

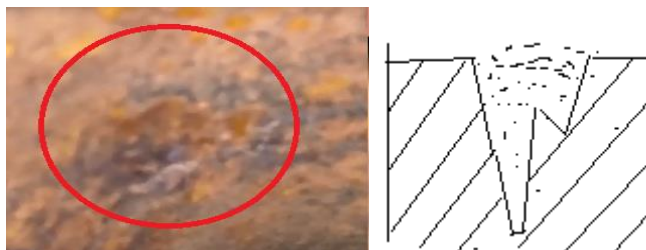


Рисунок 6 – Коррозия поверхности металла в виде язв

Иногда можно наблюдать язвы, похожие на ручейки или канавки. Они образуются в участках скопления электролита. Хотя это и язвенное поражение, но иногда его называют ручейковым или канавочным;

- в виде точек (питтинговая, рис. 7). Размеры точек еще меньше язвенных разъеданий.

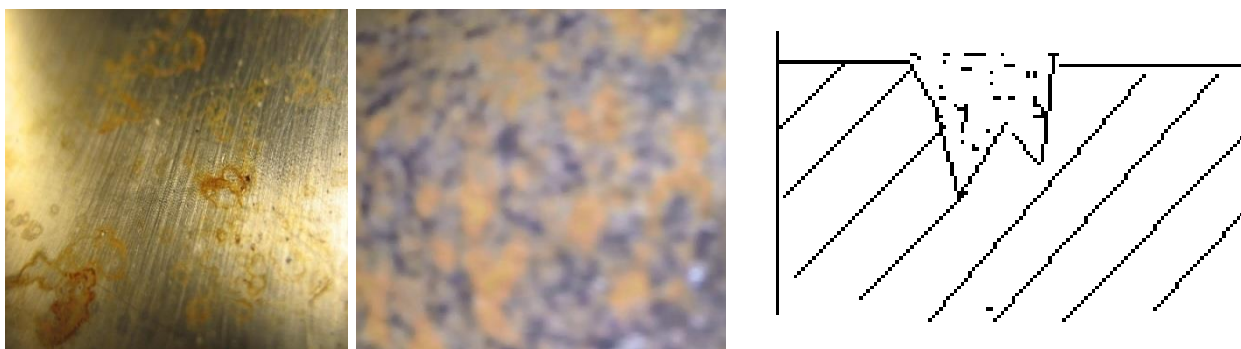


Рисунок 7 – Коррозия поверхности металла питтинговая

В свою очередь, питтинговую коррозию можно подразделить по размеру на:

- питтинговую коррозию до 0,1 мм – микропиттинг;
- питтинговую коррозию от 0,1 до 1 мм;
- питтинговую коррозию свыше 1 мм.

Питтинги бывают открытыми, закрытыми и поверхностными. Закрытые питтинги нельзя увидеть невооруженным глазом, определить его можно только специальным оборудованием. Развивается такой питтинг вглубь металла. Открытый питтинг, наоборот, очень хорошо виден под небольшим увеличением или даже невооруженным глазом. Когда таких повреждений много, коррозия уже носит сплошной характер.

Поверхностный питтинг развивается не вглубь металла, а вширь и в дальнейшем образует выбоины в виде:

- сквозной коррозии (рис. 8). Сквозная коррозия – это коррозионное повреждение, происходящее вглубь металла. В результате образует сквозное отверстие [10];

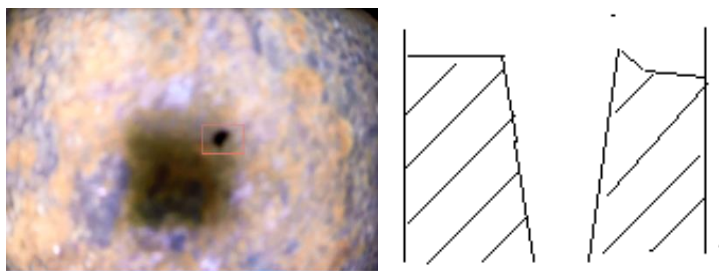


Рисунок 8 – Коррозия поверхности металла сквозная

- межкристаллитной коррозии (рис. 9). Межкристаллитная коррозия характеризуется разрушением металла по границам кристаллитов (зерен металла). Процесс разрушения протекает глубоко и быстро. В результате металл теряет свою прочность;



Рисунок 9 – Коррозия поверхности металла межкристаллитная

- избирательной коррозии. Образуется под воздействием агрессивной среды, избирательно растворяется один или несколько компонентов сплава, используемого при изготовлении трубы, после чего остается пористый остаток, который сохраняет первоначальную форму и на первый взгляд кажется неповрежденным;
- коррозионного растрескивания (рис. 10). Коррозионное растрескивание происходит тогда, когда металл подвергается постоянному растягивающему напряжению в коррозионной среде. Коррозионное растрескивание может быть вызвано абсорбцией водорода, образовавшегося в процессе коррозии;



Рисунок 10 – Коррозионное растрескивание

- щелевой коррозии (рис. 11). Данный вид коррозии характеризуется усиленным разрушением в местах неплотного соединения однородных металлов под прокладками, в небольших зазорах, клепанных и резьбовых соединениях [11].



Рисунок 11 – Щелевая коррозия металлической поверхности

Обсуждение результатов: новые приборы и методы контроля

Все рассмотренные выше коррозионные повреждения, независимо от условий их протекания и видов, наносят огромный вред внутренним поверхностям трубопроводов, поэтому для того, чтобы обеспечить надежность и функционирование, требуется максимально точная диагностика состояния внутренних поверхностей трубопроводов и, соответственно, максимально точный прогноз работоспособности всей системы. Особенно актуальна диагностика трубопроводов, которые находятся в эксплуатации длительный отрезок времени. Своевременная и точная диагностика позволит обеспечить увеличение срока службы трубопроводов, его безаварийную эксплуатацию, снизить количество повреждений, уменьшить затраты на ремонтные работы.

Безусловно, в целях определения технического состояния трубопроводов магистрали регулярно подвергаются техническому освидетельствованию [9; 12–14]. Проводится наружный осмотр трубопровода, если он пролегает над землей, и мест пролегания трубопровода под землей. Задача осмотра, если трубопровод пролегает под землей, – установить наличие обвала грунта, нетипичных подтоплений, воды в колодцах, парение и иные видимые изменения. Если трубопровод проходит над землей, а также в коллекторах, на насосных станциях, – выявить искажения в виде вспучиваний, коррозионных пятен, повреждений покрытий, трещин [14]. Затем проводятся расчеты с оценкой возможного срока эксплуатации трубопроводов, определения толщины стенок труб, электрометрических измерений. Задачей технического освидетельствования является оценка состояния трубопроводных магистралей, разработка рекомендаций по их ремонту и дальнейшей эксплуатации [15; 16].

Для более детальной диагностики трубопроводов используются следующие методы и средства.

Гидравлический метод, который заключается в том, что при прекращении подачи воды в сеть осуществляется ее визуальный осмотр. Если уровень воды в гидранте падает, имеют место утечки. Серьезным недостатком этих методов является частичное отключение участков сети [17].

Акустические методы позволяют установить не только факт утечки, но и место утечки. Акустический метод подразделяется на слуховой и корреляционный. Слуховой метод позволяет на поверхности земли определить место наибольшего количества колебаний, связанных с утечкой. Колебание грунта преобразуется в электрический ток, который фильтруется, усиливается и преобразуется в звуковые колебания, которые и слышит оператор через наушники. Недостатком этого метода является то, что необходимо точно знать место расположения трубопровода. Оператор должен быть очень внимательным и разделить полезный шум от посторонних, а сам прибор должен обладать максимальной чувствительностью к любым колебаниям почвы [15]. На рис. 12 приведен состав системы мониторинга. Этот метод лежит в основе комплекса СОК А-10, который используется для быстрого поиска скрытых утечек. Этот комплекс представляет собой пьезомикрофон, который расположен на конце локационного кабеля, выполненного из оптоволокну и трубы-шлюза с резьбой. Принцип работы комплекса состоит в том, что локационный кабель проталкивают в трубу, которая находится под давлением, до тех пор, пока микрофон не дойдет до места утечки. Усиливается сигнал за счет течеискателя. Полученные данные передаются на поверхность земли оператору. Основным недостатком данного комплекта является то, что в диаметре трубы больше 300–400 мм кабель начинает закручиваться, что значительно осложняет проталкивание микрофона к месту утечки [15].

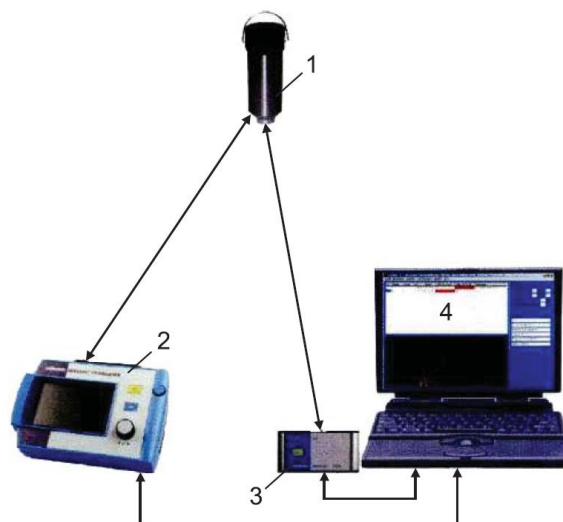


Рисунок 12 – Состав системы мониторинга: 1 – регистратор; 2 – блок управления; 3 – принимающее устройство; 4 – компьютер

При корреляционном методе на трубопровод устанавливают не менее двух датчиков, реагирующих на изменения вибрации. Повторяющиеся движения стенок трубы преобразуются в электрический ток. Затем производится фильтрация и усиление сигнала. Данный метод позволяет не только определить факт протечки, но и вычислить расстояние от датчика до места утечки. Однако данный метод требует проведения аварийных раскопок для установки датчиков и не может зафиксировать утечку на большой протяженности трубопровода из-за меньшего порога чувствительности, чем у акустических приборов. Кроме того, для применения этого метода нужно точно знать диаметр трубы, толщину стенок, материал, из которого изготовлены трубы. Да и отличить шум утечки от остальных шумов бывает очень сложно [17].

Акустико-эмиссионный метод осуществляет дистанционную диагностику при помощи пьезодатчиков, которые работают в режиме реального времени. Положительное свойство метода заключается в том, что он обеспечивает постоянный контроль состояния трубопроводов. Однако для того, чтобы применять подобный метод, необходим открытый доступ к трубопроводу, так как прослушивание возможно только при помощи микрофона, который должен быть приставлен к внешней стороне трубы. Для определения более точного места повреждения трубы необходимы минимум два датчика, которые должны быть расположены по обе стороны от источника звука. Таким образом, для реализации этого метода необходим доступ к трубе в нескольких местах, а это не всегда возможно и целесообразно. Ну и диагностирование иных коррозионных повреждений, помимо свищей и протечек, этот метод не позволяет.

Еще один вид диагностики – телеуправляемый диагностический комплекс, в основе которого лежит электромагнитно-акустический метод. Данный метод по сравнению с акустико-эмиссионным методом более предпочтителен, потому что позволяет обнаруживать дефекты без непосредственного контакта с рабочей поверхностью трубы и обследовать трубопровод глубиной залегания более двух метров. Несомненно, метод очень хорош, однако требует постоянного контроля со стороны оператора, который должен не только идти вдоль трубопроводной магистрали, но и быть в постоянном напряжении, что не исключает ошибок чисто человеческого фактора [18; 19].

Не менее интересен и сканер-дефектоскоп, который относится к оптико-электронным методам диагностики [20]. Этот метод применяют и для диагностики поверхности трубы, и при выполнении ремонтных работ на трубе. Сканер-дефектоскоп позволяет определить утечку не только через свищи, но и через микротрещины и выполняет диагностику состояния трубы со скоростью 100 п. м в час. При диагностике используется естественная намагниченность метал-

ла, сформировавшаяся в процессе эксплуатации. Однако этот метод не позволяет определять коррозионные повреждения на более ранних стадиях (питтинги, язвы, пятна и т. д.).

Известна технология на основе длинноволнового метода LRUT (LongRangeUltrasonicTechnology) с применением ультразвуковых волн [21]. Данный метод значительно выигрывает по сравнению с рассмотренными выше. Он позволяет не только отследить, но и оценить любые коррозионные повреждения без снятия изоляции. Однако отрицательной стороной этого метода является невозможность работы прибора без установки кольца с ультразвуковым преобразователем на поверхность трубы без изоляции, т. е. необходимы точная информация о месте залегания поврежденной трубы и аварийные раскопки. Система PS-2000, основанная на этом методе, приведена на рис. 13.



Рисунок 13 – Система PS-2000

Существует способ механических напряжений и реализующее его устройство с использованием тензодатчиков [22]. Принцип его работы состоит в измерении напряженно-деформированных изменений трубы.

Каждый из рассмотренных методов диагностики трубопровода имеет определенные преимущества, однако применение их не всегда целесообразно и возможно. Во-первых, при некоторых повреждениях необходимо присутствие оператора в месте прохождения трубопровода, что не исключает субъективной диагностики. Во-вторых, как правило, методы требуют аварийных раскопок. В-третьих, являются узконаправленными, не позволяют диагностировать все виды коррозионных повреждений в целом. Поэтому на сегодняшний день имеется потребность в создании метода и устройства, которые позволят прогнозировать текущее состояние и остаточный ресурс трубопровода, увеличить скорость обнаружения и анализа повреждений, минимизировать участие человека, проводить диагностику внутренней поверхности трубопровода по всей его длине без извлечения из грунта.

Заключение и выводы

В статье выполнена классификация коррозионных повреждений металлических поверхностей. Наибольшее распространение на внутренних поверхностях металлического трубопровода получили язвенная, точечная, межкристаллитная, растрескивающая, питтинговая, щелевая и сквозная коррозии.

Наличие и скорость коррозионных повреждений металла зависит от многих факторов: свойств металла, свойств транспортируемой жидкости, внешних воздействий. Учитывая, что трубопроводы выполняют транспортировку различных видов жидкостей, то и коррозионные повреждения внутренней поверхности трубопровода имеют различное происхождение и причины. В том числе наличие коррозии может быть связано с образованием сероводорода, который хорошо растворяется, например, в нефти, и, взаимодействуя с железом, образует

сульфид железа. Или, например, реакция ионов железа с водой и кислородом и, как следствие, образование коррозионного выпадения – ржавчины.

Используемые на практике гидравлические, акустические, корреляционные, акустико-эмиссионные методы обнаруживают все повреждения. Однако тот же акустико-эмиссионный метод, например, осуществляющий дистанционную диагностику при помощи пьезодатчиков и позволяющий определять наличие свищей или протечек, предполагает наличие открытого доступа к трубопроводу и не может зафиксировать иные коррозионные повреждения. Корреляционный метод, основанный на изменениях вибраций и позволяющий определять протечки и вычислять расстояние от датчика до места утечки, требует проведения аварийных раскопок для установки датчиков. Кроме того, все эти методы требуют непосредственного участия человека, необходимого для правильной оценки значимости полученных данных.

Существуют робототехнические комплексы, например, СОК А-10, используемые для быстрого поиска скрытых утечек, однако такой комплекс требует непосредственного участия человека, в связи с чем полученные данные могут быть не всегда корректны. Кроме того, этот комплекс не является автономным и зависит непосредственно от оператора, который вручную проталкивает кабель с датчиками по трубопроводу. Или, например, сканер-дефектоскоп, позволяющий определять утечки не только через свищи, но и через микротрещины. Однако он не способен определять коррозионные повреждения на более ранних стадиях образования свищей.

Устранить эти недостатки возможно лишь при создании модульного робототехнического комплекса, который обладает рядом следующих функций:

1. Обеспечивает контроль коррозионных повреждений без предварительного извлечения трубопровода из грунта и обладает способностью характеризовать состояние магистрали на всей ее протяженности.

2. Обладает возможностью сбора информации о состоянии трубы на участках различной сложности и реализует контроль внутренней поверхности трубопроводов в труднодоступных местах. Таким устройством может служить многозвенный робот, изображение которого приведено на рис. 14.

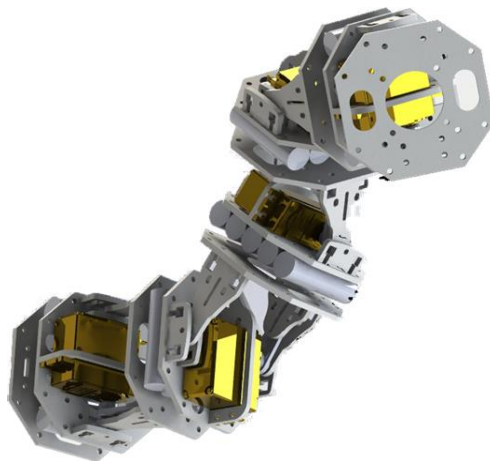


Рисунок 14 – Фрагмент многозвенного робота для доставки оптико-электронной системы во внутреннюю полость трубы и анализа корродированной поверхности

3. Осуществляет автоматический анализ состояния трубопровода с минимальным участием человека за счет применения алгоритмов распознавания оптических изображений дефектов с использованием обучаемой нейронной сети и гистограммного метода анализа коррозии по изображениям.

4. Выполняет контроль поражения внутренней поверхности трубы различными видами и степенью коррозий на различных стадиях, определяет масштабы поражения с выделением координат дефекта и прогнозирует скорость эрозийно-коррозионных изменений.



Рисунок 15 – Оптико-электронная головка для многозвенового робота

Для реализации этого пункта на переднее звено многозвенового робота крепится оптико-электронная головка, показанная на рис. 15. Алгоритм распознавания коррозионного повреждения строится на анализе соотношений R,G,B- компонент в цветном изображении фиксируемого участка трубы.

Литература

1. Коррозия металлов. Классификатор государственных стандартов : ГОСТ 5272-68 : Дата введения 01-01-69. – Текст : электронный // StandartGOST.ru. – URL: https://standartgost.ru/g/ГОСТ_5272-68 (Дата обращения: 07.07.2020).
2. Структура и коррозия металлов и сплавов : атлас / И. Я. Сокол [и др.]. – Москва : Металлургия, 1989. – 400 с. – Текст : непосредственный.
3. Тарасов, Ю. Л. Оценка сроков службы трубопроводов с учетом коррозионных повреждений / Ю. Л. Тарасов, О. В. Хвесьюк. – Текст : непосредственный // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12, № 1/2. – С. 536–541.
4. Бриков, А. В. Использование реагентов нефтепромысловой химии в условиях морских нефтегазодобывающих объектов / А. В. Бриков, А. Н. Маркин. – Текст : непосредственный // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2016. – № 7/8. – С. 52–56.
5. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Классификатор государственных стандартов : ГОСТ 18353-79 : Дата введения 01-07-80. – Текст : электронный // StandartGOST.ru. – URL: https://standartgost.ru/g/ГОСТ_18353-79 (Дата обращения: 12.05.2020).
6. Электрохимический метод снижения коррозионного износа внутренней поверхности промысловых трубопроводов / А. И. Подъяпольский, Ю. Г. Паламарчук, А. Р. Эпштейн, Д. С. Худяков. – Текст : непосредственный // Безопасность жизнедеятельности. – 2007. – № 6. – С. 13–18.
7. Борьба с коррозией трубопроводов при бактериальном заражении скважин нефтяных месторождений Западной Сибири / Н. В. Кутлунина, Э. П. Мингалев, Г. Д. Маланичев [и др.]. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 1986. – № 9. – С. 20–22.
8. Балабан-Ирменин, Ю. В. Защита от внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей : практическое пособие / Ю. В. Балабан-Ирменин, В. М. Липовских, А. М. Рубашов. – Москва : Новости теплоснабжения, 2008. – 288 с. – Текст : непосредственный.
9. Control of dispersed-phase temperature in plasma flows by the spectral-brightness pyrometry method / A. V. Dolmatov, I. P. Gulyaev, P. Yu. Gulyaev, V. I. Jordan // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 110, № 1. – P. 012058.
10. Медведева, М. Л. Коррозия и защита магистральных трубопроводов и резервуаров: Учебное пособие для вузов нефтегазового профиля / М. Л. Медведева, А. В. Мурадов, А. К. Прыгаев. – Москва : Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2013. – 250 с. – Текст : непосредственный.

11. Исследование возможностей длительной эксплуатации труб с незначительными стресс-коррозионными повреждениями / А. Б.Арабей, О. Н. Милехин, И. В. Ряховских [и др.]. – Текст : непосредственный // Вести газовой науки : научно-технический сборник. – 2016. – № 3/2. – С. 5–12.
12. Гумеров, А. Г. Капитальный ремонт и реконструкция магистральных нефтепроводов / А. Г. Гумеров, Р. С. Гумеров, Х. А. Азметов. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 2004. – № 11. – С. 7–12.
13. Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды : утверждены постановлением Федерального горного и промышленного надзора России от 11.06.2003, № 90 : регистрационный № 4719. – Текст : непосредственный // Российская газета. – 2003. – № 120/1.
14. Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса трубопроводов водопроводной и канализационной сетей г. Москвы / А. Б. Косыгин, И. В. Фомина, В. М. Горицкий, Д. П. Хромов. – Текст : непосредственный // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 3. – С. 31–36.
15. Обнаружение скрытых утечек с использованием системы мониторинга водопроводной сети / А. Б. Косыгин, В. Н. Ханин, К. И. Государев, И. В. Фомина. – Текст : непосредственный // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 4. – С. 22–26.
16. Черепанов, А. П. Оценка эффективности диагностирования сосудов, резервуаров и трубопроводов / А. П. Черепанов, Ю. В. Порошин. – Текст : непосредственный // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – №10. – С. 43–46.
17. Инструментальный контроль за строительством водопроводных и канализационных сетей Москвы / А. Б. Косыгин, В. Н. Ханин, И. В. Фомина [и др.]. – Текст : непосредственный // Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. – № 10. – С. 42–48.
18. Современные методы контроля и диагностирования технологических трубопроводов / Т. А.Миронова, С. В.Хмелев, А. П. Миронов, А. И.Садилов. – Текст : непосредственный // Евразийский Научный Журнал. – 2015. – № 9. – С. 2–15.
19. Опыт проведения внутритрубной диагностики трубопроводов с выявлением дефектов КРН и коррозии / М. Е. Федосовский, М. В. Соколов, А. В. Сорокин, В. А. Аржанов. – Текст : непосредственный // В мире неразрушающего контроля. – 2009. – № 4-46. – С. 18–22.
20. Способ измерения яркостной температуры объекта : Патент 2099674 РФ, МПК G01J 5/52 : Заявл. 01.07.1996 : Оpubл. 20.12.1997 / В. В. Евстигнеев, В. М. Коротких, П. Ю. Гуляев [и др.]. – 6 с. – Текст : непосредственный.
21. Внедрение новой концепции диагностики технологических трубопроводов в ОАО «Самотлорнефтегаз» / М. Ф. Галиуллин, С. Д. Шевченко, С. Н. Вагайцев [и др.]. – Текст : непосредственный // В мире неразрушающего контроля. – 2012. – № 3-57. – С. 61–64.
22. Неразрушающий контроль в строительстве : учебное пособие / И. Эйнав [и др.] ; под общей редакцией В. В. Ключева. – Москва : Спектр, 2012. – 311 с. – ISBN 978-5-4442-0016-2. – Текст : непосредственный.
23. Thermal analysis of reaction producing K_xTiO_2 / K. Borodina [et al.]. – DOI: 10.1007/s10973-017-6840-0 // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2018. – Vol. 131, № 1. – P. 561–566.

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ТЕХНОЛОГИИ

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ
в рамках научных проектов № 18-41-220004 и № 18-08-01475.*

Х. Ж. Цуй, А. А. Григорьевская, П. Ю. Гуляев

СЦЕНАРИИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ВОЛНЕ ГОРЕНИЯ СИСТЕМЫ NI-AL С УПРОЧНЯЮЩИМИ ДОБАВКАМИ

В работе были изучены микроструктуры, образующиеся в волне горения системы Ni-Al с упрочняющими добавками частиц высокотемпературной керамики, состоящих из диборида титана и корунда. Микроструктуры и формы меняются в зависимости от содержания керамических добавок в матрице NiAl. Частицы диборида титана принимают самые разнообразные элементарные формы, такие как столбчатые, пластинчатые, игольчатые, правильные кубические структуры и кубоиды. Эти результаты обрисовывают в общих чертах стратегию процессов самосборки в реальном времени для создания диверсифицированных микроструктур. Некоторые зерна диборида титана размером 2-5 мкм встраиваются в кластеры корунда, а небольшое количество частиц диспергируется в матрице NiAl. Предполагается, что чем выше содержание упрочняющих добавок, тем с большей однородностью распределения керамический скелет будет присутствовать в матрице NiAl.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, композиты, микроструктура, механизм эволюции.

H. Z. Cui, A. A. Grigoryevskaya, P. Yu. Gulyaev

MECHANISM OF STRUCTURAL FORMATION IN THE COMBUSTION WAVE OF THE NI-AL SYSTEM WITH STRENGTHENING ADDITIVES

In the work, microstructures formed in the combustion wave of the Ni-Al system with hardening additives of high-temperature ceramic particles consisting of titanium diboride and corundum were studied. Microstructures and shapes vary depending on the content of ceramic additives in the NiAl matrix. Particles of TiB_2 take the most diverse elementary forms, such as bars, plates, herringbones, regular cubic structures and cuboids. These results outline a real-time strategy of self-assembly processes to create diversified microstructures. Some grains of titanium diboride 2-5 μm in size are embedded in corundum clusters, and a small number of TiB_2 particles are dispersed in the NiAl matrix. It is assumed that the higher the content of reinforcing additives, the more uniform the distribution of the ceramic skeleton will be present in the NiAl matrix.

Key words: composites; self-propagation high-temperature synthesis; microstructure; evolution mechanism.

Введение

Благодаря низкой плотности, высокой температуре плавления, хорошей теплопроводности и хорошей коррозионной стойкости [1] интерметаллиды NiAl широко применяются в высокотемпературных и коррозионных средах, таких как детали авиационных двигателей, газотурбинные лопатки, термобарьерные и антикоррозионные покрытия. Однако низкая пластичность при комнатной температуре и низкая прочность при высокой температуре ограничивают их применение в промышленности и производстве [2; 3]. В связи с этим в настоящее

время большое число работ посвящено улучшению пластичности при комнатной температуре и высокотемпературной прочности интерметаллических соединений Ni-Al. Добавление в NiAl различных легирующих элементов, таких как Mo [4], Ti [5], Cr [6] и редкоземельные металлы [7], является эффективным способом улучшения его свойств. При добавлении или формировании частиц керамики, таких как Al_2O_3 [8; 9], TiB_2 [10], NbB_2 [11] и TiC [12; 13], прочность и свойства пластичности композиционного материала Ni-Al могут быть также значительно улучшены.

Хорошо известно, что технология самораспространяющегося высоко- температурного синтеза (СВС) имеет значительные преимущества, такие как низкое энергопотребление, недорогое производственное оборудование, простота эксплуатации и синтез композиционных компонентов на месте, по сравнению с другими обычными способами [14]. С помощью процесса СВС удобно получать широкий ряд матричных композитов NiAl, армированных TiB_2 , NbB_2 , TiC , Al_2O_3 , ZrB_2 [15] и TiN [16]. Наибольший интерес представляют упрочняющие порошковые добавки из керамики TiB_2 и Al_2O_3 в разных матрицах системы Ni-Al из-за их одинакового коэффициента теплового расширения, химической и физической совместимости [17]. Основная идея нашей работы состоит в том, что, добавляя TiB_2 в керамику Al_2O_3 , можно предотвратить рост зерен Al_2O_3 и распространение трещин в матрице системы Ni-Al. Следовательно, мелкозернистая и хорошо распределенная фаза TiB_2 будет способствовать повышению прочности и вязкости разрушения композиционного материала. Обычно это приводит к повышению стойкости к истиранию и вязкости разрушения в материалах режущего инструмента [18; 19].

Цель работы – экспериментальное обоснование предполагаемых механизмов структурообразования в волне горения системы Ni-Al с упрочняющими добавками TiB_2 и Al_2O_3 , объясняющих микроструктурную эволюцию в волне горения СВС и возможности улучшения пластичности в нормальных условиях, при одновременном повышении температурной прочности интерметаллидов.

Методика экспериментального исследования

В качестве исходных продуктов для формирования реакционной смеси горения волны СВС применялся коммерческий порошок чистого Ni (99,9 %, 38-50 мкм) марки ПНК-УТЗ и порошок Al (99,9 %, 75 мкм) марки ПА4, а в качестве исходных компонентов упрочняющих добавок использовался порошок B_2O_3 (98 %, 75 мкм) и порошок TiO_2 (98 %, 45 мкм). Порошковые смеси рассматривались как две части: одна представляла собой, как видно на рис. 1, эквимольную смесь порошков Ni + Al, в которой мольное соотношение было установлено равным $n(\text{Ni}):n(\text{Al}) = 1:1$, другая представляла собой $\text{Al} + \text{TiO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3$, в которой мольное соотношение фиксировали до $n(\text{Al}):n(\text{TiO}_2):n(\text{B}_2\text{O}_3) = 10:3:3$, и последнее добавляли в первое в массовых долях 0,5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 % и 30 % соответственно.

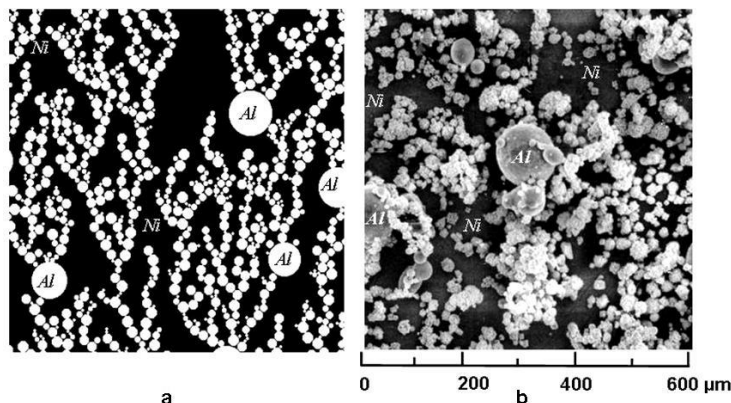


Рисунок 1 – Структура пористой смеси порошков Ni и Al при насыпной плотности:
а – математическая модель [16]; б – изображение сканирующей электронной микроскопии (СЭМ)

Для получения однородной смеси все порошки перемешивались в биконусном смесителе в течение 6 часов. Затем смеси выгружались в металлические формы с размерами и прессовались при давлении 150 МПа в цилиндрические брикеты диаметром $d = 20$ мм и высотой $h = 20$ мм. Было изготовлено семь типичных исходных брикетов с различным содержанием $Al + TiO_2 + B_2O_3$. Для полного реагирования реагентов полученные компакты предварительно нагревали в электрической печи при $300^\circ C$ в течение 30 минут. После этого брикеты вместе с пресс-формами вынимали и на их поверхность насыпали небольшое количество иницирующего порошка диборида титана. Наконец, компакты зажигались вольфрамовой проволокой, раскаленной электрическим током до температуры $1200^\circ C$. Реакции между порошками в исходной смеси были следующими:



Процесс зажигания волны СВС, распространение реакции по образцу и последующие стадии догорания и структурообразования показаны на рис. 2.

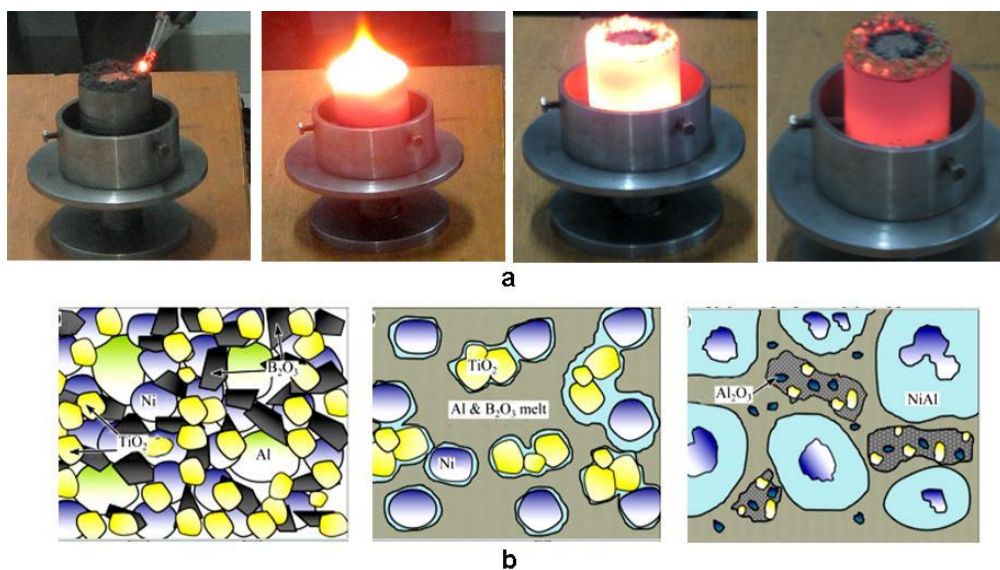


Рисунок 2 – Схема прохождения реакции СВС, инициированной электронагревом (а), и компьютерная визуализация механизма эволюции исходной структуры в волне горения (b)

Устойчивость режима распространения волны горения СВС определялась *in situ* методом дифференциальной хроноскопии [22] по отклонению от средних значений нормальной и тангенциальной составляющей скорости фронта горения, адиабатической температуре «горячих точек» (Hot Spots) и тепловой структуре фронта горения с помощью микропирометрического комплекса на основе высокоскоростной телевизионной камеры (ВидеоСпринт, модель VS-FAST, ООО Videoscans, Россия), как показано на рис. 3 [15].

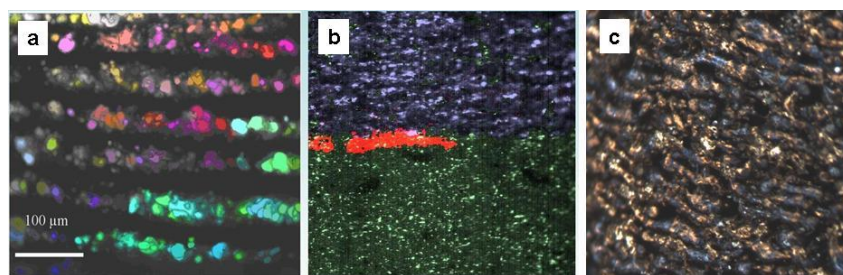


Рисунок 3 – Высокоскоростная регистрация тепловой структуры волны СВС: карта возникновения «горячих точек» (а); мгновенное положение «горячих точек» во фронте волны горения – между исходными (внизу) и конечными (вверху) продуктами СВС (b); морфология поверхности образца со следами слоёв горения (с)

Кристаллические фазы продуктов определяли по рентгенограммам методом дифракции рентгеновских лучей (XRD, модель D/Max 2500PC Rigaku, Япония). Морфологию разрушения и микроструктуру наблюдали с помощью методов сканирующей электронной микроскопии (SEM, модель KYKY2800B) и полевой эмиссионной сканирующей электронной микроскопии (FESEM, NOVA NANOSEM 450, FEI). Составы образцов анализировали с помощью электронно-зондового микроанализа (EPMA, JXA-8230). Микротвердость измеряли с помощью FM-700 с нагрузкой 1 Н и выдерживали в течение 10 с. Для каждого соединения в тесте на микротвердость были взяты пять выемок и вычислено среднее из этих точек с учетом относительных ошибок.

Обсуждение результатов эксперимента

В образцах эквимольной смеси порошков системы Ni+Al волна реакции СВС распространялась в устойчивом режиме со скоростью около 20–25 мм/с. При добавлении Al+TiO₂+B₂O₃ в Ni+Al время задержки зажигания увеличивается из-за внутреннего теплоотвода в инертную добавку и поглощения части тепла, необходимой для начала реакции (2). Как только двухстадийная реакция (1) и (2) была инициирована, волна СВС перешла в режим диффузионной и гидродинамической неустойчивости расплава с повышением скорости распространения [20]. Например, когда содержание Al+TiO₂+B₂O₃ увеличилось до 15 %, скорость движения фронта горения достигала 40 мм/с. Таким образом, вся стадия горения в компактах прошла за пренебрежимо малое время $t_{cop} = h/V_{свс} < 500$ мс подобно тепловому взрыву. После окончания синтеза образцы медленно охлаждали.

На рисунке 4 приведены рентгенограммы конечных продуктов синтеза, полученных путем добавления в исходную эквимольную систему Ni+Al упрочняющей инертной добавки Al+TiO₂+B₂O₃ при различных массовых долях 0,5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 % и 30 % соответственно.

В отсутствие добавок продукты реакции состоят из фазы NiAl, что находится в полном соответствии с реакцией (1). По мере увеличения доли упрочняющей добавки Al+TiO₂+B₂O₃ наряду с фазой NiAl появляются керамические фазы B₂O₃, TiB₂ и Al₂O₃ (см. рис. 4).

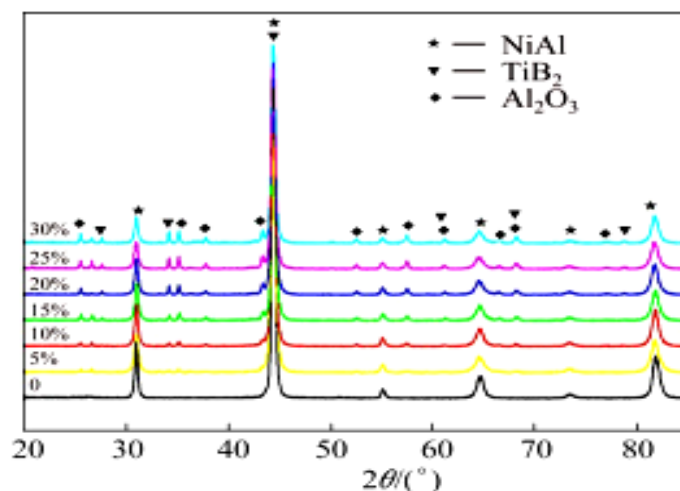


Рисунок 4 – Рентгенограммы продуктов синтеза с различной долей Al+TiO₂+B₂O₃

Из приведенных выше данных рентгенофазного анализа видно, как при увеличении массовой доли содержания реагента Al+TiO₂+B₂O₃ в исходной смеси растет доля упрочняющей керамической фазы TiB₂ и Al₂O₃. Более того, в конечных продуктах синтеза почти не наблюдается непрореагировавшее сырье. Таким образом, можно сделать вывод о полноте протекания реакций (1) и (2), в результате чего получены нужные упрочняющие фазы, как показано выше на рис. 2 (b). На рис. 5 показана микроструктура фазы NiAl в отсутствие добавок.

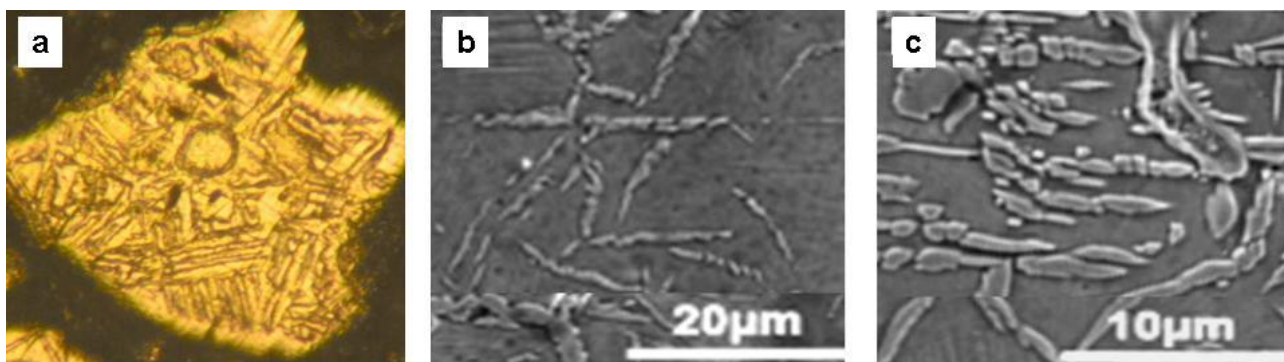


Рисунок 5 – Микроструктура NiAl без добавок: (a) – металлография; (b) и (c) – СЭМ

В образцах, содержащих только Ni+Al, зерна NiAl образуются в результате растворения частицы Ni в расплаве Al (см. рис. 5a), а в объеме зерна наблюдается скелет из Ni_3Al на месте остановившейся границы растворения, как видно на рис 5b и 5c [20; 22].

Увеличение содержания до 10 % в исходной смеси Al+TiO₂+B₂O₃ дает рост адиабатической температуры в волне СВС, что приводит к полному растворению Ni и формированию зерна матрицы NiAl, вдоль границы которой растут частицы (~ 5 мкм) TiB₂ и Al₂O₃, как показано на рис. 6 (a) и (b).

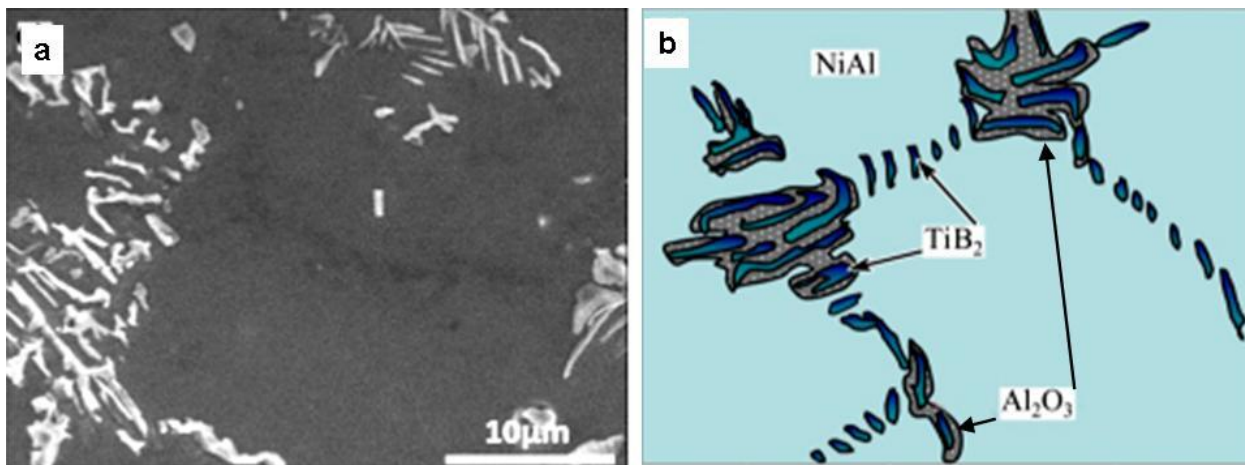


Рисунок 6 – Микроструктура NiAl +10 % (TiB₂-Al₂O₃): (a) – СЭМ; (b) – визуализация

Когда содержание Al+TiO₂+B₂O₃ увеличивается до 20 %, фаза TiB₂ в виде частиц меньше 5 мкм, в основном в форме кубов или кубоидов, собирается в конгломераты с Al₂O₃, как показано на рис. 7.

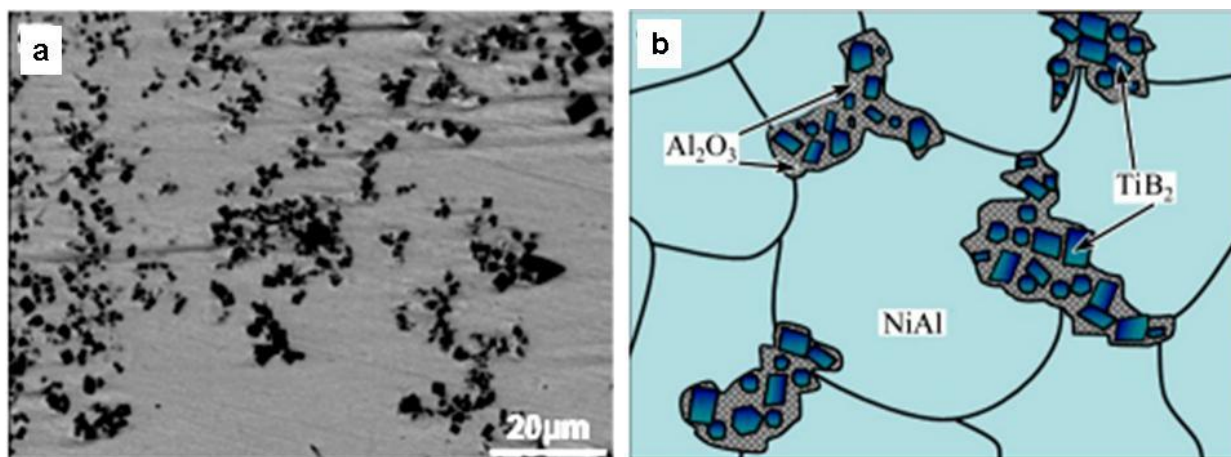


Рисунок 7 – Микроструктура NiAl +20 % (TiB₂-Al₂O₃): (a) – СЭМ; (b) – визуализация

Такие агрегации (60–70 мкм) кластеров частиц $\text{TiB}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ дают нерегулярные конгломераты, а некоторые частицы TiB_2 по-прежнему распределяют на границе зерен матрицы [25]. При дальнейшем увеличении содержания $\text{Al+TiO}_2\text{+B}_2\text{O}_3$ количество частиц TiB_2 увеличивается. Но размер кластеров частиц $\text{TiB}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ становится меньше. Кроме того, некоторые частицы TiB_2 располагаются в матрице, как показано на рисунке 8.

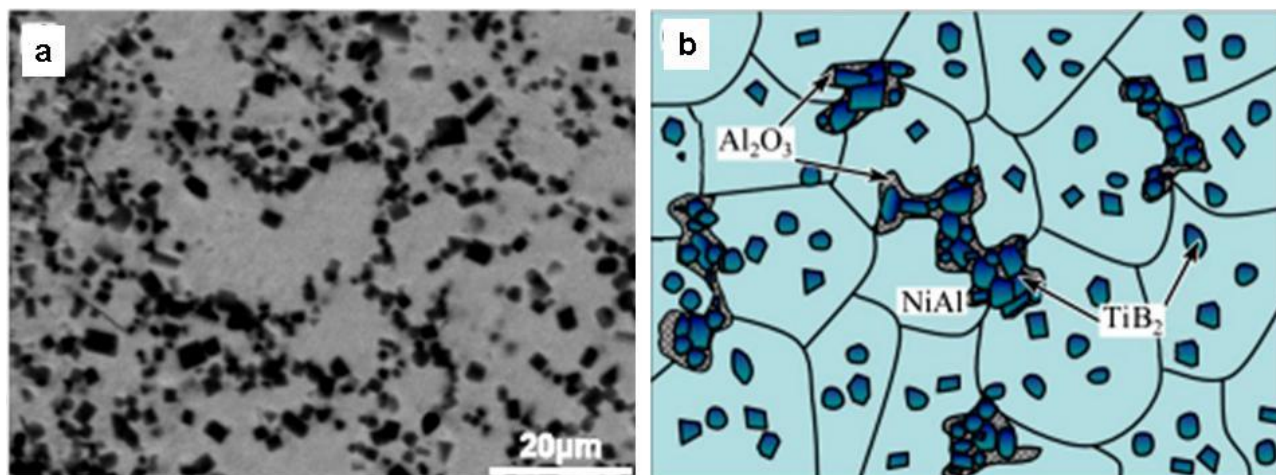


Рисунок 8 – Микроструктура $\text{NiAl} + 30 \% (\text{TiB}_2\text{-Al}_2\text{O}_3)$: (a) – СЭМ; (b) – визуализация

Результаты испытаний на микротвердость и расчетные данные о адиабатической температуре двухстадийной реакции горения (1) и (2) для каждого состава полученных образцов приведены в таблице 1. Средние микротвердости матрицы в продуктах NiAl без и с 10 % $(\text{Al+TiO}_2\text{+B}_2\text{O}_3)$ равны $\text{HV}_{100} = 398$ и $\text{HV}_{100} = 501$ соответственно, которые близки к твердости чистого NiAl . Микротвердость дендритной структуры в продукте с 10 % $(\text{Al+TiO}_2\text{+B}_2\text{O}_3)$ HV_{100} в пределах (1160–1730) значительно колеблется. По сравнению с продуктом, имеющим добавку 10 % $(\text{Al+TiO}_2\text{+B}_2\text{O}_3)$, твердость белого куба или кубоидных кластеров в продуктах с 20 % и 30 % $(\text{Al+TiO}_2\text{+B}_2\text{O}_3)$ выше, а самая высокая твердость доходит до $\text{HV}_{100} = 2700$. Твердость темно-серых нерегулярных конгломератов $(\text{TiB}_2\text{-Al}_2\text{O}_3)$, которые выглядят как склеенные кубоидные частицы TiB_2 в матрице Al_2O_3 достигает (1260–1480) HV_{100} . Твердость образцов с 20 % и 30 % $(\text{Al+TiO}_2\text{+B}_2\text{O}_3)$ также варьируется от 570 до 1420 HV_{100} , и их высокая твердость близка к твердости конгломератов $(\text{TiB}_2\text{-Al}_2\text{O}_3)$.

Таблица 1 – Микротвердость и адиабатическая температура образцов с различным содержанием добавок

Образец	Микротвердость (HV)	Адиабатическая температура, °C
Чистый NiAl	398 ± 19	1638
$\text{NiAl} - 5 \% (\text{TiB}_2\text{-Al}_2\text{O}_3)$	410 ± 21	1665
$\text{NiAl} - 10 \% (\text{TiB}_2\text{-Al}_2\text{O}_3)$	501 ± 25	1692
$\text{NiAl} - 15 \% (\text{TiB}_2\text{-Al}_2\text{O}_3)$	567 ± 28	1719
$\text{NiAl} - 20 \% (\text{TiB}_2\text{-Al}_2\text{O}_3)$	595 ± 29	1745
$\text{NiAl} - 25 \% (\text{TiB}_2\text{-Al}_2\text{O}_3)$	608 ± 31	1772
$\text{NiAl} - 30 \% (\text{TiB}_2\text{-Al}_2\text{O}_3)$	596 ± 30	1799

Таким образом, когда содержание $\text{Al+TiO}_2\text{+B}_2\text{O}_3$ составляет менее 10 %, то количество образованных в ходе протекания реакции (2) частиц TiB_2 и Al_2O_3 , так же, как и значение адиабатической температуры T_{ad} реакционной системы, является явно недостаточным [24]. При увеличении до 30 % достигается более высокое значение T_{ad} и образуется больше TiB_2 и Al_2O_3 .

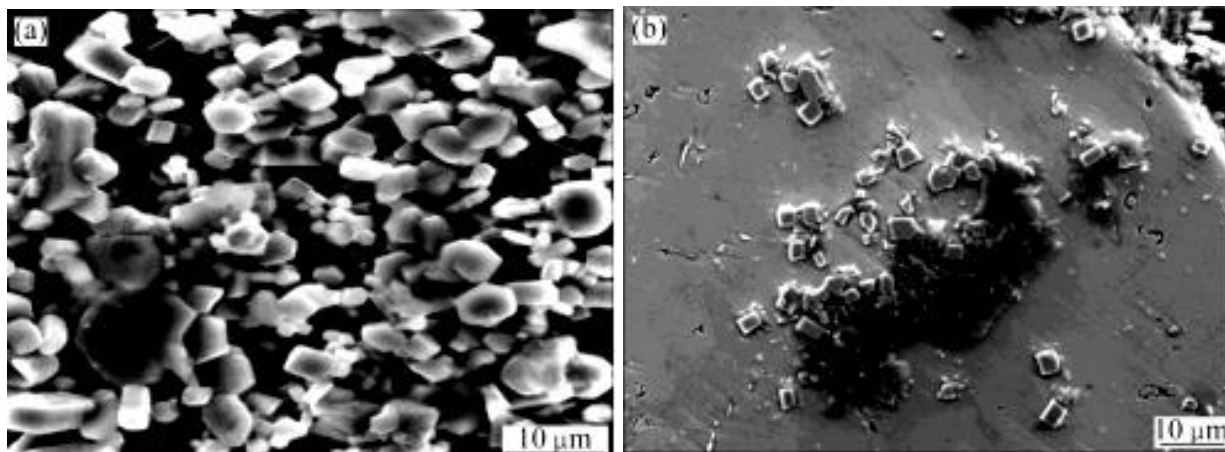


Рисунок 9 – СЭМ изображения обычных частиц TiB_2 (a) и конгломератов с Al_2O_3 (b)

Все вышеперечисленное вносит большой вклад в рост зерен TiB_2 в виде кубов или кубиков, как показано на рисунке 9 (a). Кроме того, большое количество Al_2O_3 прилипает к зернам TiB_2 , как показано на рисунке 9 (b), и растет вокруг них. Поскольку нет границ для разделения пространств между зернами TiB_2 , как показано на фиг. 6 (b), зерна Al_2O_3 развиваются свободно, пока не соприкоснутся друг с другом, образуя конгломераты, как показано на фиг. 7 (a) и (b). Между тем есть также несколько отдельных кубов или кубоидов TiB_2 , импрегнированных в расплав NiAl , и некоторые зерна Al_2O_3 прилипают к примесям в жидкости NiAl .

Наконец, когда NiAl начинает затвердевать, почти все вышеупомянутые твердые фазы, которые образуются до NiAl , будут выталкиваться к границам зерен аналогично тому, как показано на рис. 8 (a) и 8 (b), что вносит вклад в формирование измельченных зерен NiAl . Более того, зерна Al_2O_3 , которые образуются на примесях, могут оставаться в матрице NiAl , чтобы помочь улучшить твердость. Эти зерна Al_2O_3 могут скапливаться вместе и становиться большими конгломератами из-за самодиффузии Al_2O_3 . Следовательно, твердость матрицы на рисунке 7 сильно варьируется, а самая высокая твердость близка к твердости конгломератов.

Выводы

1. Обнаружено, что синтезированные в волне горения СВС из смеси порошков: Ni, Al, TiB_2 и Al_2O_3 образцы композитов $(\text{TiB}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{NiAl})$ с увеличением содержания $(\text{Al}+\text{TiO}_2+\text{B}_2\text{O}_3)$ прямо пропорционально содержат больше керамических фаз TiB_2 и Al_2O_3 , которые генерируются в матрице NiAl .
2. При малом содержании реагента $(\text{Al}+\text{TiO}_2+\text{B}_2\text{O}_3)$, когда он составляет менее 10 %, упрочняющие добавки $(\text{TiB}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ растут в альтернативную игольчатую структуру через режим самосборки.
3. Когда образуется больше $\text{TiB}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$, частицы TiB_2 будут свободно расти и полностью развиваться, и в конечном итоге они будут иметь форму куба, кубоида или шестигульника. В то же время большие агломераты Al_2O_3 , которые образуются вокруг зерен TiB_2 , имеют тенденцию соединяться вместе, образуя большие нерегулярные конгломераты.
4. Микротвердость матричного композита NiAl увеличивается на 50 % с HV (398 ± 19) до HV (608 ± 31) из-за измельчения зернистости структуры композита при увеличении содержания упрочняющей добавки $(\text{TiB}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ до 25 %.
5. Добавление $\text{Al}+\text{TiO}_2+\text{B}_2\text{O}_3$ в $\text{Ni}+\text{Al}$ увеличивает время задержки зажигания из-за внутреннего теплоотвода в инертную добавку и поглощения части тепла, необходимой для начала реакции. Как только двухстадийная реакция инициирована, волна СВС переходит в режим диффузионной и гидродинамической неустойчивости с повышением скорости распространения и адиабатической температуры горения.

Литература

1. Ozdemir, O. A study on NiAl produced by pressure-assisted combustion synthesis / O. Ozdemir, S. Zeytin, S. Bindal // *Vacuum*. – 2010. – Vol. 84. – P. 430–437.
2. Microstructures, mechanical and oxidation behaviors of C/C composites modified by NiAl alloy / H. C. Fang, P. Xiao, X. Xiong, G. J. Yu // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2016. – № 26 (1). – P. 196–202.
3. Obtaining Radiation-resistant Material by SHS Method / M. Kozhanova, A. Kozhanov, I. Golubenko [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 521. – P. 012005.
4. Ray, P. K. Formation of multilayered scale during the oxidation of NiAl–Mo alloy / P. K. Ray, M. Aking, M. J. Kramer // *Applied Surface Science*. – 2014. – № 301 – P. 107–111.
5. Synthesis and fabrication of NiAl coatings with Ti under layer using induction heating / T. Riyadi, T. Zhang, D. Marchant, X. M. Zhu // *Surface and Coatings Technology*. – 2014. – № 258 (6). – P. 154–159.
6. Martensitic transition and super elasticity of Co–Ni–Al ferromagnetic shape memory alloys with two-phase structure / Y. Tanak, K. Oikaw, Y. Sutou, K. Ishida // *Materials Science and Engineering A*. – 2006. – № 438. – P. 1054–1060.
7. Correction factor in temperature measurements by optoelectronic systems / N. Bikberdina, R. Yunusov, M. Boronenko, P. Gulyaev // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 917. – P. 052031.
8. Microstructure evolution and mechanical properties of Ni₃Al/Al₂O₃ composite during self-propagation high-temperature synthesis and hot extrusion / L. Y. Sheng, F. Yang, T. F. Xi [et al.] // *Materials Science and Engineering A*. – 2012. – № 555 (41). – P. 131–138.
9. Effect of Ni addition on the preparation of Al₂O₃–TiB₂ composites using high-energy ball milling / W. Yang, S. Dong, P. Luo [et al.] // *Journal of Asian Ceramic Societies*. – 2004. – № 2 (4). – P. 399–402.
10. Effect of NiAl content on phases and microstructures of TiC–TiB₂–NiAl composites fabricated by reaction synthesis / H.-Z. Cui, L. Ma, L. Cao, F. Teng // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2014. – № 24(2). – P. 346–353.
11. Shokati, A. In situ synthesis of NiAl–NbB₂ composite powder through combustion synthesis / A. Shokati, N. Parvin, A. Hemmati // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2013. – № 549 (5). – P. 141–146.
12. Borodina, K. Thermal analysis of reaction producing K_xTiO₂ / K. Borodina, S. Sorokina, N. Blinova. – DOI: 10.1007/s10973-017-6840-0 // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2018. – Vol. 131. – № 1. – P. 561–566.
13. Чеклов, С. А. Тепловизионный метод контроля фазообразования в процессе СВ-синтеза / С. А. Чеклов, Д. О. Боброва, П. Ю. Гуляев. – Текст : непосредственный // *Электронные средства и системы управления*. – 2017. – № 1-2. – С. 123–125.
14. Control of dispersed-phase temperature in plasma flows by the spectral-brightness pyrometry method / A. V. Dolmatov, I. P. Gulyaev, P. Yu. Gulyaev, V. I. Jordan. – DOI: 10.1088/1757-899X/110/1/012058 // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 110. – № 1. – P. 012058.
15. Бороненко, М. П. Телевизионная измерительная система наносекундного разрешения / М. П. Бороненко, П. Ю. Гуляев. – Текст : непосредственный // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. – 2014. – № 1 (31). – С. 60–64.
16. Моделирование фрактальных структур упаковок порошковых СВС-материалов / И. В. Милукова, А. Л. Трифонов, С. А. Ширяев, П. Ю. Гуляев. – Текст : непосредственный // *Ползуновский альманах*. – 2007. – № 3. – С. 39–41.

17. Оценка времени фазообразования в системе горения NiAl методом визуализации тепловых полей / М. П. Бороненко, А. Е. Серегин, П. Ю. Гуляев, И. В. Милукова. – Текст : непосредственный // Научная визуализация. – 2015. – Т. 7, № 5. – С. 102–108.
18. Dolmatov, A. V. Investigation of structure formation in thin films by means of optical pyrometry / A. V. Dolmatov, I. V. Milyukova, P. Yu. Gulyaev. – DOI: 10.1088/1742-6596/1281/1/012010 // Journal of Physics : Conference Series. – 2019. – Vol. 1281. – P. 012010.
19. Григорьевская, А. А. Компьютерная визуализация радиационного теплопереноса в волне горения СВС / А. А. Григорьевская, П. Ю. Гуляев. – Текст : непосредственный // Ползуновский альманах. – 2019. – № 4. – С. 5–9.
20. Limit of inert functional admixtures depending on the dispersion in the combustion synthesis of nickel aluminides / P. Gulyaev, A. Dolmatov, V. Jordan, Y. Panchenko. – DOI:10.1088/1742-6596/1134/1/012018 // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1134. – P. 012018.
21. Анализ и оптимизация газотермического напыления по скорости и температуре частиц дисперсной фазы потока / А. В. Долматов, И. П. Гуляев, В. И. Кузьмин [и др.]. – Текст : непосредственный // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – № 24 (1). – С. 83–94.
22. Cui, H. Z. Influence of micropores on structural instability of the combustion wave / H. Z. Cui, A. A. Grigoryevskaya, P. Yu. Gulyaev. – Текст : непосредственный // Вестник Югорского государственного университета. – 2019. – № 4 (55). – С. 33–40.
23. Вычислительная методика расчета признаков спиновой неустойчивости СВС / А. А. Григорьевская, П. Ю. Гуляев, В. И. Иордан, И. А. Шмаков. – Текст : непосредственный // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. – 2019. – Т. 3, № 2. – С. 82–91.
24. Калачёв, А. В. Исследование тепловой структуры волны горения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / А. В. Калачёв, П. Ю. Гуляев, В. И. Иордан. – Текст : непосредственный // Известия Алтайского государственного университета. – 2005. – № 1 (35). – С. 104–109.
25. Gulyaev, I. Experience in plasma production of hollow ceramic microspheres with required wall thickness / I. Gulyaev // Ceramics International. – 2015. – Vol. 41. – P. 101–107.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
РФФИ и Правительства ХМАО-Югры
(проект № 18-43-860005)*

А. А. Кудреватых, Л. С. Клименко

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ГАЛОГЕНСОДЕРЖАЩИХ МАКРОЦИКЛИЧЕСКИХ ИМИНОВ АНТРАХИНОНА – ХЕМОСЕНСОРОВ НА КАТИОНЫ МЕТАЛЛОВ

Синтезированы новые краунсодержащие имины 1-гидроксиантрахинона с атомами хлора и фтора в антрахиноновом ядре. Впервые термическая и фотохимическая стадии синтеза были проведены в твердой фазе (без растворителя). Методом спектрофотометрии исследованы особенности комплексообразования новых хемосенсоров с катионами щелочных и щелочноземельных металлов. Показано, что введение атомов галогенов в ядро антрахинона приводит к значительному спектральному отклику. Полученные соединения были испытаны как компоненты тест-систем для визуального определения содержания катионов щелочноземельных металлов в водных средах.

Ключевые слова: антрахиноны, краун-эфир, имины, комплексообразование, хемосенсор.

A. A. Kudrevatykh, L. S. Klimenko

SYNTHESIS AND PROPERTIES OF HALOGEN-CONTAINING MACROCYCLIC ANTHRAQUINONE IMINES – CHEMOSENSORS FOR METAL CATIONS

New crown-containing imines of 1-hydroxyanthraquinone with chlorine and fluorine atoms in the anthraquinone nucleus were synthesized. For the first time, the thermal and photochemical stages of synthesis are carried out in the solid state (without a solvent). The features of complexation of new chemosensors with cations of alkaline and alkaline earth metals were studied by spectrophotometry. It is shown that the introduction of halogen atoms in the anthraquinone nucleus leads to a significant spectral response. The obtained compounds are tested as components of test systems for visual determining the presence of alkaline earth metal cations in aqueous media.

Key words: anthraquinones, crown ether, imines, complexation, chemosensor.

Введение

Обнаружение катионов металлов в окружающей среде или в биологических образцах с использованием хемосенсоров является одной из задач современной органической, неорганической, аналитической, экологической и медицинской химии. Колориметрические и флуоресцентные способы детектирования позволяют обнаруживать ионы металлов «невооруженным глазом» и имеют широкое применение благодаря простоте, экономической эффективности, низкому пределу обнаружения и применимости к биоимиджингу [1–4]. Такого рода хемосенсоры в основном содержат две ковалентно связанные части: рецепторную часть, отвечающую за селективное взаимодействие с аналитом, и сигнальную часть. В роли рецепторных модулей при создании оптических сенсорных устройств во многих случаях применяют краун-эфиры, которые являются эффективными сенсорами для обнаружения катионов различных металлов в растворах [5–7]. В качестве сигнальной части, отвечающей за формиро-

вание отклика при взаимодействии с аналитом, часто используют производные хинонов, так как они являются коммерчески доступными и глубокоокрашенными соединениями [8–10].

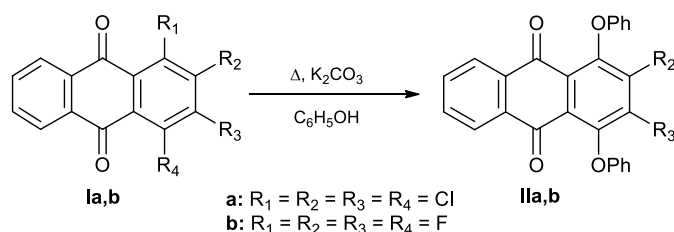
Ранее нами были синтезированы и исследованы катион-рецепторные свойства ряда краунсодержащих иминов 1-гидроксиантрахинона [11–14]. Оказалось, что они являются эффективными хромоионофорами, принцип действия которых основан на катион-индуцированном смещении прототропного таутомерного равновесия имин $\rightleftharpoons$ енамин в сторону иминной формы при связывании с катионами металлов. Было показано [14], что введение акцепторных заместителей изменяет соотношение таутомерных форм и приводит к значительному спектральному отклику при комплексообразовании с катионами щелочноземельных металлов. Синтез таких производных осуществлялся по стандартной методике, описанной ранее в работе [15], с использованием больших объемов органических растворителей. Целью данной работы является оптимизация методов синтеза краунсодержащих иминов 1-гидроксиантрахинона с атомами хлора и фтора в антрахиноновом ядре и исследование катион-рецепторных свойств полученных соединений.

Обсуждение полученных результатов

Объектами исследования являются 1-гидрокси-9,10-антрахинон-9-иминобензокраун-эфир, содержащие в качестве заместителей атомы хлора и фтора в антрахиноновом ядре. Синтез целевых соединений **IIIa,b** был осуществлен в две стадии. На первом этапе необходимо было получить фотоактивные 1,4-дифеноксиантрахиноны **IIa,b** путем нуклеофильного замещения α -атомов галогена в 1,2,3,4-тетрахлор- и 1,2,3,4-тетрафторантрахиноне (**Ia,b**) на феноксигруппу (схема 1). Сложность подбора условий селективного замещения в α -положение полигалогенантрахинонов состоит в том, что направление реакций нуклеофильного замещения неоднозначно и приводит к смеси продуктов [16]. В литературе [16; 17] имеются данные о зависимости характера замещения в 1,2,3,4-тетрахлор- и тетрафторантрахинонах на амино-, метокси- и арилтиогруппу от природы растворителя и температуры. Было показано, что в неполярных растворителях (гептан, бензол, толуол) имеет место преимущественное замещение α -атома галогена, а в диполярных апротонных растворителях (ДМСО, ДМФА, ацетонитрил) – β -атома галогена. Региохимические зависимости от растворителя установлены также в реакциях аминирования полифторированных производных 1,4-нафтохинона [18]. Взаимодействие полигалогенантрахинонов с фенолятами щелочных металлов ранее не изучалось. Для получения фотоактивных 1,4-феноксипроизводных антрахинона **IIa,b** нами были использованы условия, способствующие замещению α -атома галогена. Оказалось, что длительное кипячение тетрахлор- и тетрафторантрахинонов в гептане и толуоле с фенолом и триэтиламином приводит к смеси продуктов моно- и дизамещения в α - и β -положениях антрахинонового ядра с преобладанием продуктов α -замещения.

Для увеличения региоселективности реакции замещения атомов галогена в α -положении представляло интерес исследовать новые условия проведения процесса в твердой фазе без растворителя. Известно, что в ряде случаев органические реакции в твердой фазе идут более эффективно и более селективно, причем скорость твердофазной реакции может быть существенно увеличена (на несколько порядков) механической активацией реакционной системы [19]. Немаловажно, что применение твердофазного метода позволяет создать новые экономически выгодные и экологически чистые процессы за счет сокращения числа стадий и исключения использования растворителей.

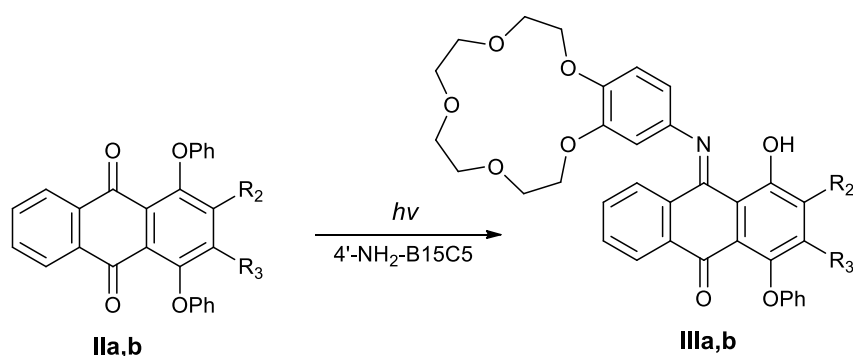
Для проведения твердофазного синтеза смесь соединения **Ia** или **Ib**, поташа и фенола тщательно растирали в агатовой ступке и затем нагревали в закрытом бюксе. В случае хлорпроизводного **Ia** термообработку проводили при 130 °С в течение 2 часов, а в случае фторпроизводного **Ib** – при 100 °С 1 час. Контроль за ходом реакции осуществляли с помощью ТСХ. После хроматографической очистки продукты реакции **IIa,b** были выделены с высокими выходами – 87 % и 92 % соответственно (схема 1).



Таким образом, проведенные эксперименты показали, что новый подход к проведению синтеза целевых соединений в твердой фазе с дополнительной механической активацией реакционной смеси проходит более эффективно и избирательно, чем в присутствии растворителя и катализатора. Разработанные условия получения 1,4-феноксипроизводных антрахинона в твердой фазе без растворителя являются препаративно удобной методикой селективного получения различных α -замещенных производных галогенантрахинонов.

Вторую стадию синтеза целевых краунсодержащих иминов полигалогенантрахинонов проводили фотохимическим путем при совместном облучении соединения **IIa** или **IIb** и 4-аминобензо-15-краун-5-эфира в бензоле аналогично [15]. После обработки реакционных смесей и хроматографической очистки с выходами 65 и 71 % были выделены соединения **IIIa,b** (схема 2). Структуры всех синтезированных производных были подтверждены комплексом физико-химических методов анализа.

Схема 2



Фотохимический синтез иминов 1-гидроксиантрахинона может быть проведен и в твердой фазе, как описано нами в работе [20]. Для того чтобы сравнить эффективность фотолиза производных **IIa,b** в растворителе и в твердой фазе, смесь реагентов тщательно растирали в ступке, а затем тонкий диспергированный слой реакционной смеси помещали между двух стекол и облучали солнечным светом до исчезновения исходного соединения в течение 2–3 часов (контроль по ТСХ). После хроматографической очистки реакционной смеси соединения **IIIa,b** были выделены с высокими выходами 85 % и 87 % соответственно. Полученные экспериментальные данные показывают, что твердофазный фотолиз проходит более эффективно, чем в растворителе. При механохимической обработке смеси реагентов заметно увеличивается скорость фотопревращения и выходы целевых продуктов. Причина роста реакционной способности состоит в увеличении потенциальной энергии в виде кристаллических дефектов, образующихся благодаря механической активации реагентов в твердой фазе. Отсутствие растворителя значительно упрощает процесс выделения продукта реакции и экономит затраты на проведение эксперимента.

Изучение процессов комплексообразования синтезированных соединений **IIIa,b** проводили спектрофотометрическим методом. Регистрировали электронные спектры поглощения (ЭСП) растворов **IIIa,b** в ацетонитриле в отсутствии и в присутствии перхлоратов щелочных и щелочноземельных металлов. На рисунке 1 представлены ЭСП лигандов **IIIa,b** и их смесей с перхлоратом бария.

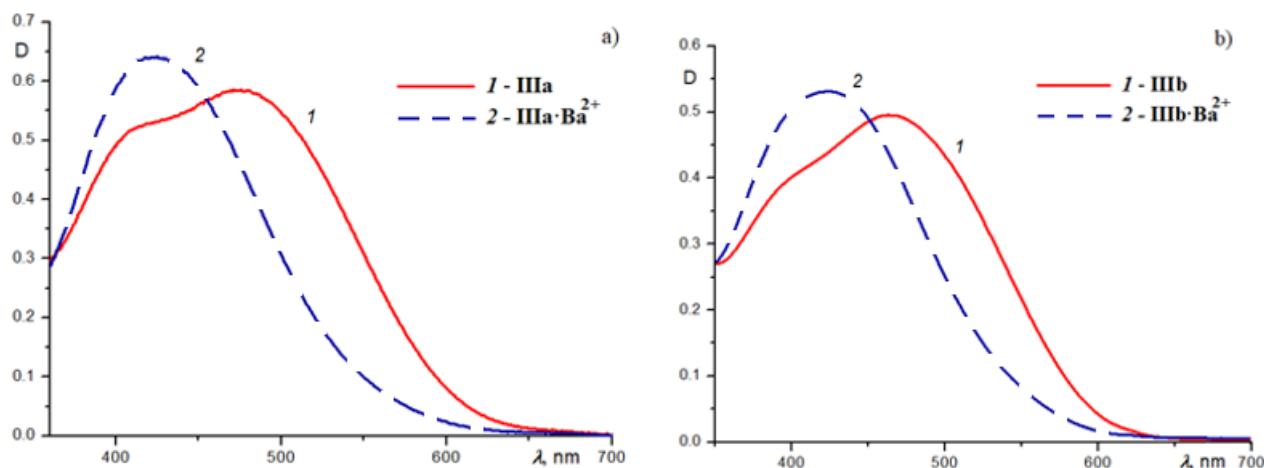


Рисунок 1 – Изменение ЭСП растворов IIIa (a) и IIIb (b) при добавлении $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2$ в MeCN ($C_L=1 \cdot 10^{-4}$ М)

Как видим, в ходе образования комплексов наблюдаются гипсохромные сдвиги длинноволновой полосы поглощения исследуемых производных, при этом меняется и сама форма спектра поглощения. Такие изменения ЭСП связаны со сдвигом прототропного таутомерного равновесия имин-енамин при комплексообразовании [14]. При добавлении перхлоратов щелочных и щелочноземельных металлов визуально наблюдается контрастное изменение цвета раствора от красно-коричневого до светло-желтого («naked-eye»-эффект), как показано на рисунке 2.

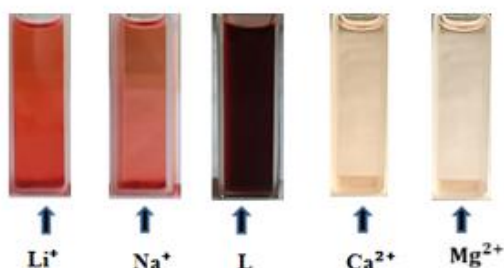


Рисунок 2 – Изменение цвета растворов в MeCN соединения IIIb при добавлении солей

В таблице 1 приведены количественные характеристики наблюдаемых спектральных изменений растворов в ацетонитриле соединений **IIIa**, **IIIb** и 1-гидрокси-9,10-антрахинон-9-иминобензо-15-краун-5-эфира (**IV**) при добавлении солей щелочных и щелочноземельных металлов.

Таблица 1 – Изменение ЭСП растворов **IIIa**, **IIIb** и **IV** ($C_L=1 \cdot 10^{-4}$ М) в MeCN до и после прибавления перхлоратов щелочных и щелочноземельных металлов. $[\text{L}]/[\text{M}^{n+}] = 1:10$

Соединение	$\lambda_{\text{max}}^* (\Delta\lambda_{\text{max}}), \text{нм}$							
	-	Li^+	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Sr^{2+}	Ba^{2+}
IIIa	476	447 (-29)	438 (-38)	444 (-32)	420 (-54)	424 (-52)	425 (-51)	423 (-53)
IIIb	474	444 (-30)	434 (-40)	440 (-34)	415 (-59)	420 (-54)	421 (-53)	414 (-60)
IV	464	464 (-8)	458 (-6)	460 (-4)	452 (-12)	449 (-15)	452 (-12)	452 (-12)

* λ_{max} – положение максимума поглощения в ЭСП, нм

Из данных таблицы 1 следует, что для всех соединений связывание катиона металла атомами кислорода краун-эфирного фрагмента приводит к гипсохромному сдвигу и изменению формы длинноволновой полосы поглощения. Величина сдвига полосы поглощения в

коротковолновую область определяется как природой катиона, так и структурой хромофорной системы. Исследование показало, что введение в положения 2 и 3 антрахинонового ядра атомов фтора и хлора увеличивает диапазон спектральных изменений при образовании комплексов с перхлоратами щелочных и щелочноземельных металлов по сравнению с незамещенным аналогом **IV**. При этом наиболее контрастные изменения цвета растворов синтезированных лигандов наблюдаются при добавлении солей щелочноземельных металлов. Так, для катионов Ba^{2+} гипсохромный сдвиг длинноволновой полосы поглощения составляет -54 нм (**IIIa**) и -60 нм (**IIIb**), а для водородного аналога **IV** – 12 нм.

На основе соединения **IIIb** нами были изготовлены колориметрические тест-системы (на бумажной основе) для обнаружения катионов щелочноземельных металлов в водных растворах. Методика изготовления тест-полосок описана в работе [21]. Была построена цветовая шкала концентраций ионов бария в диапазоне от 10^{-8} до 1 М. Испытания показали, что тест-полоски мгновенно изменяют цвет от темно-бордового до светло-желтого в зависимости от концентрации определяемого иона металла в водной среде.

Экспериментальная часть

Для препаративной колоночной хроматографии использовали силикагель фирмы «Merck» с размером частиц 0.063–0.100 мм. Анализ ТСХ выполняли на пластинках «Silufol UV-254». Растворители марки «хч» и «осч» использовали без дополнительной очистки. Элементный анализ выполнен на приборе vario MICRO cube. ИК-спектры регистрировали на ИК-Фурье спектрометре «FT-801» фирмы Simex в таблетках KBr и в режиме МНПВО (приставка с алмазным кристаллом). Спектры ЯМР измеряли на спектрометре Bruker BioSpin Avance III 500 MHz. Электронные спектры поглощения растворов в ацетонитриле ($1 \cdot 10^{-4}$ моль/л) измеряли на спектрофотометре «Lambda 35 UV/VIS» фирмы Perkin Elmer.

Синтез соединений **IIa,b (общая методика).** 1 ммоль 1,2,3,4-тетрахлор- или тетрафторантрахинона (**Ia,b**), 3 ммоль фенола и 1.5 ммоль поташа тщательно растирали в агатовой ступке до получения однородной массы. Полученную реакционную смесь помещали в закрытый бюкс и нагревали в термостатированном шкафу. В случае соединения **Ia** – при 130 °С в течение 2 часов, а в случае **Ib** – при 100 °С 1 час. Реакционную смесь растворяли в бензоле и хроматографировали на колонке с SiO_2 (элюент – бензол). Собирали основную желтую зону, содержащую целевые продукты **IIa** или **IIb**. Фракцию упаривали до небольшого объема (5–10 мл) и приливали гексан. Выпавшие кристаллы фильтровали, промывали гексаном и сушили при комнатной температуре, затем перекристаллизовывали из смеси этанол-бензол (4:1).

1,4-дифенокси-2,3-дихлор-9,10-антрахинон (**IIa**).

Выделили 0.40 г (87 %) **IIa**, т.пл. 257–259 °С. ЭСП (этанол), λ_{max}/nm ($lg \epsilon$): 260 (4.63); 306 (3.94); 346 (3.64). ИК (ν/cm^{-1}): 3070, 3045 (=C-H); 1678 (C=O); 1590 (C=C_{ar}); 1083 (C-Cl). ЯМР 1H ($CDCl_3$, $\delta/м.д.$, J/Гц): 8.07 (м, 2H, H-5,8); 7.69 (м, 2H, H-6,7); 7.34 (м, 2H, H-3',5'), 7.08 (м, 1H, H-4'), 6.89 (м, 2H, H-2',6'). Найдено, %: C 67.30; H 3.05; Cl 15.21. $C_{26}H_{14}Cl_2O_4$. Вычислено, %: C 67.70; H 3.06; Cl 15.37.

1,4-дифенокси-2,3-дифтор-9,10-антрахинон (**IIb**).

Выделили 0.39 г (92 %) **IIb**, т.пл. 212–213 °С. ЭСП (этанол), λ_{max}/nm ($lg \epsilon$): 256 (4.59); 330 (3.79); 344 (3.64). ИК (ν/cm^{-1}): 3068, 3040 (=C-H); 1662 (C=O); 1592 (C=C_{ar}); 1265, 1220 (C-F). ЯМР 1H ($CDCl_3$, $\delta/м.д.$, J/Гц): 8.15 (м, 2H, H-5,8); 7.73 (м, 2H, H-6,7); 7.36 (м, 2H, H-3',5'), 7.16 (м, 1H, H-4'), 6.95 (м, 2H, H-2',6'). Найдено, %: C 72.43; H 3.15; F 8.43. $C_{26}H_{14}F_2O_4$. Вычислено, %: C 72.90; H 3.29; Cl 8.87.

Фотохимический синтез соединений **IIIa,b в бензоле (общая методика).** Раствор 0.5 ммоль соответствующего производного **IIa** или **IIb** и 0.6 ммоль 4-аминобензо-15-краун-5-эфира в 150 мл бензола освещали солнечным светом в течение 5–6 часов. Контроль за ходом реакции осуществляли по ТСХ. Фотолизат упаривали до 10–15 мл и хроматографировали на колонке с SiO_2 (элюент – бензол). При градиентном элюировании с повышением полярности элюента (до-

бавление этилового спирта) выделяли основную красно-коричневую фракцию, содержащую целевые продукты **IIIa** или **IIIb**. Фракцию упаривали до небольшого объема (5–10 мл) и приливали гексан. Выпавшие кристаллы фильтровали, промывали гексаном и сушили при комнатной температуре, затем перекристаллизовывали из смеси этанол-бензол (4:1).

4'-(1-гидрокси-2,3-дихлор-4-фенокси-9,10-антрахинон-9-имино)-бензо-15-краун-5-эфир (IIIa). Выделили 0.21 г (65 %), т.пл. 157-159°C. ИК ($\nu/\text{см}^{-1}$): 3080 (=C-H); 2942, 2853 (C-H); 1670 (C=O); 1587 (C=C_{ar}); 1020 (C-Cl). ЯМР ^1H (CDCl_3 , $\delta/\text{м.д.}$, $J/\text{Гц}$): 17.20 (с, 1H, OH); 7.91 (м, 1H, H-5); 7.62 (м, 1H, H-6); 7.49 (м, 1H, H-7); 7.39 (м, 1H, H-8); 7.32 (м, 2H, H-3'',5''); 7.11 (м, 1H, H-4''); 6.98 (м, 3H, H-6',2'',6''); 6.95 (д, 1H, H-3', $J = 2$); 6.80 (дд, 1H, H-5', $J_1 = 8.5$, $J_2 = 2$) 4.10 – 3.25 (м, 16H, -CH₂-). Найдено, %: C 62.35; H 4.46; Cl 10.72; N 2.06. $\text{C}_{34}\text{H}_{29}\text{Cl}_2\text{NO}_8$. Вычислено, %: C 62.78; H 4.49; Cl 10.90; N 2.15.

4'-(1-гидрокси-2,3-дифтор-4-фенокси-9,10-антрахинон-9-имино)-бензо-15-краун-5-эфир (IIIa). Выделили 0.22 г (71%), т.пл. 149-151°C. ИК ($\nu/\text{см}^{-1}$): 3066 (=C-H); 2952, 2875 (C-H); 1675 (C=O); 1595 (C=C_{ar}); 1260 (C-F). ЯМР ^1H (CDCl_3 , $\delta/\text{м.д.}$, $J/\text{Гц}$): 16.90 (с, 1H, OH); 7.96 (м, 1H, H-5); 7.64 (м, 1H, H-6); 7.50 (м, 1H, H-7); 7.41 (м, 1H, H-8); 7.31 (м, 2H, H-3'',5''); 7.12 (м, 1H, H-4''); 7.03 (д, 1H, H-6', $J = 8.5$); 6.95 (д, 1H, H-3', $J = 2$); 6.86 (м, 1H, H-2'',6''); 6.80 (дд, 1H, H-5', $J_1 = 8.5$, $J_2 = 2$); 4.11 – 3.28 (м, 16H, -CH₂-). Найдено, %: C 66.35; H 4.58; F 5.95; N 2.11. $\text{C}_{34}\text{H}_{29}\text{F}_2\text{NO}_8$. Вычислено, %: C 66.12; H 4.73; F 6.15; N 2.27.

Фотохимический синтез соединений IIIa,b в твердой фазе (общая методика). 0.5 ммоль соответствующего производного **IIa** или **IIb** и 0.6 ммоль 4-аминобензо-15-краун-5-эфира тщательно растирали в агатовой ступке до получения однородного мелкодисперсного порошка. Полученный порошок тонким слоем распределяли между двух стеклянных пластинок и облучали солнечным светом до исчезновения исходного соединения (контроль по ТСХ). В случае соединения **IIIa** пластинку облучали 3 часа, а соединение **IIIb** – 2 часа 30 минут. После хроматографической очистки были выделены соединения **IIIa,b** с выходами 85 % и 87 % соответственно.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных экспериментов удалось разработать препаративно удобную твердофазную методику получения новых галогенсодержащих макроциклических иминов антрахинона. В результате механохимической обработки смеси реагентов заметно увеличивается скорость реакции и выходы целевых продуктов. Исследованы особенности комплексообразования новых хемосенсоров с катионами щелочных и щелочноземельных металлов. Оказалось, что введение атомов галогенов в ядро антрахинона в 5 раз увеличивает спектральный отклик при комплексообразовании, что позволяет использовать полученные соединения в качестве тест-систем для визуального определения содержания катионов щелочноземельных металлов в водных средах.

Литература

1. Chemosensors: Principles, Strategies, and Applications / edited B. Wang, Eric V. Anslyn. – Weinheim : John Wiley & Sons, 2011. – 524 p. – DOI 10.1002/anie.201201767.
2. Kaur, N. Colorimetric Metal Ion Sensors / N. Kaur, S. Kumar. – DOI 10.1016/j.tet.2011.09.003 // Tetrahedron. – 2011. – Vol. 67. – P. 9233–9264.
3. Udhayakumari, D. Colorimetric and fluorescent chemosensors for Cu^{2+} . A comprehensive review from the years 2013–15 / D. Udhayakumari, S. Naha, S. Velmathi. – DOI 10.1039/c6ay02416e // Analytical Methods. – 2017. – 9(4). P. 552–578.
4. Optical methods for the detection of heavy metal ions / A. N. Uglov, A. Bessmertnykh-Lemeune, R. Guillard [et al.]. – DOI 10.1070/RC2014v083n03ABEH004414 // Russian Chem. Reviews. – 2014. – Vol. 83:3. – P. 196–224.

5. Recent progress in the design and applications of fluorescence probes containing crown ethers / J. Li, D. Yim, W.-D. Jang, J. Yoon. – DOI 10.1039/c6cs00619a // *Chemical Society Reviews*. – 2017. – 46(9). – P. 2437–2458.
6. Regio- and stereospecific [2+2] photocyclodimerization of a crown-containing butadienyl dye via cation-induced self-assembly in solution / E. N. Ushakov, A. I. Vedernikov, M. V. Alfimov, S. P. Gromov. – DOI 10.1039/C0PP00227E // *Photochemical & Photobiological Sciences*. – 2011. – Vol. 10. – P. 15–18.
7. Ushakov, E. N. Crown Ether Based Optical Molecular Sensors and Photocontrolled Ionophores / E. N. Ushakov, M. V. Alfimov, S. P. Gromov. – DOI 10.6060/mhc2010.4.189 // *Macrocyclics*. – 2010. – Vol. 3. – P. 189–200.
8. Файн, В. Я. 9,10-Антрахиноны и их применение / В. Я. Файн. – Москва : Центр фотохимии РАН, 1999. – 92 с. – Текст : непосредственный.
9. Electrochemical transformations and anti/prooxidant activity of sterically hindered o-benzoquinones / I. V. Smolyaninov, V. V. Kuzmin, M. V. Arsenyev [et al.]. – DOI 10.1007/s11172-017-1876-7 // *Russian Chemical Bulletin*. – 2017. – Vol. 66. – № 7 – P. 1217–1229.
10. Saini, R. Quinones based molecular receptors for recognition of anions and metal ions / R. Saini, N. Kaur, S. Kumar. – DOI 10.1016/j.tet.2014.04.058 // *Tetrahedron*. – 2014. – Vol. 70. – P. 4285–4307.
11. Crown-containing naphtho- and anthraquinones: synthesis and complexation with alkali and alkaline-earth metal cations / T. P. Martyanov, E. N. Ushakov, V. A. Savelyev, L. S. Klimenko. – DOI 10.1007/s11172-012-0323-z // *Russian Chemical Bulletin*. – 2012. – Vol. 61. – P. 2282–2294.
12. Martyanov, T. P. Effect of Interchromophoric Stacking Interactions on the Stability of the Sandwich-Type Complexes of 1-Hydroxy-9, 10-anthraquinone-9-iminobenzo-15-crown-5 Ether with Metal Cations / T. P. Martyanov, E. N. Ushakov, L. S. Klimenko. – DOI 10.6060/mhc130746m // *Macrocyclics*. – 2013. – Vol. 6. – № 3. – P. 240–244.
13. Tautomeric chromoionophores derived from 1-aryloxyanthraquinones and 4'-aminobenzo-15-crown-5 ether: Sandwich complex formation enhanced by interchromophoric interactions / T. P. Martyanov, L. S. Klimenko, V. I. Kozlovskiy, E. N. Ushakov. – DOI 10.1016/j.tet.2016.12.048 // *Tetrahedron*. – 2017. – Vol. 73. – P. 681–691.
14. Effect of substituents on cation-receptor properties of crown-containing 1-hydroxyanthraquinone imines / A. A. Kudrevatykh, D. A. Neznaeva, T. P. Martyanov, L. S. Klimenko. – DOI 10.1007/s11172-019-2465-8 // *Chemical Bulletin*. – 2019. – Vol. 68. – P. 623–627.
15. Martyanov, T. P. Oligoether derivatives of 1-phenoxyanthraquinone: Synthesis, photochromism, and complex formation with metal cations / T. P. Martyanov, L. S. Klimenko, E. N. Ushakov. – DOI 10.1134/S1070428016080066 // *Russian Journal of Organic Chemistry*. – 2016. – Vol. 52. – P. 1126–1136.
16. Горелик, М. В. Химия антрахинонов и их производных. / М. В. Горелик. – Москва : Химия, 1983. – 296 с. – Текст : непосредственный.
17. Loskutov, V. A. Effects of solvent and temperature on the reaction of 1,2,3,4-tetrafluoroanthraquinone with 4-tert-butylbenzenethiol / V. A. Loskutov. – DOI 10.1134/S1070428013100114 // *Russian Journal of Organic Chemistry*. – 2013. – Vol. 49. – P. 1470–1473.
18. Troshkova, N. M. Synthesis of Fluorine-Containing Poly(phenylamino)-1,4-naphthoquinones / N. M. Troshkova, L. I. Goryunov, V. D. Shteingarts. – DOI 10.1134/S1070428010100271 // *Russian Journal of Organic Chemistry*. – 2010. – Vol. 46. – P. 1585–1587.
19. Tanaka, K. Solvent-free Organic Synthesis / K. Tanaka. – Weinheim : Wiley-VCH, 2003. – 433 p. – DOI 10.1002/3527601821.
20. Solid-state photochemical reactions of 1-aryloxy-9,10-anthraquinone derivatives / L. S. Klimenko, S. Z. Kusov, V. M. Vlasov [et al.]. – DOI 10.1070/MC2006v016n04ABEH002294 // *Mendeleev Commun.* – 2006. – Vol. 16. – P. 224–226.
21. Кудреватых, А. А. Разработка оптических хемосенсоров для обнаружения цианид-ионов в водных средах / А. А. Кудреватых, Т. П. Мартянов, Л. С. Клименко. – DOI 10.17816/byusu201901782-87. – Текст : непосредственный // *Вестник Югорского государственного университета*. – 2019. – 1 (52). – С. 82–87.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ
в рамках научных проектов № 18-41-220004 и № 18-08-01475.*

М. П. Бороненко, И. В. Милукова, С. А. Чеклов

СВ-СИНТЕЗ АЛЮМО-МАРГАНЦЕВОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ AL-MNO₃

Работа посвящена применению самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для получения алюмо-марганцевого сплава в системе MnO₃ – Al. Эксперимент проводился в специально сконструированном СВС-реакторе высокого давления с предварительным и без предварительного нагрева шихты. Синтезированные образцы исследовались методами рентгенофазового, металлографического, микрорентгеноспектрального анализа, проведены испытания на сжатие. Данные РФА показали присутствие интерметаллидов разной стехиометрии: Al₈Mn₅, Al₁₁Mn₄ и Al₆Mn. Установлено, что основной фазой является интерметаллид Al₈Mn₅. Структура образца – игольчатая. Сплав обладает высокой твердостью структурных составляющих: от 624 HV до 934 HV.

Высокие показатели прочности на сжатие и высокая твердость являются подтверждением того, что синтезированный сплав является прямым конкурентом твердым сплавам.

Ключевые слова: марганец, алюминий, порошковая металлургия, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, рентгенофазовый анализ, твердый сплав.

M. P. Boronenko, I. V. Milyukova, S. A. Cheklov

SH-SYNTHESIS OF ALUMINO-MANGANESE ALLOY BASED ON THE AL-MNO₃ SYSTEM

The work is devoted to the use of self-propagating high-temperature synthesis for producing aluminum-manganese alloy in the MnO₃ – Al system. The experiment was carried out in a specially designed SHS reactor at various pressures with and without preliminary heating. The synthesized samples were studied by X-ray diffraction, metallographic, and X-ray spectral analysis; compression tests were performed. X-ray powder diffraction data showed the presence of intermetallic compounds of different stoichiometries: Al₈Mn₅, Al₁₁Mn₄, and Al₆Mn. It was established that the main phase is the Al₈Mn₅ intermetallic compound. The structure of the sample has a needle structure. The alloy has a high hardness of structural components: from 624 HV to 934 HV.

High compressive strength and high hardness are evidence that the synthesized alloy is a direct competitor to hard alloys.

Key words: manganese, aluminum, powder metallurgy, self-propagating high-temperature synthesis, x-ray phase analysis, hard alloy.

Введение

В настоящее время ощущается большая необходимость в материалах с одной стороны достаточно прочных и легких [1], а с другой – стоящих значительно дешевле титана или углеродистого легкого сплава, активно применяемых как в авиационной и автомобильной промышленности, так и в бытовой технике и портативной электронике [2; 3].

Алюмо-марганцевые сплавы имеют высокую прочность, пластичность и технологичность, большие показатели коррозионной стойкости и хорошую свариваемость [4]. В работе предпринята попытка получить перспективный алюмо-марганцевый сплав, используя эффективную и недорогую технологию СВ-синтеза.

Цель работы – методом СВ-синтеза получить сплав Al-Mn, схожий по характеристикам с твердым сплавом серии 3003 на основе алюминия и никеля.

Методика исследования

Во время работы проведена серия экспериментов в реакторе Р-4 по получению целевого продукта при разных давлениях кислорода внутри реактора – 6 и 9 атмосфер [5–7]. Реактор представляет собой стальную герметичную камеру, куда может закачиваться не только воздух, но и реакционная среда. Давление отслеживается манометром. Внутри камеры помещен вольфрамовый электрод, связанный с источником питания, на который подается импульс тока для поджига шихты для инициации реакции СВ-синтеза. Целью экспериментов являлось получение алюминиево-марганцевого сплава, приближенного по физико-техническим характеристикам к известному сплаву 3003.

Для решения этой задачи было предложено провести синтез из порошковых материалов системы Al-MnO₃. Метод СВС предполагает, что химические реакции между компонентами должны проходить с выделением тепла для осуществления самоподдерживающегося процесса [8; 9; 10]. Предварительно был проведен расчет энтальпии реакции восстановления алюминием марганца из окислов по известной методике [11].

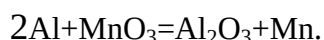
В основе термодимических расчетов лежит следствие закона Гесса: энтальпия (тепловой эффект) реакции равна сумме энтальпий образования продуктов реакции за вычетом суммы энтальпий образования исходных веществ.

Табличные значения для расчета реакции приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения энтальпии компонентов реакции

Компонент	ΔН, кДж/моль
Al	0
Al ₂ O ₃	-1675,7
Mn	0
MnO ₃	-521,5

Уравнение реакции восстановления:



Тепловой эффект реакции:

$$-521,5 - 1675,7 = -2197,2 \text{ кДж/моль}.$$

Таким образом, реакция восстановления марганца алюминием является экзотермической, в ходе которой выделяется достаточно много тепловой энергии.

Исходные порошки алюминия ПА-4 имели среднюю дисперсность до 50 мкм; порошок MnO₃ – 100 мкм. Смешивание порошков проводилось в течение 2 часов методом «пьяной бочки».

Расчет состава шихты проводился исходя из необходимого количества оксида марганца для получения 30 граммов сплава Al-Mn. По расчетам, для получения 30 граммов конечного продукта Al-Mn необходимо 23,76 грамма порошка MnO₃ и 17,54 грамма Al, или 42,5 мас. % Al и 57,5 мас. % MnO₃ соответственно. При этом в эксперименте дискретно менялось давление в реакторе: 3, 6 и 9 Па. В ходе реакции СВС первой серии наблюдался незначительный разброс реагирующего вещества горения из реакционной формы. В серию входило несколько экспериментов с последующим увеличением давления от 3 до 9 атмосфер, в среднем потери полезного продукта составляет 1±0,15 грамма. Оптимальное давление, при котором по-

тери полезного продукта являются минимальными, составляет 6 атмосфер. При таком давлении также возрастает масса полезного продукта и число удавшихся экспериментов.

В таблице 2 представлены количественные характеристики начальных условий синтеза, исходной шихты и конечного продукта первой серии экспериментов.

Таблица 2 – Количественные характеристики процесса синтеза первой серии экспериментов

№	Масса засыпки, гр	Масса продукта, гр	H засыпки, мм	D пробирки, мм	Р, Па с последующим возрастанием		Al, мас. %	MnO ₃ , мас. %
					До	После		
1	28,5	12,8	60	22	3	9	42,5	57,5
2	26,4	14	60	22	6	12	42,5	57,5
3	20,24	10	50	22	9	15	42,5	57,5

Однако в первых экспериментах с таким составом шихты сплав получился хрупким и твердым, с низкой вязкостью и пластичностью и высокой пористостью (рис. 1).



Рисунок 1 – Продукт синтеза первой серии экспериментов

Во второй серии экспериментов после анализа продуктов синтеза было изменено содержание алюминия и марганца из-за несоответствия образцов заданным прочностным характеристикам прототипа. После ряда проведенных экспериментов с варьированием состава шихты получен сплав, в котором сочетание механических свойств было оптимальным. Давление воздуха в реакторе не менялось и составляло 6 атмосфер.

Таблица 3 – Количественные характеристики процесса синтеза второй серии экспериментов

№	Масса засыпки, гр	Масса продукта, гр	H засыпки, мм	D пробирки, мм	Р, Па с последующим возрастанием		Al, гр	MnO ₃ , гр
					До	После		
1	24,9	17,5	65	19	6	13	10	32,2
2	21,8	9,7	55	19	6	12	+4,5 гр Al к предыдущей шихте	
3	21,7	6,7	90	15	6	12	16	32,2
4	24	5,8	90	15	6	13	16	32,2
5	22	7,5	90	15	6	10	8,8	13
6	23	7,1	80	15	6	10	10	13
7	26,5	11,3	100	15	6	11	21	32,2
8	26,5	9	100	15	6	11	21	32,2
9	26,5	8,4	100	15	6	14	21	32,2

Высокая прочность и твердость при достаточной вязкости и низкой пористости получена для сплава с процентным соотношением исходных компонентов Al и MnO_3 соответственно 40 и 60 мас. % (рис. 2).



Рисунок 2 – Синтезированный продукт второй серии

Результаты эксперимента

Полученные образцы были исследованы методом Дебая-Шеррера (метод порошка) на дифрактометре рентгеновском «ARL X'TRA» на медном излучении (Cu K) с шагом 0.05° и временем экспозиции 2 сек. Микроструктура образцов изучалась с применением металлографического анализа на микроскопе Axiovert-200 MAT с системой ProGres и с применением программы обработки изображений «ВидеоТест-Структура-5», а также на растровом электронном микроскопе EVO 50XVP (CarlZeiss) с системой INCA x-act (OxfordInstruments) с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа.

На рисунке 3 изображена дифрактограмма синтезированных образцов на основе Al-MnO₃, которые синтезировались в экспериментальной установке при давлении воздуха 3 и 6 атмосфер (образцы № 7 и № 9 соответственно). Результаты ее расшифровки показали присутствие интерметаллидов Al_8Mn_5 , $\text{Al}_{11}\text{Mn}_4$ и Al_6Mn . По данным РФА, основной фазой является Al_8Mn_5 .

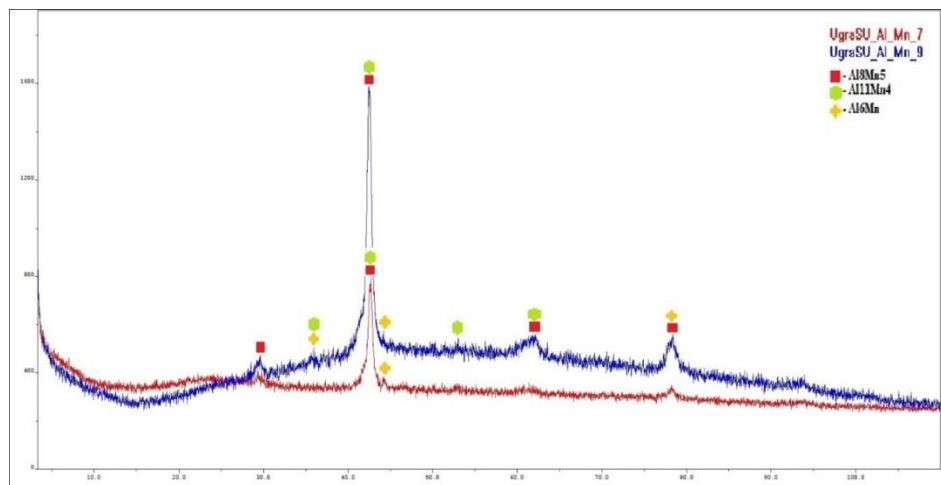


Рисунок 3 – Рентгенограммы конечных продуктов

Поверхность образца № 7 имеет многофазную структуру, состоящую из серых зерен основной фазы Al_8Mn_5 и интерметаллида Al_6Mn . Предположительно формирование многофазной структуры в светлой области образца обусловлено высоким содержанием алюминия. Темные области имеют игольчатую структуру, что говорит о резком падении температуры после формирования необходимой фазы (рис. 4). Данные области имеют повышенное содержание марганца, что подтверждается данными микрорентгеноспектрального анализа. Можно предположить, что в данной области происходит формирование фаз Al_8Mn_5 и $\text{Al}_{11}\text{Mn}_4$.

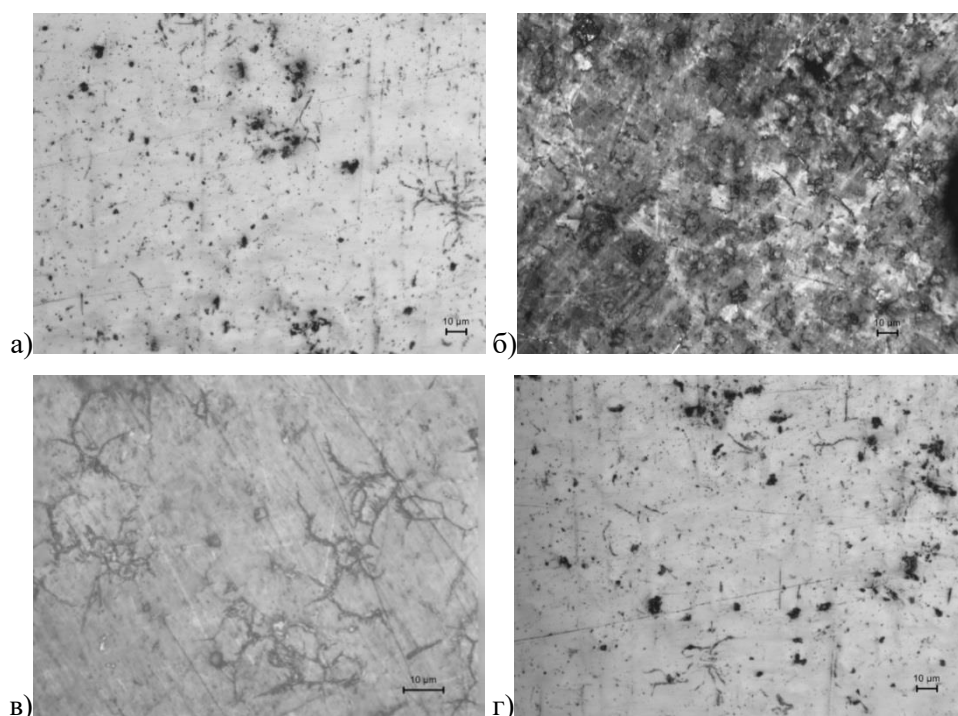


Рисунок 4 – Микроструктура образцов, синтезированных при давлении 3 атмосферы

Поверхность образца № 9 также имеет многофазную структуру основной фазы Al_8Mn_5 , но с четко выраженными границами зерен. Серые области имеют повышенное содержание алюминия, что также говорит о характерном формировании фазы Al_6Mn . Темная область имеет игольчатую структуру и преобладает марганцем, что благоприятствует формированию фазы $Al_{11}Mn_4$ (рис. 5). Результаты подтверждаются данными рентгенофазового и микрорентгеноспектрального анализов.

Микротвердость серой области составила 624 HV, темной области – 672 HV, а игольчатой структуры – 934 HV, что говорит о высокой твердости полученных образцов.

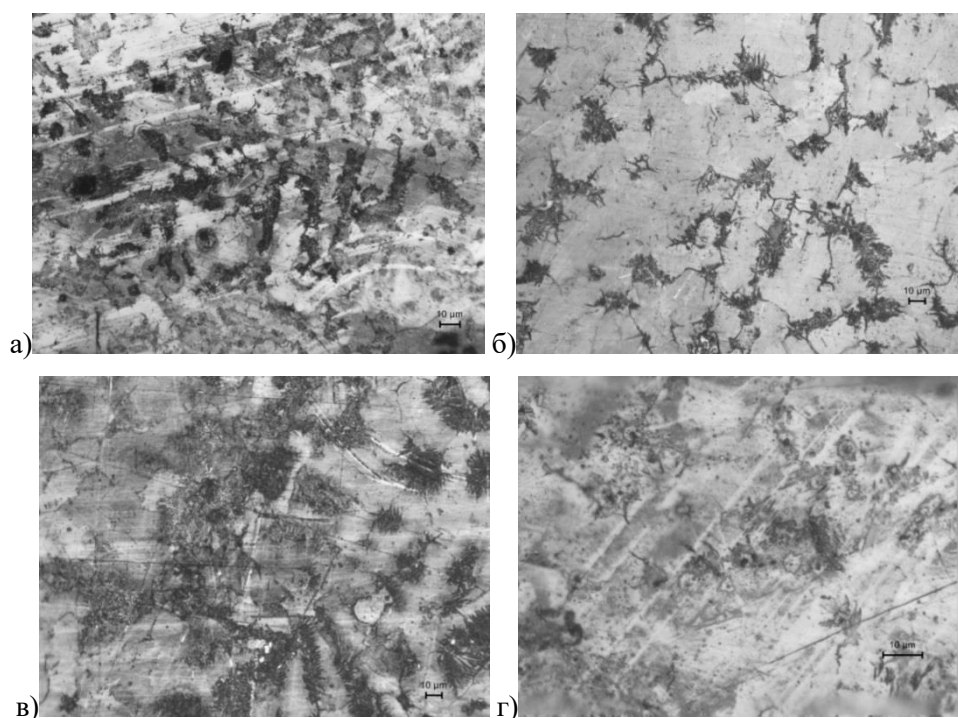
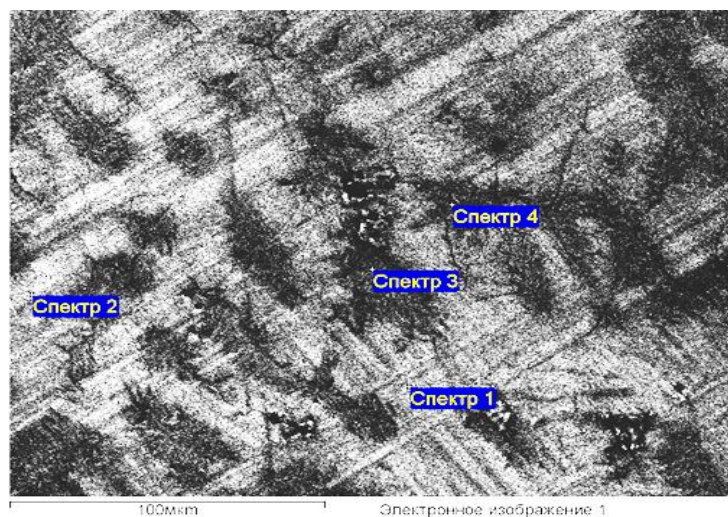


Рисунок 5 – Микроструктура образцов, синтезированных при давлении 6 атмосфер



Элемент	Спектр 1	Спектр 2	Спектр 3	Спектр 4
	Атомный %	Атомный %	Атомный %	Атомный %
Al K	43.53	44.63	40.65	39.55
Mn K	56.47	55.37	59.35	60.45
Итоги	100.00	100.00	100.00	100.00

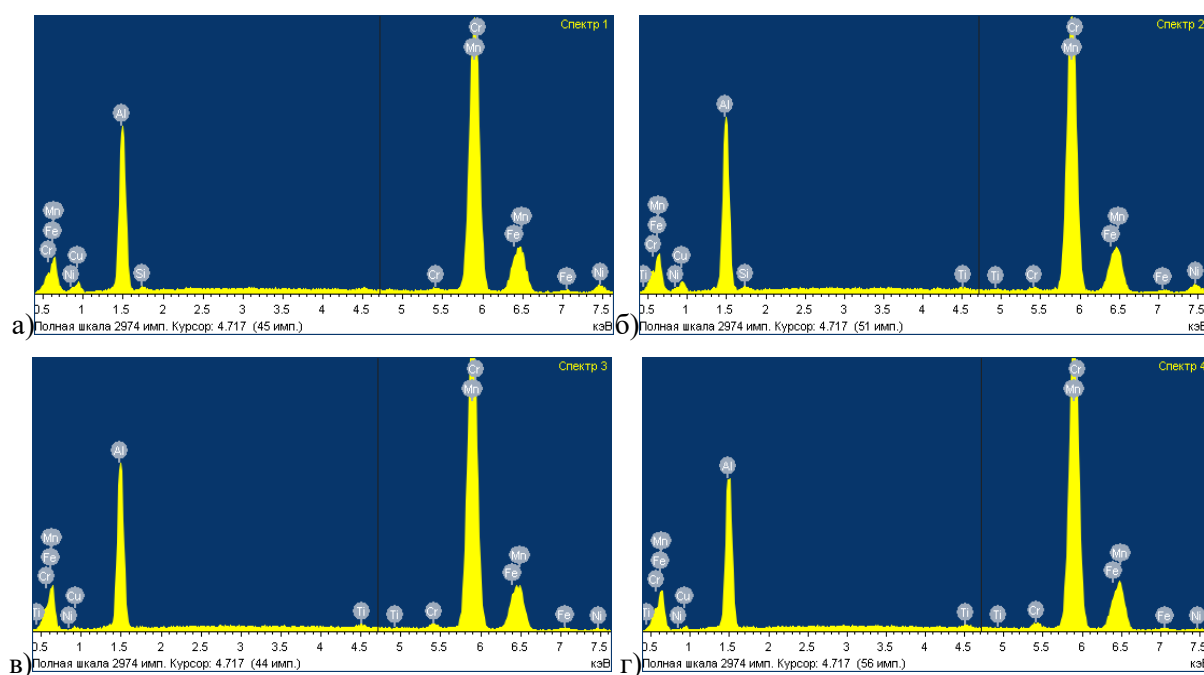
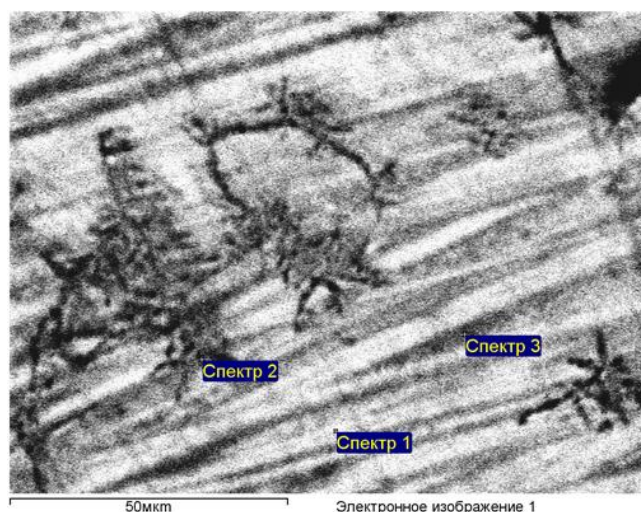


Рисунок 6 – Микроструктура и спектрограммы химического состава (атом. %) для образцов, синтезированных при давлении 6 атмосфер

Элементный анализ на рисунке 6 показал, что в темных областях наблюдается содержание алюминия и высокая доля марганца. Можно предположить, что там сформировался интерметаллид $\text{Al}_{11}\text{Mn}_4$. Серые участки структуры материала характеризуются высокой долей алюминия, из чего можно предположить, что в зоне сформировалась многофазная структура из интерметаллидов Al_6Mn и Al_8Mn_5 .



Элемент	Спектр 1	Спектр 2	Спектр 3
	Атомный %	Атомный %	Атомный %
Al K	44.58	42.30	43.17
Mn K	55.42	57.70	56.83
Итоги	100.00	100.00	100.00

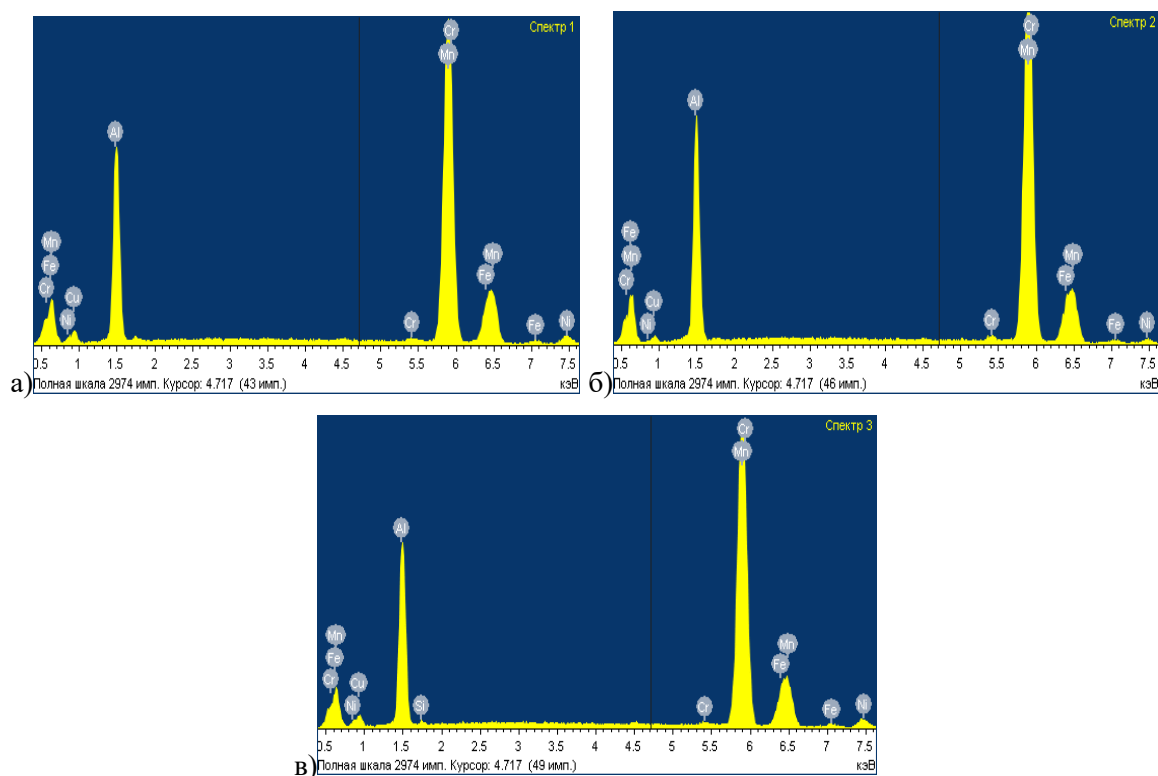


Рисунок 7 – Микроструктура спектрограммы химического состава (атом. %) для зоны 2 целевого продукта

Элементный анализ на рисунке 7 также показал, что в темных областях наблюдается наличие алюминия и высокое содержание марганца. Как и для образца 7, так и для образца 9 можно предположить, что в темных областях идет формирование интерметаллида $Al_{11}Mn_4$. В серых участках структуры материала содержание алюминия выше, чем в образце 7, из чего можно предположить, что в них сформировалась многофазная структура и интерметаллид Al_6Mn .

Элементный анализ на рисунках 6-7 подтверждает данные рентгенофазового анализа.

Для проверки и дальнейшего сравнения прочностных характеристик полученного сплава образцы были испытаны на сжатие. Испытание проводилось на машине 1794У-5 со скоро-

стью 1 мм/мин. Размеры образца 10x10x15 мм. Во время всей проверки фиксировались данные подаваемой нагрузки на образец и перемещения образца вдоль оси, по которой подавалась нагрузка.

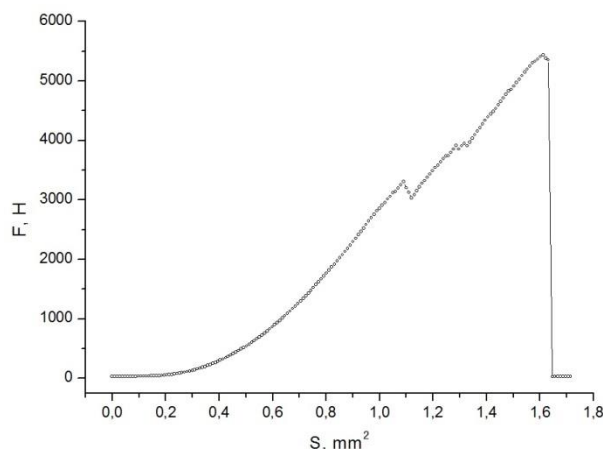


Рисунок 8 – Кривая сжатия синтезированного образца сплава

Из графика следует, что образец выдержал 5350 Н/мм² и деформировался на 1,6 мм. Так как справочные данные сплава 3003 не предоставляют сведения на сжатие, поэтому сравнение будет проводиться с твердыми сплавами WC-Co и WC-TiC-Co, предел прочности на сжатие которых равен 4000...6000 Н/мм². Это говорит о том, что синтезированный сплав является прямым конкурентом твердым сплавам. Измерения микротвердости синтезированного сплава составили 672 HV, а микротвердость сплава 3003, по справочным данным, равна 173 HV. Это свидетельствует о том, что синтезированный сплав является наиболее твердым.

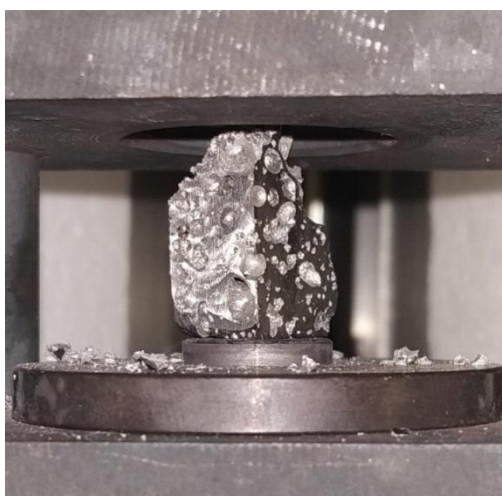


Рисунок 9 – Образец после испытания на сжатие

Таблица 4 – Сравнение механических свойств сплавов

Наименование сплава	Предел прочности при растяжении	Предел прочности при сжатии	Удлинение А	Твердость	
	ГПа	Н/мм ²	%	НВ	НV
Сплав 3003	0,2	---	4-10	165	173
Синтезированный сплав	---	5350	2	564	672
Сплавы WC-Co и WC-TiC-Co	710	От 4000 до 6000	3	688	---
Сплав АМц	0,09-0,135	---	12-20	50	53

Прочностные характеристики образца можно улучшить, если уменьшить пористость, но для этого необходимо увеличивать давление во время синтеза, что конструкция реактора не позволила сделать.

Выводы

1. Обнаружено, что образцы алюмо-марганцевого сплава, полученные в реакторе типа замкнутой адиабатической бомбы давления, обладают более высокой прочностью при прохождении СВ-синтеза в режиме повышенного давления.
2. Методом рентгенофазового анализа установлено, что в синтезированных образцах основной фазой является интерметаллид Al_8Mn_5 , а также отмечается присутствие интерметаллидов с другой стехиометрией Al_8Mn_5 , $Al_{11}Mn_4$ и Al_6Mn .
3. Высокие показатели прочности на сжатие и высокая твердость структурных составляющих служат подтверждением того, что синтезированный сплав является прямым конкурентом твердым сплавам.

Литература

1. Obtaining Radiation-resistant Material by SHS Method / M. Kozhanova, A. Kozhanov, I. Golubenko[et al.] // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 521. – P. 012005.
2. Correction factor in temperature measurements by optoelectronic systems / N. Bikberdina, R. Yunusov, M. Boronenko, P. Gulyaev // Journal of Physics : Conference Series. – 2017. – Vol. 917. – P. 052031.
3. Borodina, K. Thermal analysis of reaction producing $KXTiO_2$ / K. Borodina, S. Sorokina, N. Blinova. – DOI: 10.1007/s10973-017-6840-0 // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2018. – Vol. 131, № 1. – P. 561-566.
4. Чеклов, С. А. Тепловизионный метод контроля фазообразования в процессе СВ-синтеза / С. А. Чеклов, Д. О. Боброва, П. Ю. Гуляев // Электронные средства и системы управления. – 2017. – № 1/2. – С. 123-125.
5. Control of dispersed-phase temperature in plasma flows by the spectral-brightness pyrometry method / A. V. Dolmatov, I. P. Gulyaev, P. Yu. Gulyaev, V. I. Jordan. – DOI: 10.1088/1757-899X/110/1/012058 // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 110, № 1. – P. 012058.
6. Моделирование фрактальных структур упаковок порошковых СВС-материалов / И. В. Милюкова, А. Л. Трифонов, С. А. Ширяев, П. Ю. Гуляев. – Текст : непосредственный // Ползуновский альманах. – 2007. – № 3. – С. 39–41.
7. Оценка времени фазообразования в системе горения $NiAl$ методом визуализации тепловых полей / М. П. Бороненко, А. Е. Серегин, П. Ю. Гуляев, И. В. Милюкова. – Текст : непосредственный // Научная визуализация. – 2015. – Т. 7, № 5. – С. 102–108.
8. Dolmatov, A. V. Investigation of structure formation in thin films by means of optical pyrometry / A. V. Dolmatov, I. V. Milyukova, P. Y. Gulyaev. – DOI: 10.1088/1742-6596/1281/1/012010 // Journal of Physics : Conference Series. – 2019. – Vol. 1281. – P. 012010.
9. Григорьевская, А. А. Компьютерная визуализация радиационного теплопереноса в волне горения СВС / А. А. Григорьевская, П. Ю. Гуляев. – Текст: непосредственный // Ползуновский альманах. – 2019. – № 4. – С. 5–9.
10. Cui, H. Z. Influence of micropores on structural instability of the combustion wave / H. Z. Cui, A. A. Grigoryevskaya, P. Yu. Gulyaev // Вестник Югорского государственного университета. – 2019. – № 4 (55). – С. 33–40.
11. Вычислительная методика расчета признаков спиновой неустойчивости СВС / А. А. Григорьевская, П. Ю. Гуляев, В. И. Иордан, И. А. Шмаков. – Текст : непосредственный // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. – 2019. – Т. 3, № 2. – С. 82–91.

К. Ю. Шахназаров

**ЭКСТРЕМУМЫ НА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЯХ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗА
КАК СЛЕДСТВИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В НЕМ ПРИ ~ 650 °С**

В представленной работе на основании экстремумов на кривых: усилия сопротивления осадки, параметров тонкой структуры, металлографической структуры в зависимости от температуры, а также многочисленных литературных данных по аномалиям физико-механических свойств железа и сталей декларируется превращение при ~ 650 °С. Исследование проводили на образцах из практически чистого железа (0,008 % С). Эксперимент (металлографическое исследование, рентгеноструктурный анализ, сопротивление осадке (установка Gleeble-3800) проводили через каждые 20 °С.

Ключевые слова: железо, сталь, перлит, закалка, отпуск, полиморфизм, пластичность, твердость, ударная вязкость.

K.Yu. Shakhnazarov

**EXTREMUMS AT TEMPERATURE DEPENDENCIES
PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF IRON, AS A RESULT
OF TRANSFORMATION IN IT AT ~ 650°C**

In the presented work on the basis of extrema on curves: efforts of resistance of draft, parameters of thin structure, metalgraphic structure depending on temperature and also numerous literary data on anomalies of physicomachanical properties of iron and staly transformation is declared at ~ 650 °C. The research was conducted on samples from almost pure iron (0,008% C). An experiment (the metalgraphic research, the X-ray diffraction analysis, resistance to draft (Gleeble-3800) carried out through each 20 °C.

Key words: iron, steel, perlite, training, annealing, polymorphism, plasticity, hardness, impact elasticity.

Введение

Большинство углеродистых и низколегированных сталей имеют структуру продуктов перлитного превращения или высокого отпуска (после закалки).

Максимальная пластичность или ударная вязкость достигаются, когда температуры перлитного превращения t_D или высокого отпуска t_O равны ~ 650 °С. Это аномально, так как в обоих случаях снижению прочностных свойств или твердости соответствует уменьшение пластичности или вязкости, то есть охрупчивание [1–6].

Охрупчивание при $t_O > 650$ °С описано в 1915 г.: «Наиболее благоприятным в смысле получения хорошего сжатия при разрыве... оказался отпуск при 650 °С» [7]. Но по поводу природы охрупчивания имеются взаимоисключающие суждения: огрубление карбидов по границам зерен [2] или «увеличение размеров кристалликов α -железа» [3]. Наиболее взвешенная позиция, на наш взгляд, у А. П. Гуляева, показавшего зависимость ψ до $t_O \sim 680$ °С с максимумом при $t_O \sim 640$ °С, а монотонные зависимости σ_B , $\sigma_{0,2}$, НВ и δ до $t_O \sim 640$ °С [4]. Можно предполагать, что подход А. П. Гуляева обусловлен отсутствием версии природы охрупчивания при понижении твердости и прочности.

Охрупчивание при $t_{\text{П}} > 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ в работах [2] и [7] не комментируется, а Э. Гудремон сводит его к дисперсности карбидов [1]. Это вызывает возражение, так как «оценка свойств стали преимущественно при помощи какой-либо одной из структурных составляющих стали не является достаточной» [8]. «Значение свойств ферритной составляющей, помимо дисперсности карбидной фазы... подчеркивается в работах С. С. Штейнберга» [8].

Цель работы – исследование физико-механических свойств железа при $\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, что, возможно, предопределяет аномалии на температурных зависимостях его производного железа – сталей.

Методика

Эксперимент проводили на образцах из железа, содержащего 0,008 % С, и сталях с различным содержанием углерода. Исследование микроструктуры (оптический микроскоп «Zeiss», растровый электронный микроскоп (JSM-7001F), рентгеноструктурный анализ, сопротивление осадке (установка Gleeble-3800), твердость и микротвердость проводили через каждые 20–40 $^{\circ}\text{C}$.

Результаты исследований

Несмотря на то, что Сорби описал перлит в 1886 г., «реалистической теории» [5] перлитного превращения «нет» [5].

Важнее другое: нет данных по значениям твердости (HRC) после изотермического перлитного превращения эвтектоидной стали в интервале $\sim 620\text{--}670\text{ }^{\circ}\text{C}$ как в «классической работе Гензамера» [7], так и в работе [5], хотя значения $\sigma_{0,2}$, $\sigma_{\text{В}}$, σ_{-1} , ψ (но не δ) для этого интервала приведены. Это странно, т. к. HRC определяется гораздо проще. Можно предположить, что значения твердости определены, но опущены, т. к. не устраивали Гензамера с соавторами.

Нами исследовано влияние изотермического отжига в диапазоне температур 580–680 $^{\circ}\text{C}$ (рис. 1) на твердость и микротвердость углеродистых (У8 и 45) [9] сталей и чистого железа (0,008 % С). После нагрева до 820 $^{\circ}\text{C}$ 1 ч образцы переносили в другую печь и выдерживали 24 ч при 580–680 $^{\circ}\text{C}$, а затем охлаждали в печи. Сравнение вели с образцами, которые непрерывно охлаждали в коробке с песком в печи от 850 до 630 $^{\circ}\text{C}$, а затем на воздухе в той же коробке.

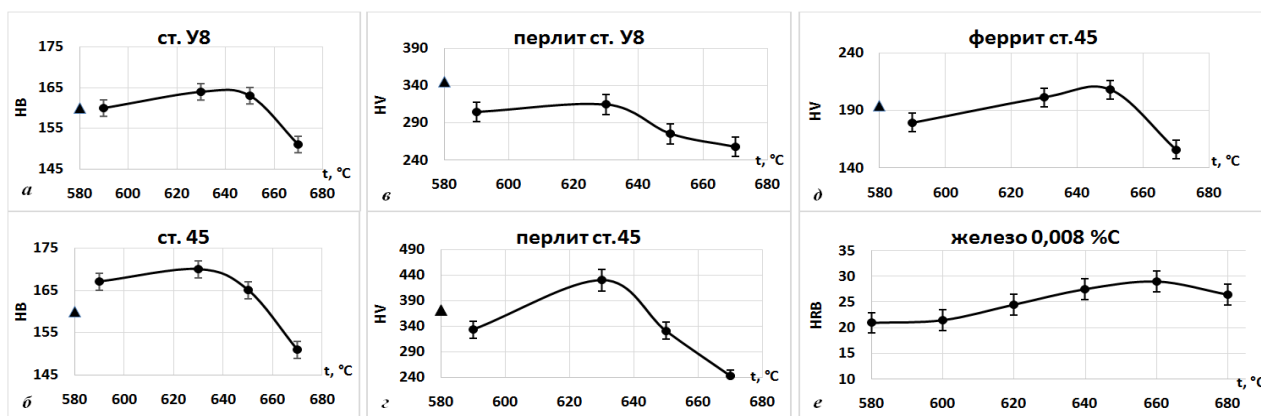


Рисунок 1 – Зависимость от температуры изотермической выдержки (24 ч) твердости (HB) стали У8 (а), стали 45 (б); микротвердости (HV) перлита стали У8 (в); микротвердости перлита и феррита стали 45 (г, д); твердости (HRB) железа (0,008 % С) (е) (▲ – твердость после непрерывного охлаждения)

Максимальную твердость и микротвердость структурных составляющих (феррита и перлита) обеспечивают ступени при 630 или 650 $^{\circ}\text{C}$. Повышение температуры изотермической выдержки до 660 $^{\circ}\text{C}$ почти в полтора раза увеличивает твердость железа (0,008 % С). Это нонсенс, который требует хоть какого-то объяснения. Им может быть превращение в железе при $\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ – основе сталей.

Проведение металлографического исследования после нагрева на 850 °С и изотермической выдержке (2 ч) от 580 до 680 °С через каждые 20° (рис. 2 *а, б, в*) шлифов железа (0,008 % С) показало, что после выдержки при 640 °С травимость (в 4 % HNO_3 в спирте) разных соседних зерен резко различна (рис. 2*б*), в отличие от выдержек при других температурах (рис. 2 *а, в*). Контрастная травимость может быть следствием геометрического совершенствования кристаллографических плоскостей относительно плоскости шлифа. Совершенствование может быть вызвано движением атомов во время максимального магнитострикционного изменения объема при ~ 650 °С [10], т. е. превращением.

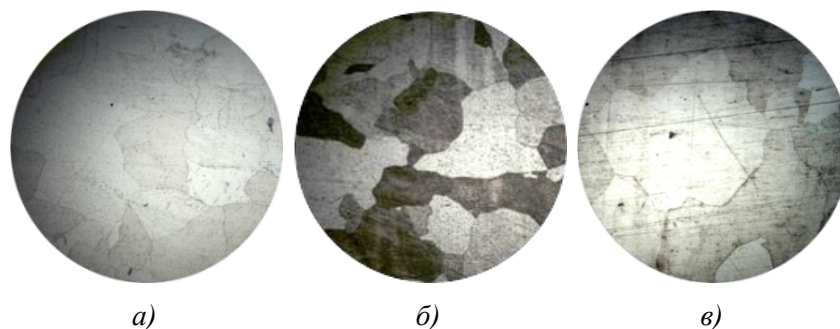


Рисунок 2 – Микроструктура чистого железа после нагрева на 850 °С и изотермической выдержки при 620 (*а*), 640 (*б*) и 660 °С (*в*), $\times 200$

Наряду с контрастной травимостью изотермическая выдержка при 640 °С приводит к измельчению зерна по сравнению с выдержками при 580 и 680 °С. Измельчение зерна отчетливо фиксируется как в оптическом (рис. 3 *а, б, в*), так и в электронном микроскопе (рис. 3 *г, д, е, ж, з, и*).

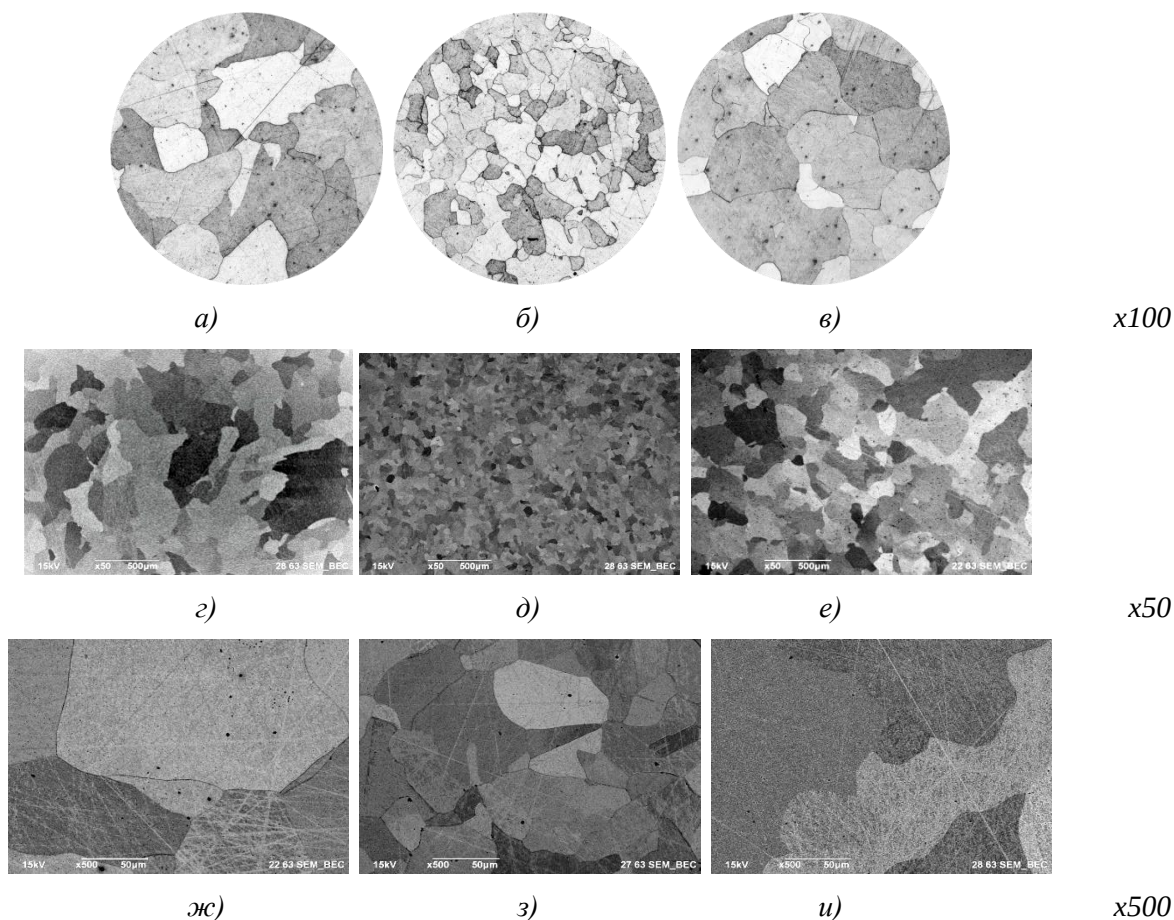


Рисунок 3 – Микроструктура чистого железа после нагрева на 850 °С и изотермической выдержки (2 ч) при 580 (*а, г, ж*), 640 (*б, д, з*) и 680 °С (*в, е, и*)

Измельчение зерна при изотермической выдержке при 640 °C свидетельствует о прохождении рекристаллизационных процессов в железе. «Для рекристаллизации необходим обмен атомов местами» [1]. Полагаем, причиной «обмена атомами» может быть предполагаемое превращение.

Нами проведено рентгеновское исследование характеристик тонкой структуры (параметр решетки, ширина линий (110) и (220) железа с 0,008 % C, подвергнутого отпуску (нагреву) от 500 до 900 °C через каждые 20°. Исследование проводили по двум сериям эксперимента, на каждом образце трижды снимали показания. По усредненным по шести замерам данным построены кривые для параметра решетки, ширины линий (110) и (220). На кривых видны острые минимумы при ~ 650 °C (рис. 4 а, б, в). Их нельзя обнаружить при большем шаге эксперимента. Экстремумы свидетельствуют о значительных изменениях в атомном строении железа.

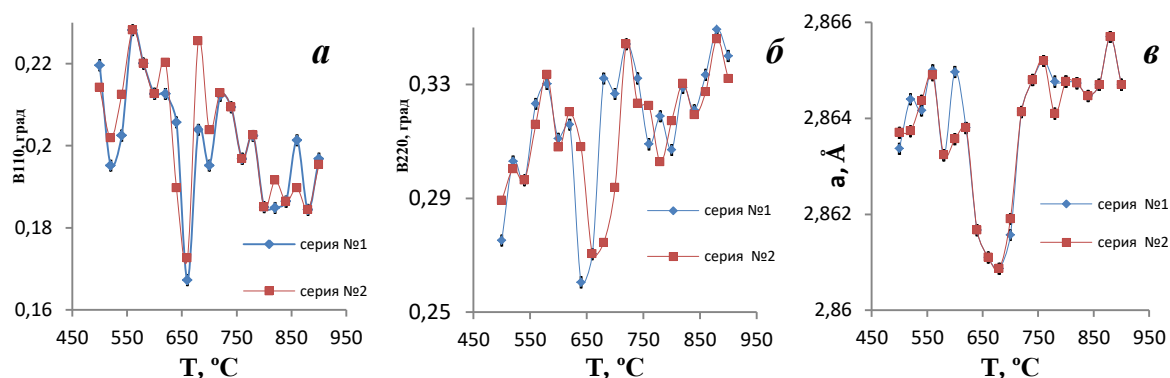


Рисунок 4 – Зависимость усредненного по трем точкам уширения дифракционных максимумов линии 110 (B_{110}) (а), 220 (B_{220}) (б), параметра решетки (в) от температуры отпуска чистого железа. Серия эксперимента № 1 и № 2

Проведение металлографического исследования шлифов железа (0,008 % C) (рис. 5 а, б, в) после закалки от 1050 °C (вода) и отпуска в интервале 580–680 °C (через 20°) показало, что после отпуска при 640 °C (рис. 5б) наблюдается максимальная травимость границ зерен (выдержка для всех образцов в 4 % HNO_3 в спирте составляла 20 сек). Изменение травимости границ зерен объясняют «как относительным обогащением, так и относительным обеднением приграничных зон зерен какими-то элементами» [11]. Для «обогащения или обеднения» необходимо изменение скорости диффузии. Такое ускорение возможно при превращениях, например, вблизи точки Кюри железа.

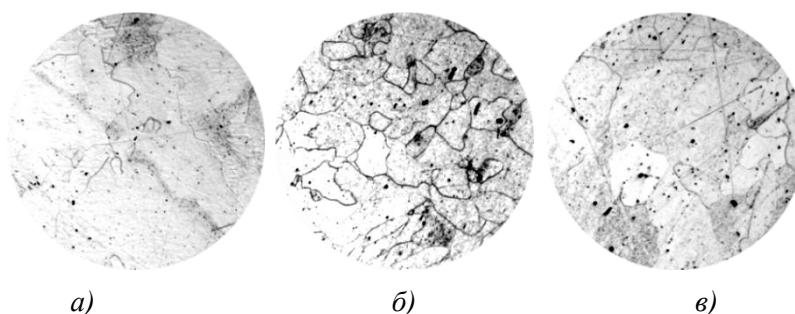


Рисунок 5 – Микроструктура чистого железа после закалки от 1050 °C (вода) и отпуска (2 ч) при 600 (а), 640 (б), 680 °C (в), x100

Горячая осадка (540–740 °C) на половину высоты образцов $\varnothing 10 \times 15$ из железа с 0,008 % C проводилась на установке Gleeble-3800, испытания проводили через каждые 20°. При 640 °C (рис. 6) кривая имеет отчетливый изгиб, повторяя кривую «горячей» твердости М. Г. Лозинского [12], что свидетельствует о качественном изменении сопротивления деформации.

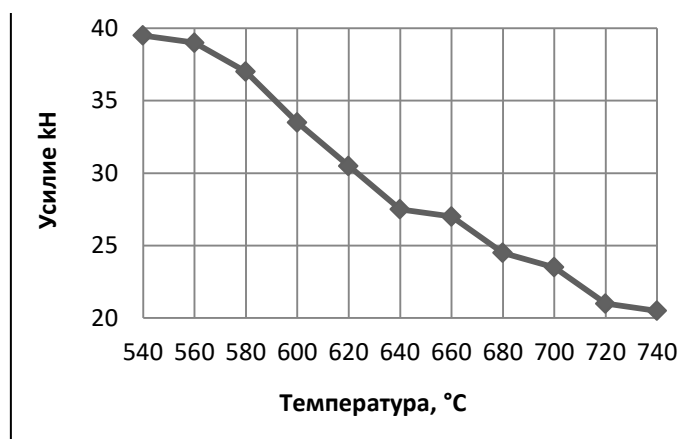


Рисунок 6 – Зависимость усилия при деформации на половину высоты образца железа (0,008 % С) при температуре от 540 до 740 °С

Перегибы на кривых твердости характерны не только для железа, но и для других полиморфных металлов (кобальта, кальция, стронция и лантана), что позволяет, пользуясь методом аналогий, предполагать превращение в железе приблизительно при 650 °С.

Заключение

Экстремальные значения на кривых зависимости физико-механических свойств железа и сталей от температуры при ~ 650 °С могут быть следствием превращения в железе, что, вероятно, определяет аномалии механического поведения и сталей.

Список литературы

1. Гудремон, Э. Специальные стали : в 2-х т. Т. 1 / Э. Гудремон. – Москва : Металлургиздат, 1959. – 952 с. – Текст : непосредственный.
2. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков. – 3-е издание. – Москва : Металлургия, 1978. – 392 с. – Текст : непосредственный.
3. Мороз, Л. С. Тонкая структура и прочность стали / Л. С. Мороз. – Москва : Металлургиздат, 1957. – 160 с. – Текст : непосредственный.
4. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. – 5-е издание. – Москва : Металлургия, 1986. – 544 с. – Текст : непосредственный.
5. Перлит в углеродистых сталях / В. М. Счастливцев [и др.]. – Екатеринбург, УРО РАН, 2006. – 311 с. – ISBN 5-7691-1713-3. – Текст : непосредственный.
6. Shakhnazarov, K. Yu. Relation between anomalies of ferrum physical properties at ~ 650°C with possible transformation in it / K. Yu. Shakhnazarov, E. I. Pryakhin // CIS Iron and Steel Review. – 2017. – Vol. 13. – P. 24–27.
7. Беляев, Н. И. О пределе упругости стали / Н. И. Беляев, Н. Т. Гудцов. – Текст : непосредственный // Журнал Русского Металлургического общества. – 1914. – Ч. 1, № 3. – С. 332–414.
8. Бокштейн, С. З. Структура и механические свойства легированной стали / С. З. Бокштейн. – Москва : Металлургиздат, 1954. – 280 с. – Текст : непосредственный.
9. Сергеев, Ю. Г. Экстремальные значения твердости и микротвердости фаз после изотермического превращения аустенита при 630–650° С сталей 45 и У8 / Ю. Г. Сергеев, О. В. Курочкина, К. Ю. Шахназаров. – Текст : непосредственный // Сборник трудов XIV международной научно-технической конференции «Проблема ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций». – Санкт-Петербург : СПбГУНиПТ, 2008. – С. 105–107.
10. Бозорт, Р. Ферромагнетизм / Р. Бозорт. – Москва : Издательство иностранной литературы, 1956. – 784 с. – Текст : непосредственный.
11. Утевский, Л. М. Отпуская хрупкость стали / Л. М. Утевский. – Москва : Металлургиздат. – 1961. – 192 с. – Текст : непосредственный.
12. Лозинский, М. Г. Высокотемпературная металлография / М. Г. Лозинский. – Москва : Машгиз, 1956. – 312 с. – Текст : непосредственный.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
РФФИ (гранты № 18-41-220004, № 18-08-01475).*

В. И. Иордан, И. А. Шмаков

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МИКРОКИНЕТИКИ СВС В АТОМНОЙ СТРУКТУРЕ С ШАХМАТНОПОДОБНЫМ
РАСПОЛОЖЕНИЕМ НАНОРАЗМЕРНЫХ БЛОКОВ ИЗ АТОМОВ NI И AL**

В статье приведены результаты компьютерного имитационного моделирования процесса распространения волны горения «самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС)» в атомной слоистой структуре. В каждом слое структуры чередуются наноразмерные блоки двух типов: блок первого типа составлен в виде пакета элементарных ячеек атомов Ni, а блок второго типа – в виде пакета элементарных ячеек атомов Al. В каждой паре соседних граничащих между собой слоев последовательности чередующихся между собой блоков двух типов сдвинуты относительно друг друга на один блок, поэтому полная слоистая структура слоев с чередующимися блоками в них ассоциируется с паттерном (рисунком) «шахматной доски». Компьютерное моделирование СВС в такой структуре производилось с помощью программного пакета LAMMPS с учетом параллельных вычислений, использующего в своей основе метод «молекулярной динамики» и потенциал межатомного взаимодействия в модели «погруженного атома» (англ. EAM). В дополнение к пакету LAMMPS авторами были реализованы программные процедуры расчета температурных профилей и профилей плотности вещества вдоль направления движения фронта волны горения СВС, позволившие осуществить температурный анализ микрокинетики СВС (оценить скорость движения фронта волны горения) и распознавание интерметаллических фаз в реакционном объеме системы Ni-Al при использовании пакета OVITO.

Ключевые слова: СВ-синтез, метод молекулярной динамики, элементарная кристаллическая ячейка, температурный профиль, профиль плотности, параллельные вычисления, пакеты LAMMPS и OVITO.

V. I. Jordan, I. A. Shmakov

**COMPUTER MOLECULAR-DYNAMIC SIMULATION OF SHS MICROKINETICS
IN THE ATOMIC STRUCTURE WITH A CHECKERBOARD-LIKE ARRANGEMENT
OF NANOSCALE BLOCKS OF NI AND AL ATOMS**

The article presents the results of computer simulation of the propagation of the combustion wave of "self-propagating high-temperature synthesis (SHS)" process in an atomic layered structure. In each layer of the structure, nanosized blocks of two types alternate: a block of the first type is composed as a packet of unit cells of Ni atoms, and a block of the second type is composed of a packet of elementary cells of Al atoms. In each pair of layers adjacent to each other, sequences of alternating blocks of two types are shifted relative to each other by one block, so the full layered structure of the layers with alternating blocks in them is associated with a "chessboard" pattern. Computer simulation of SHS in such a structure was carried out using the LAMMPS software package taking into account parallel computations, which uses the molecular dynamics method and the interatomic interaction potential in the "embedded atom" model (EAM). In addition to the LAMMPS package, the authors implemented program procedures for calculating the temperature and density profiles of the substance along the motion direction of the SHS combustion wave front,

which made it possible to carry out temperature analysis of the SHS microkinetics (to estimate the velocity of the combustion wave front) and recognition of intermetallic phases in the reaction volume of the Ni-Al system when using the OVITO package.

Key words: SH-synthesis, molecular dynamics method, unit cell, temperature profile, density profile, parallel computing, LAMMPS and OVITO packages.

Введение

Одной из эффективных технологий получения современных функциональных материалов с «программируемыми» свойствами является технология, связанная с методом «самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС)». В прессованном образце в виде реагирующей смеси мелкодисперсных порошков под воздействием теплового импульса происходит экзотермическая реакция горения в тонком слое взаимодействующих реагентов. С течением времени волна горения самопроизвольно распространяется по образцу путем теплопередачи от слоя к слою. При этом образуются продукты СВС с разнообразием микро-, мезо- и макроструктур различного масштаба гетерогенности, зависящего от многих параметров: дисперсности реагентов, их стехиометрического начального соотношения, начальной температуры и пористости смеси, степени разбавления, тепловых потерь и других факторов. На устойчивость движения фронта волны горения влияет неоднородное случайное распределение исходных реагентов в структуре порошковой смеси. Микрогетерогенная структура волны горения (наличие в структуре «микроочагов» горения – «проблема дискретности» СВС) оказывает существенное влияние на поведение волны горения на макроскопическом уровне. Исследование кинетики горения и эволюции дискретного распада тепловой структуры волны СВС в локально неустойчивых режимах микрогетерогенного горения играет важную роль для оптимизации технологических режимов СВ-синтеза материалов с заданными функциональными и эксплуатационными свойствами и для разработки 3D-принтеров готовых изделий из металла и металлокерамики в области аддитивных технологий.

1. Методические аспекты молекулярно-динамического моделирования СВС

В методе молекулярно-динамического моделирования (МДМ) временная эволюция исследуемой атомной системы реализуется на основе дискретно-континуального подхода моделирования с использованием основ ньютоновской механики и функции потенциала межатомного взаимодействия в модели «погруженного атома» (англ. embedded atom model – ЕАМ), скорректированной в 2009 году [1]. Процесс эволюции моделируется интегрированием уравнений движения атомов на основе простого потенциального взаимодействия с постоянным временным шагом. Несмотря на детерминированный характер механики Ньютона, близость результатов моделирования к реальному поведению системы достигается добавлением распределения случайных начальных скоростей в соответствии с распределением Максвелла в модель хаотического термодинамического движения. Таким образом, можно получить данные о макроскопических характеристиках объекта. Преимущества молекулярно-динамического моделирования (МДМ) с использованием пакета LAMMPS и параллельных вычислений можно использовать для определения нано- и микроскопических структур материалов с целью поиска способов их синтеза.

В работе [2] приведены результаты вычислительных экспериментов (ВЭ) по молекулярно-динамическому моделированию (МДМ) режима микрогетерогенного горения в слоистой системе Ni-Al (рис. 1).

2. Анализ результатов моделирования СВС в системе с шахматноподобной структурой (ШПС) наноразмерных блоков из атомов Ni и Al

Анализируя набор температурных профилей (рис. 3), оценивая перемещение фронта волны горения и соответствующее ему время, получаем значение скорости движения волны горения в шахматноподобной структуре (рис. 2), приблизительно равное 48-50 м/с. В работе [2] для слоистой структуры, показанной на рисунке 1, получена оценка скорости, равная 25 м/с (практически в 2 раза меньшая). Практически 2-кратное превосходство в скорости движения волны горения можно объяснить более высоким значением удельной поверхности контакта атомов Ni и Al в шахматноподобной блочной структуре по сравнению с удельной поверхностью контакта, соответствующей слоистой структуре на рисунке 1. В реальных порошковых смесях с размерами частиц Ni и Al в диапазоне 10-50 мкм значение скорости горения оказывается в диапазоне приблизительно от 1 до 20 см/с (т. е. на 2-3 порядка меньше). В реальных порошковых смесях удельная поверхность контакта частиц Ni и Al соответственно также на 2-3 порядка меньше. Реальные эксперименты по СВС в тонких пленках (англ. *nanofolils* [4]) показывают высокие скорости горения (до нескольких м/с), подтверждая результаты МДМ для процесса СВС.

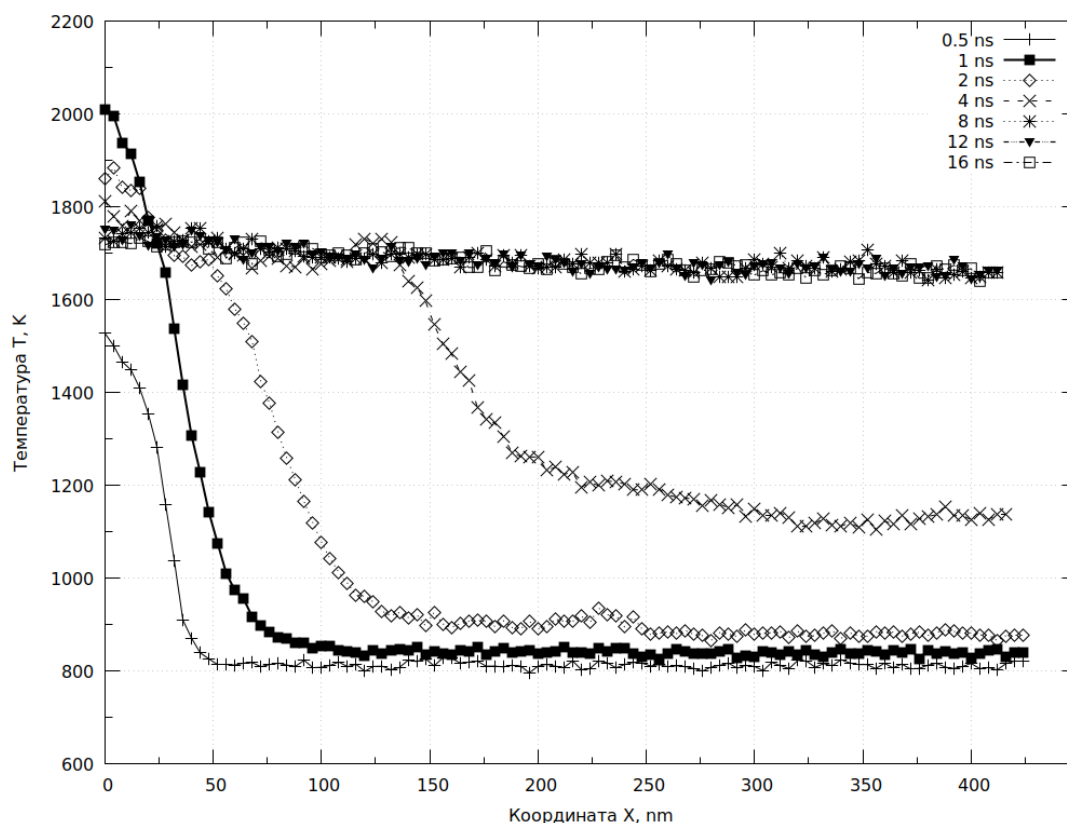


Рисунок 3 – Набор температурных профилей (зависимостей температуры от координаты X) для последовательных моментов времени в ШПС Ni-Al

Как видно из рисунка 3, в зонах шахматноподобной структуры Ni-Al после прохождения волны горения (к концу 16 нс) устанавливается температурное плато с малым снижением от значений 1700-1720 К в начале структуры до значений в диапазоне 1640-1670 К в конце структуры. Завершение процесса растворения твердой фазы Ni в жидком Al после 7 нс подтверждается рисунком 4, с помощью которого также подтверждается скорость волны горения в 50 м/с.

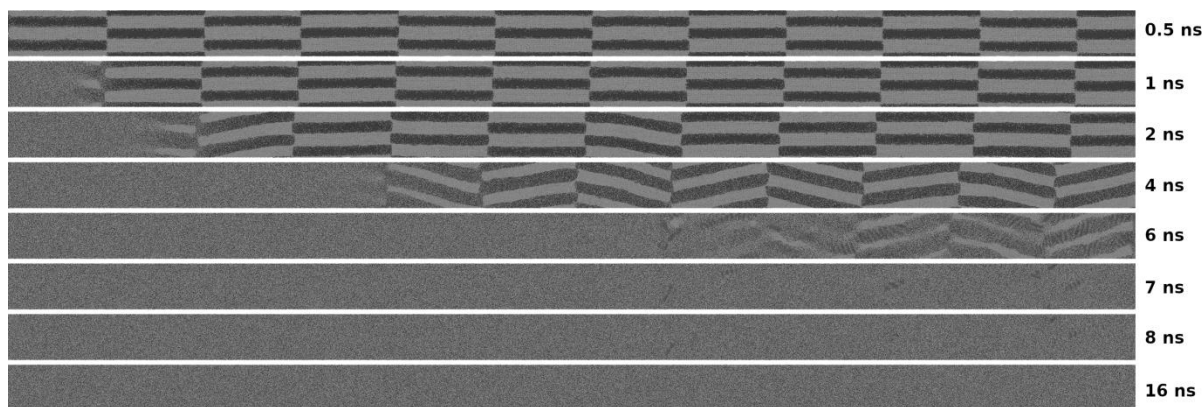


Рисунок 4 – Набор шлифов (снимков), визуализируемых с помощью пакета OVITO для последовательных моментов времени движения волны горения, отражающих эволюцию распределения атомов Ni (светло-серые точки) и Al (темно-серые точки) в вертикальном сечении ШПС Ni-Al

В соответствии с диаграммой равновесного состояния системы Ni-Al для заданного стехиометрического соотношения с концентрацией (ат. %) атомов Ni, равной $n=0.68574$ (68.574 %), и температуры горения порядка 1640-1720 К образуются две фазы [5; 6]: δ -фаза NiAl и ϵ -фаза Ni₃Al. Как уже отмечалось выше, к моменту времени 16 нс во второй половине ШПС температурное плато снижается к диапазону 1640-1670 К (рис. 3), в котором находится точка плавления ϵ -фазы Ni₃Al (температура плавления фазы Ni₃Al равна 1380-1385 °С, или 1653-1658 К), при распаде которой дополнительно образуется δ -фаза NiAl с ОЦК-структурой элементарной ячейки (англ. bcc). Фаза Ni₃Al имеет сверхструктуру ГЦК (англ. fcc). Рост количества структур типа bcc (ОЦК), соответствующих δ -фазе NiAl, подтверждается на рисунке 5.

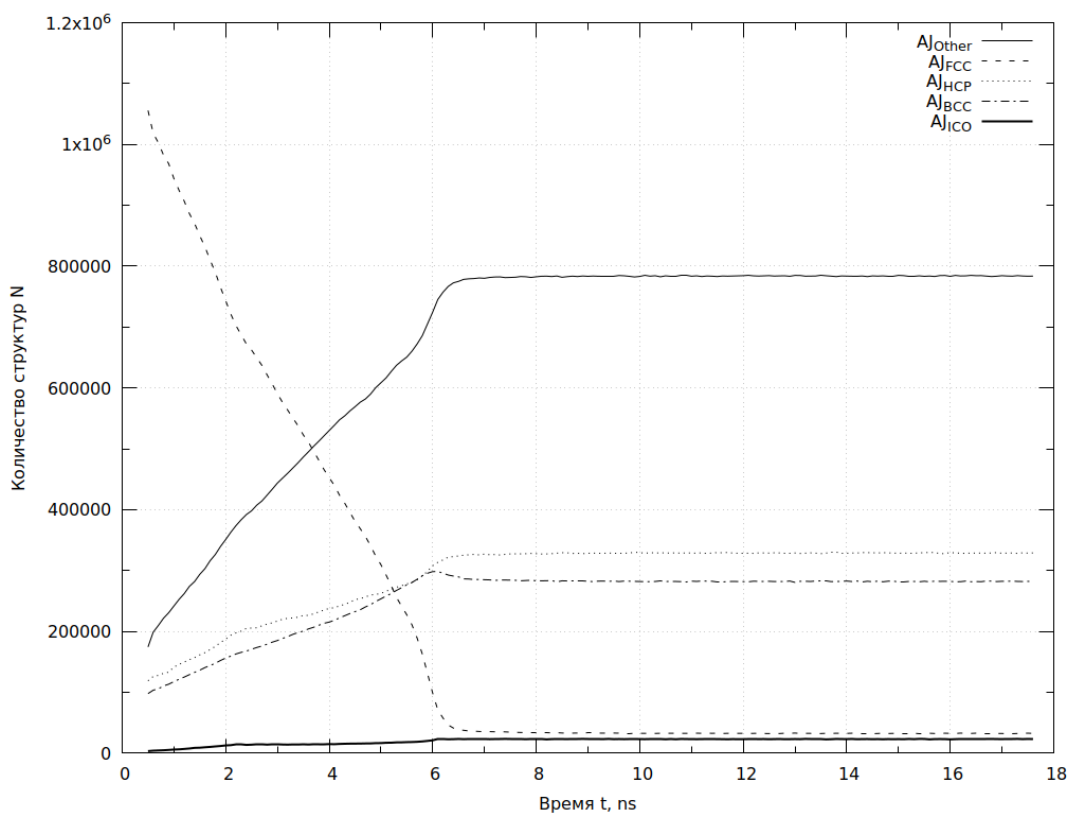


Рисунок 5 – Зависимости количеств структур различных типов в последовательные моменты времени в процессе движения волны горения в ШПС Ni-Al; типы структур, определяемые методом Ackland-Jones (модификатором AJ пакета OVITO, [7; 8]): fcc – ГЦК, bcc – ОЦК, hcp – ГПУ, ico – икосаэдр, other – другие)

Наноразмерные блоки из атомов Ni и Al в исходной ШПС (рис. 2) являются пакетами из элементарных кристаллических ячеек одного и того же типа fcc (ГЦК), которые по мере продвижения волны горения трансформируются в продукты реакции СВС в виде интерметаллических соединений (NiAl_3 , Ni_2Al_3 , NiAl , Ni_3Al и др.). Поэтому в промежутке первых 2 нс (на рисунке 5) наблюдается резкое снижение количества структур типа fcc (ГЦК), а затем «темп» резкого снижения структур типа fcc (ГЦК) немного замедляется, так как наряду с интенсивным ростом δ -фазы NiAl происходит и рост ε -фазы Ni_3Al , имеющий тип fcc (хотя и в меньшей степени, чем для фазы NiAl). Фаза Ni_3Al соответствует типу сверхструктуры ГЦК (fcc), поэтому модификатор AJ пакета OVITO не гарантирует абсолютно точное определение количества структур для фазы Ni_3Al (а также и других структур для других интерметаллидов). Возможно, некоторое количество структур фазы Ni_3Al программа OVITO относит к типу hcp (ГПУ) или к типу «other» (другой, иной).

На рисунке 6 приведены профили плотности вещества, рассчитанные с помощью разработанной авторами программы на основе усреднения значения плотности по малым объемам в последовательные моменты времени движения волны горения вдоль ШПС. Анализ профилей плотности вещества, отраженных на рисунке 6, является еще одним способом подтверждения схемы металлохимических реакций с образованием интерметаллических фаз, принятой многими авторами публикаций, в т. ч. и авторами публикации [5]:

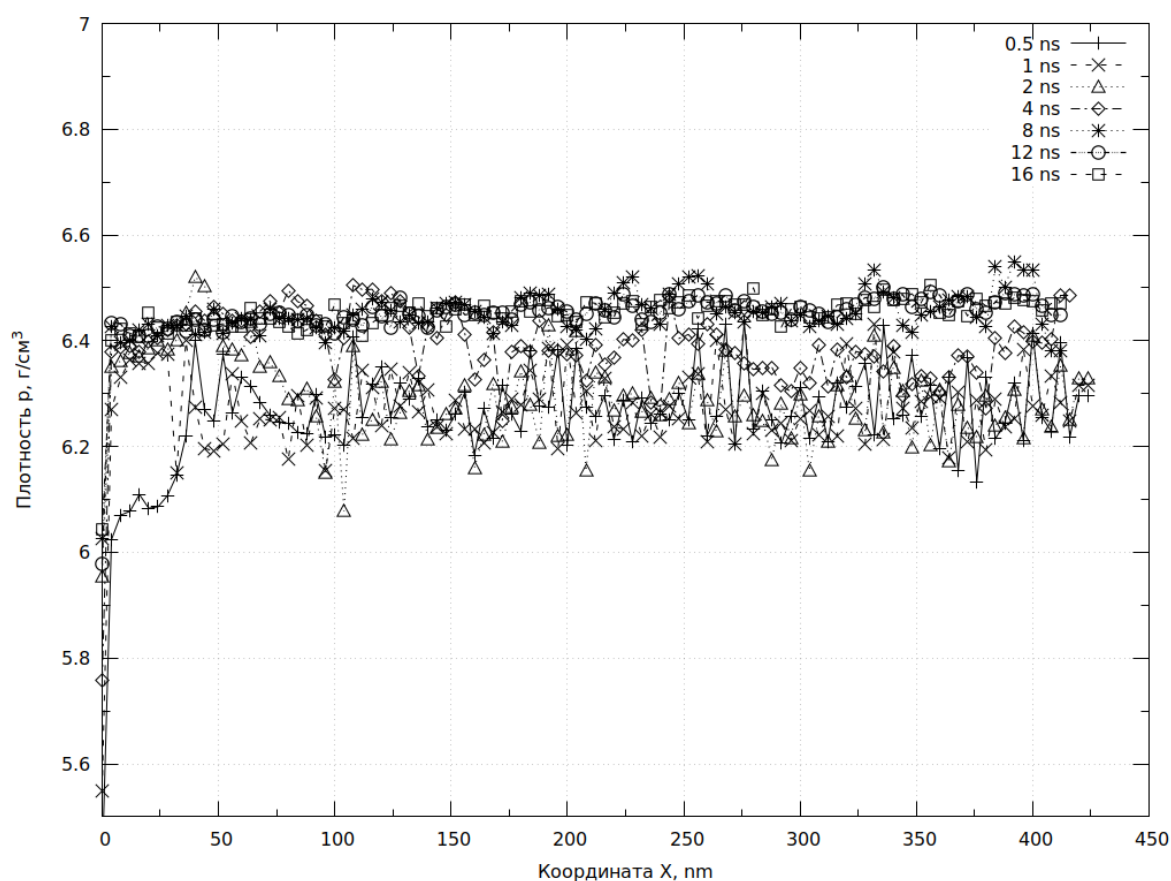
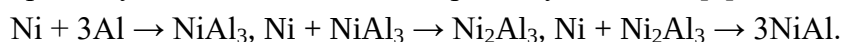


Рисунок 6 – Набор профилей плотности вещества в последовательные моменты времени в процессе движения волны горения в ШПС Ni-Al

Первая фаза NiAl_3 , образующаяся в приведенной цепочке реакций (при достижении температуры 854°C , или 1127 K), имеет наименьшую плотность 3.9 г/см^3 [9]. Вторая фаза Ni_2Al_3 , образующаяся во времени позднее первой фазы при повышении температуры горения с более высоким значением $1132\text{--}1133^\circ\text{C}$, или $1405\text{--}1406\text{ K}$, имеет плотность 4.76 г/см^3 [9]. Тре-

тая фаза NiAl, образующаяся во времени еще позднее при дальнейшем росте температуры горения, имеет более высокое значение плотности $5.9\text{--}6.02\text{ г/см}^3$ [9]. Исходная ШПС Ni-Al имеет значение плотности 6.22 г/см^3 (на рисунке 6 для начальных времен 0.5 ns и 1 ns и координат второй половины ШПС символы «+» и «x» соответствуют значению 6.22 г/см^3). Анализируя профили, помеченные различными символами на рисунке 6, видно, что с увеличением времени, переходя от одного профиля к другому, средние уровни профилей постепенно «поднимаются», т. е. с течением времени в повышение уровней профилей плотности все больший вклад дают последовательно образующиеся фазы с увеличивающимся значением плотности, а именно: NiAl₃, Ni₂Al₃, NiAl и Ni₃Al. Значение плотности для фазы Ni₃Al равно $7.29\text{--}7.5\text{ г/см}^3$ [9; 10].

Заключение

Вычислительные эксперименты МДМ показали, что скорость реакции СВС в шахматно-подобной блочной структуре Ni-Al (рис. 2) в два раза выше, чем в соответствующей ей слоистой системе (рис. 1) в силу того, что удельная поверхность контакта атомов Ni и Al в ШПС больше, чем в слоистой системе (рис. 1). Разработанные авторами программные процедуры расчета температурных профилей и профилей плотности вещества позволяют более точно осуществлять температурный анализ микрокинетики СВС, уточнять схему (цепочку) металлехимических реакций СВС и распознавать образующиеся интерметаллические фазы в процессе СВС.

Литература

1. Purja Pun, G. P. Development of an interatomic potential for the Ni-Al system / G. P. Purja Pun, Y. Mishin // Philosophical Magazine. – 2009. – Vol. 89, № 34. – P. 3245-3267.
2. Шмаков, И. А. Компьютерное моделирование СВ-синтеза алюминидов никеля методом молекулярной динамики в пакете LAMMPS с использованием параллельных вычислений / И. А. Шмаков, В. И. Иордан, И. Е. Соколова. – Текст : непосредственный // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. – 2018. – № 1 (8). – С. 48–54.
3. Mishin, Y. Embedded-atom potential for B2-NiAl / Y. Mishin, M. J. Mehl, D. A. Papaconstantopoulos // Physical Review B. – 2002. – Vol. 65. – P. 224114.
4. Turlo, V. Microstructure evolution and self-propagating reactions in Ni-Al nanofolios: an atomic-scale description / V. Turlo, O. Politano, F. Baras // Journal of alloys and compounds. – 2017. – Vol. 708. – P. 989–998.
5. Ковалев, О. Б. Металлохимический анализ реакционного взаимодействия в смеси порошков никеля и алюминия / О. Б. Ковалев, В. А. Неронов. – Текст : непосредственный // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, № 2. – С. 52–60.
6. Ковалев, О. Б. Математическое моделирование металлохимических реакций в двухкомпонентной реагирующей дисперсной смеси / О. Б. Ковалев, В. В. Беляев. – Текст : непосредственный // Физика горения и взрыва. – 2013. – Т. 49, № 5. – С. 64–76.
7. Stukowski, A. Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO – the Open Visualization Tool / A. Stukowski // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. – 2010. – Vol. 18. – P. 015012.
8. Ackland, G. J. Applications of local crystal structure measures in experiment and simulation / G. J. Ackland, A. P. Jones // Physical Review B. – 2006. – Vol. 73 (5). – P. 054104.
9. Справочник химика : в 7 томах / редколлегия: Б. П. Никольский [и др.]. – 2-е издание, исправленное. – Москва ; Ленинград : Химия, 1966. – Т. 1. – 1072 с. – Текст : непосредственный.
10. Каблов, Е. Н. Литейные конструкционные сплавы на основе алюминидов никеля / Е. Н. Каблов, О. Г. Оспенникова, О. А. Базылева. – Текст : непосредственный // Двигатель. – 2010. – № 4 (70). – С. 22–24.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ
в рамках научных проектов № 18-08-01152 и № 18-08-01475.*

А. С. Тамбовцев, В. В. Беляев, И. П. Гуляев

CFD-АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ С ПОВЕРХНОСТЬЮ В УСЛОВИЯХ СУСПЕНЗИОННОГО ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Газотермическое нанесение покрытий с использованием суспензий и растворов прекурсоров позволяет получать перспективные функциональные покрытия на основе оксидных керамик с контролируемой микроструктурой. В работе проведено CFD-моделирование течений воздушной плазмы, формируемых плазматроном «ПНК-50» в дозвуковых и сверхзвуковых режимах работы (диаметр выходного сопла 6, 8, 10 мм, расход газа плазмообразующего газа 1-7 г/с, скорость потока 500-2100 м/с). Изучено взаимодействие одиночных частиц напыляемого материала размером 0.1-5 мкм с пограничным слоем газа на поверхности подложки (основы) в процессе формирования покрытия, получены значения скорости соударения частиц с основой в различных режимах напыления. Показано, что минимальный размер частиц, участвующих в формировании покрытия, составляет 0.5-1 мкм.

Ключевые слова: плазменное напыление; покрытия; суспензия; размер частиц; микроструктура.

A. S. Tambovtsev, V. V. Belyaev, I. P. Gulyaev

CFD-ANALYSIS OF THE INTERACTION OF PARTICLES WITH A SURFACE IN THE CONDITIONS OF SUSPENSION PLASMA SPRAYING

Gas-thermal coating using suspensions and solutions of precursors allows to obtain promising functional coatings based on oxide ceramics with a controlled microstructure. CFD modeling of air plasma flows generated by the PNK-50 plasmatron in subsonic and supersonic operating modes (diameter of the nozzle 6, 8, 10 mm, gas flow rate of a plasma-forming gas 1 - 7 g / s, flow rate 500 - 2100 m / s). The interaction of single particles of the sprayed material with a size of 0.1 - 5 μm with the boundary layer of gas on the surface of the substrate (base) in the process of coating formation was studied, the values of the speed of collision of particles with the base in various spraying modes were obtained. It is shown that the minimum particle size involved in coating formation is 0.5 - 1 μm .

Keywords: plasma spraying; coatings; suspension; particle size; microstructure.

Введение

Суспензионное напыление занимает промежуточное положение между газотермическим напылением (ГТН) порошковых материалов и методами, основанными на осаждении покрытий из газовой фазы (электронно-лучевое, магнетронное, химическое и т. д.). Рассматриваемый метод нанесения покрытий основан на применении исходных материалов в виде жидкой фазы – суспензии частиц размером 10-1000 нм или растворов химических реагентов-прекурсоров (например, соли металлов). Материал инжектируется в высокотемпературный и высокоскоростной газовый поток, где происходит дробление жидкости на капли размером 10-20 мкм, испарение и снижение размера капель, формирование «сухих» частиц материала размером порядка 1 мкм. Использование в ГТН порошковых материалов субмикронного размера невозможно по двум причинам: во-первых, порошок агломерируется (комкуется) и

становится практически несыпучим, во-вторых, ввести такие мелкие частицы в высокоскоростную струю не позволяет их малая инерция.

Снижение размера напыляемых частиц с 25-100 мкм, характерного для традиционных порошковых методов ГТН, до 1 мкм позволяет радикально изменить микроструктуру и функциональные характеристики формируемых покрытий. В связи с тем, что процесс жидкофазного напыления осуществляется в воздушной атмосфере, данная технология применяется только для оксидных материалов. Важно подчеркнуть, что производительность напыления (скорость роста покрытий) с использованием жидких материалов в 2–5 раз ниже, чем в традиционном порошковом напылении, однако на 1–2 порядка выше, чем в методах осаждения материалов из газовой фазы.

Резкий рост интереса к данной технологии возник в начале 2000-х годов. Основными причинами интенсивных исследований стали очевидные перспективы метода в двух важных задачах: теплозащитные покрытия лопаток авиационных двигателей [1] и ТОТЭ(SOFC)-элементы [2]. Обзоры, посвященные плазменному напылению суспензий и растворов (Suspension Plasma Spraying, Solution Precursor Plasma Spraying) [3; 4], обобщают опыт экспериментальных работ и позволяют определить практические ориентиры для реализации процесса: вязкость жидкости 10-50 мПа·с, объемный расход жидкости 20-120 мл/мин, дистанция напыления 40-100 мм, скорость роста покрытия 2-15 мкм за проход. Для получения качественных покрытий требуется применение плазмотронов мощностью 70-100 кВт и выше, таких как Axial III (Northwest Mettech), Triplex (Oerlikon Metco), 100HE (Progressive Technologies). Это связано, во-первых, со значительными тепловыми затратами на испарение жидкости (около 50% полезной мощности) [5], а во-вторых, с необходимостью повышения скорости субмикронных частиц до 500-1000 м/с, чтобы они могли преодолеть пограничный слой газа у поверхности подложки [6; 7]. Рельеф поверхности получаемого покрытия, размер периодических структур сильно зависят от шероховатости и способа механической обработки подложки [8]. В работе [9] приведены общие рекомендации по выбору режимных параметров процесса напыления (мощность плазмотрона, расход плазмообразующего газа, скорость подачи жидкости и перемещения образца и т. д.) для получения необходимой структуры покрытия (плотная/пористая/столбчатая), однако степень их применимости к напылительным системам различных конструкций остаётся неясна.

За последние 10-15 лет накоплен сравнительно большой объем экспериментальных данных, касающихся технологической стороны вопроса. В то же время физика явлений, происходящих в цепочке «формирование капель – формирование частиц материала – ускорение и нагрев частиц – соударение с основой» остается слабо исследованной. Причиной этому являются традиционные сложности изучения межфазного тепломассообмена в системе «дисперсные частицы – высокотемпературный поток», характерные для условий ГТН: малый размер и высокая скорость объектов. В условиях жидкофазного напыления указанные проблемы усугубляются в еще большей степени: скорости частиц еще выше, их размеры еще меньше, необходимо учитывать эффекты Кнудсена и Стокса. Короткие дистанции напыления (обычно 50-80 мм) приводят к тому, что практически все рассматриваемые процессы происходят в ядре плазменной струи, интенсивное излучение которой чрезвычайно затрудняет их оптическую диагностику. Кроме того, добавляются процессы поверхностного испарения несущей жидкости, формирования твердого осадка, пиролиза. Динамика этих явлений в настоящий момент остается практически неизученной.

Цель работы – численный анализ взаимодействия одиночных частиц напыляемого материала с пограничным слоем газа на поверхности основы современными методами вычислительной гидродинамики (CFD – от англ. computational fluid dynamics).

Методика численного эксперимента

Численное моделирование процессов суспензионного газотермического напыления в основном производится с использованием коммерческих CFD-пакетов, чаще всего Ansys Fluent

[7; 10]. Использование встроенных моделей двухфазных течений позволяет достаточно точно предсказывать скорость и траектории напыляемых частиц, однако динамика межфазного теплообмена рассматривается в рамках однородного (безградиентного) нагрева частиц, который зачастую неуместен даже при анализе порошкового напыления.

Анализируя современное состояние исследований в области нанесения ТЗП и ТОТЭ, невозможно обойти вопрос применяемых материалов. Традиционно для этих целей используется диоксид циркония ZrO_2 , стабилизированный в тетрагональной фазе с помощью 5-8 % добавки оксида иттрия Y_2O_3 . Главные его преимущества: высокая температура плавления – 3000 К, низкая теплопроводность ~ 2.6 Вт/(м·К) и высокий КТР на уровне $11 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹, сравнимый с металлической основой лопатки. Однако рабочая температура таких покрытий ограничена пределом 1200-1250 °С, при котором начинается заметная деградация тетрагональной структуры материала. Эти значения не удовлетворяют требованиям авиадвигателей нового поколения, в которых требуется повышение рабочей температуры до 1350-1450 °С. Главные кандидаты на материал для оксидного слоя ТЗП будущего: перовскиты $SrZrO_3$, $Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O_3$; гексаалюминиды лантана $LaLiAl_{11}O_{18.5}$, $LaTi_2Al_9O_{19}$; а также цирконаты лантаноидов $Ln_2Zr_2O_7$ ($Ln=La, Nd, Sm, Gd$) с кристаллической структурой пироксенов [1; 11]. При этом, по современным данным, именно последняя группа материалов выглядит наиболее перспективной. Примечательно, что примерно те же классы материалов являются кандидатами на роль электролитов будущего в ТОТЭ [12]. При этом именно методы плазменного напыления суспензий и растворов прекурсоров демонстрируют возможности получения покрытий требуемой толщины, микроструктуры и пористости в рассматриваемых задачах [13; 14].

Постановка задачи CFD-анализа

Теоретический анализ посвящен определению условий напыления, при которых частицы микронного и субмикронного размера способны достигнуть поверхности подложки (основы для нанесения покрытия) и сформировать покрытие.

Численное моделирование взаимодействия одиночных частиц напыляемого материала с плазменным потоком выполнялось на основе решения полных уравнений Навье – Стокса в пакете Ansys Fluent 17.2. Рассматривалась стационарная осесимметричная задача с абсолютной формулировкой скорости, с учётом переноса энергии. В расчётах использована геометрия канала плазмотрона «ПНК-50» с соплами диаметром 6, 8, 10 мм, соответствующими условиям нанесения покрытий в экспериментах. На расстоянии 80 мм от среза сопла плазмотрона была установлена подложка диаметром 25 мм. Расчетная сетка (рис. 1) состояла примерно из 35 тысяч узлов.

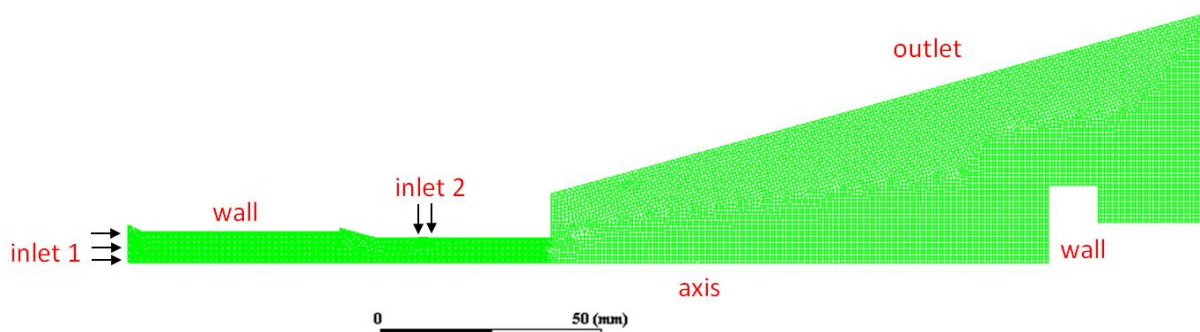


Рисунок 1 – Сетка в расчетной области плазменного потока.

Слева – канал плазмотрона, справа – подложка

Вычисления проводились с использованием моделей газа и параметров решателя, выбранных по результатам верификации расчетов, проведенных в работе [15].

Таблица 1 – Параметры численных моделей

Решатель	Вязкость	Параметры	Уравнение состояния газа
Density based	Realizable k-epsilon	$C_{\varepsilon 2} = 1.9$, TKE Pr = 1, TDR Pr = 1.2, Energy Pr = 0.85, Wall Pr = 0.85	Плотность – Soave-Redlich-Kwong. Теплоемкость, теплопроводность, вязкость – кусочно-полиномиальная зависимость по табличным данным [16]

Параметры турбулентности задавались через интенсивность турбулентности, равную 5 %, и коэффициент турбулентной вязкости, равный 10. Использовался решатель *Density based* с неявной схемой и моделированием течения по типу *Roe-FDS* (Roe flux-difference splitting). Пространственная дискретизация градиентов осуществлялась с помощью метода наименьших квадратов. Давление, плотность, импульс и энергия вычислялись со вторым порядком точности, турбулентная кинетическая энергия – с первым.

Граничные условия варьировались путем задания массового расхода и температуры плазмообразующего газа на границе *inlet1*, а также расхода транспортирующего и фокусирующего газов на границе *inlet2* (температура 300 K), соответствующих различным режимам работы плазмотрона при токе дуги 200 A (таблица 2).

Таблица 2 – Граничные условия исследованных режимов работы плазмотрона

Расход плазмообразующего и защитного газа, г/с (inlet 1)	Расход транспортирующего и фокусирующего газа, г/с (inlet 2)	Ток дуги, A	Температура плазмообразующего газа, K (inlet 1)
Сопло 6 мм			
1.0 + 0.15	0.3 + 0.3	200 A	6800
3.0 + 0.45	0.9 + 0.9	200 A	5000
5.0 + 0.75	1.5 + 1.5	200 A	4200
7.0 + 1.0	2.1 + 2.1	200 A	3800
Сопло 8 мм			
1.0 + 0.15	0.3 + 0.3	200 A	6800
3.0 + 0.45	0.9 + 0.9	200 A	5000
5.0 + 0.75	1.5 + 1.5	200 A	4200
7.0 + 1.0	2.1 + 2.1	200 A	3800
Сопло 10 мм			
1.0 + 0.15	0.3 + 0.3	200 A	6800
3.0 + 0.45	0.9 + 0.9	200 A	5000
5.0 + 0.75	1.5 + 1.5	200 A	4200
7.0 + 1.0	2.1 + 2.1	200 A	3800

На стенке канала плазмотрона *wall* задавалось условие неприлипания газа и отсутствия теплового потока. На поверхности *outlet* задавалось значение атмосферного давления 100 кПа и температуры окружающего воздуха 300 K. Температура плазмообразующего газа задавалась на основе измерения мощностных характеристик плазмотрона в реальных условиях работы (мощность электрической дуги, мощность тепловых потерь в канале).

В качестве дисперсной фазы рассматривались частицы диоксида циркония ZrO_2 размером 0.1, 0.3, 0.5, 1, 3, 5 мкм. При анализе межфазного переноса тепла и импульса «плазменный поток – частица», для того чтобы учесть эффект переменных свойств среды (резкое изменение теплофизических свойств газа в температурном пограничном слое у поверхности частицы), использовался аппарат UDF (User Defined Functions) пакета Fluent. Эффект разреженности газа и испарения материала в расчетах не учитывался.

Ранее в экспериментах было установлено, что процесс дробления капель суспензии ZrO_2 , сушки и полного плавления материала происходит на дистанции 6-12 мм вниз по потоку от точки инъекции материала. Поэтому для упрощения расчетов ввод частиц в струю осу-

ществлялся на срезе сопла плазмотрона (20 мм от узла инжектора в канале). Для изучения траекторного эффекта частиц инжекция осуществлялась в трех точках с радиальными координатами $r_{inj} = 0.1, 1, 2$ мм.

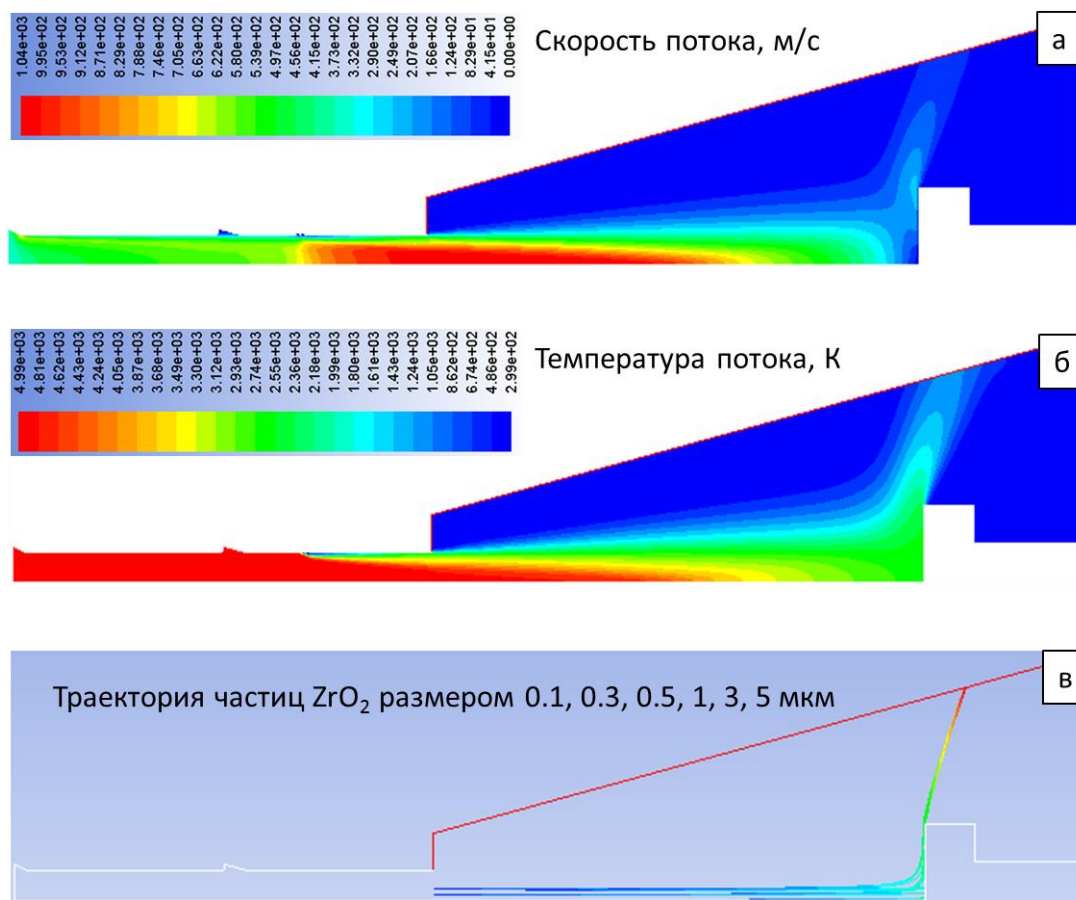


Рисунок 2 – Результаты расчета полей скорости (а) и температуры (б), а также траекторий частиц ZrO_2 (в) при использовании сопла диаметром 10 мм и расхода плазмобразующего газа 3 г/с

На рис. 2 в качестве примера представлены результаты расчета течения плазменной струи при использовании сопла диаметром 10 мм и расхода плазмобразующего газа 3 г/с. На фрагменте рис. 2 (в) видно, что в указанном режиме частицы размером 0.1-1 мкм не соударяются с подложкой, а уносятся газовым потоком на периферию. Частицы размером 3 и 5 мкм достигают подложки.

Обсуждение результатов эксперимента

На рис. 3 показаны графики изменения скорости (а) и температуры (б) плазменного потока на оси струи в указанном режиме работы плазмотрона. На фрагменте рис. 3 (а) пунктирной линией обозначена внешняя граница динамического пограничного слоя, положение которой определялось по точке перегиба графика скорости (изменение знака второй производной d^2V_x/dx^2).

На рис. 3 (в, г) показаны изменения осевой скорости V_x частиц ZrO_2 размером 0.1-0.5 мкм и 1-5 мкм. Для каждого размера частиц показаны три графика, соответствующие начальной координате инжекции $r_{inj} = 0.1, 1, 2$ мм. В данном случае частицы размером 5 мкм перед входом в пограничный слой имеют скорость 700-750 м/с, а при соударении с подложкой – 590-560 м/с, а частицы размером 3 мкм перед входом в пограничный слой имеют скорость 550-600 м/с, а при соударении с подложкой – 400-460 м/с. Скорость частиц размером 1 мкм при приближении к подложке составляет 340-360 м/с, однако такого значения оказыва-

ется недостаточно для преодоления торможения в пограничном слое, вследствие чего частицы не достигают подложки, а отклоняются газовым потоком в радиальном направлении.

Для мелких частиц (менее 1 мкм) скорость и траектория движения практически перестают зависеть от их размера (рис. 3в), так как частицы отслеживают линии тока газа. Движение таких частиц полностью определяется условиями их инъекции в поток.

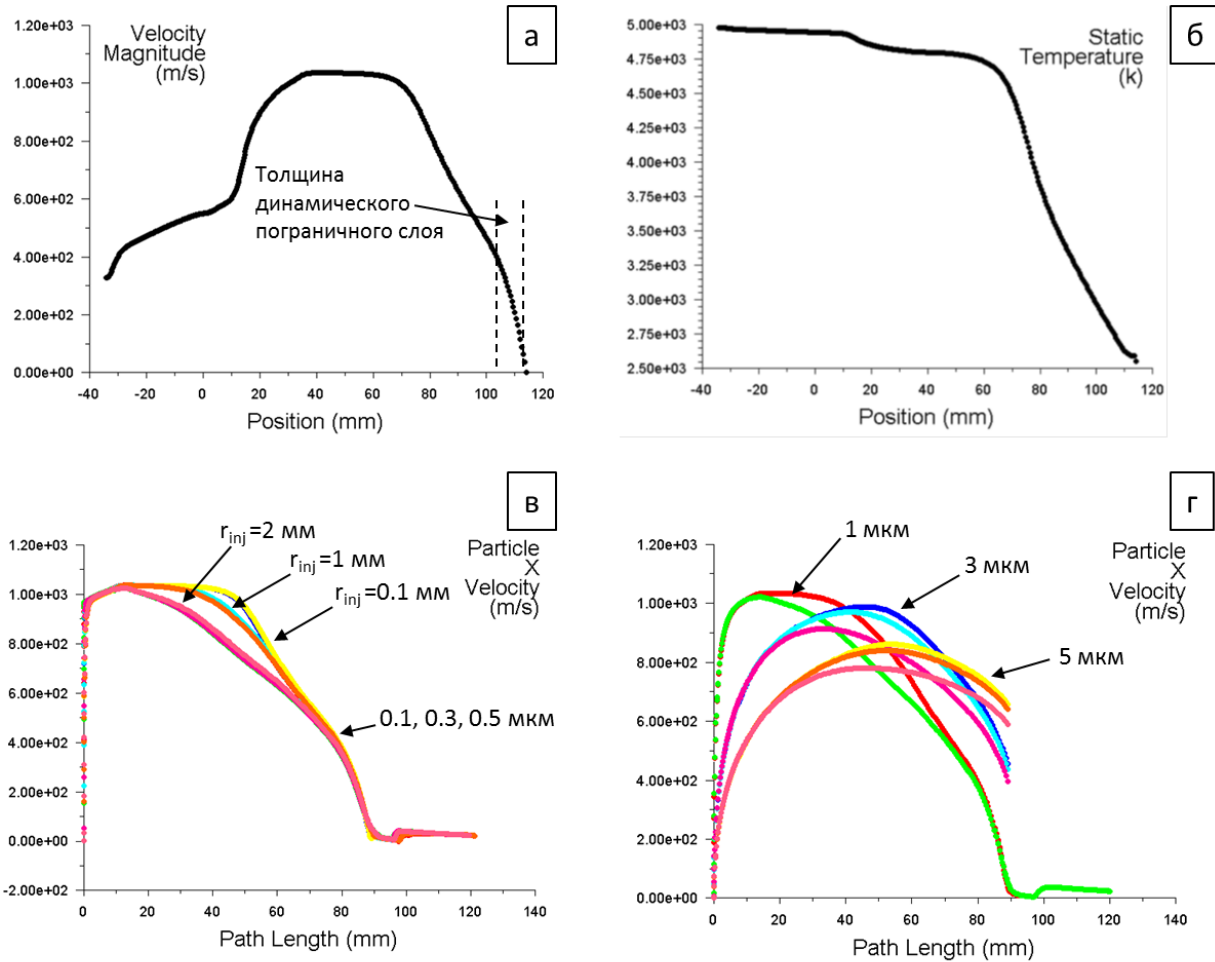


Рисунок 3 – Изменение скорости (а) и температуры (б) плазменного потока на оси струи, а также изменение скорости частиц ZrO_2 размером 0.1-0.3 мкм (в) и размером 1-3 мкм (г) при использовании сопла диаметром 10 мм и расхода плазмообразующего газа 3 г/с

Аналогичные численные исследования были проведены для всех режимов работы плазмотрона. В таблице 3 представлены результаты измерения среднемассовых значений скорости и температуры плазмы на выходе из сопла плазмотрона, толщины динамического пограничного слоя у поверхности подложки, скорости частиц перед пограничным слоем и скорости соударения частиц с подложкой. В случаях, когда частицы не достигали поверхности подложки, скорость соударения не указывалась.

Для обобщения результатов численного анализа условий соударения частиц с подложкой производили оценку числа Стокса по формуле

$$St = \frac{\rho_p d_p^2 V_0}{18 \mu_g h},$$

в которой ρ_p, d_p, V_0 – плотность, диаметр и скорость частицы при входе в пограничный слой, μ_g – вязкость газа, h – толщина пограничного слоя. Вязкость газа μ_g брали по таблич-

ным данным для средней температуры в пограничном слое (рис. 3 (б)). Число Стокса характеризует инерционность частиц в окрестности критической точки натекающего потока: при $St \leq 1$ частицы отслеживают линии тока газа и обтекают подложку, а при $St > 1$ соударяются с ней (рис. 4).

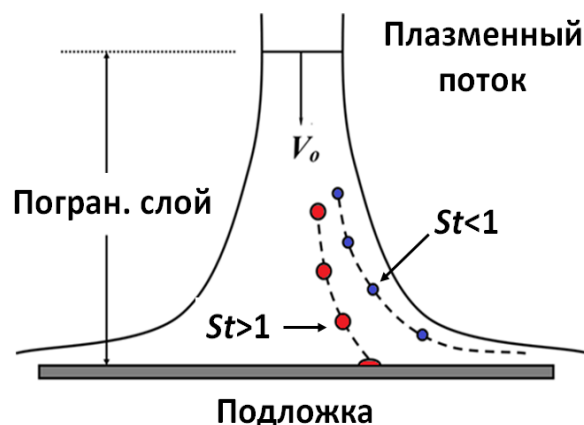


Рисунок 4 – Схематическое изображение влияния числа Стокса на движение частиц при натекании струи на подложку

В таблице 3 представлены результаты расчета параметров газового потока на выходе из сопла плазмотрона (среднемассовые значения температуры и скорости), а также параметров пограничного слоя при натекании на подложку, установленную на расстоянии 80 мм от сопла плазмотрона (толщина пограничного слоя, средняя температура и вязкость газа). Температура газа при натекании на преграду во всех случаях примерно вдвое ниже, чем при выходе из сопла плазмотрона. Увеличение скорости потока (расхода плазмообразующего газа) приводит к снижению толщины пограничного слоя.

Таблица 3 – Параметры динамического пограничного слоя у поверхности подложки

Расход плазмообразующего и защитного газа, г/с	Среднемасс. температура плазмообразующего газа, К	Среднемасс. скорость плазмообразующего газа, м/с	Толщина погран. слоя у подложки, мм	Температура газа в погран. слое, К	Вязкость газа в погран. слое, Па·с
Сопло 6 мм					
1.0 + 0.15	6.8E+03	1.3E+03	13	2.7E+03	8.70E-05
3.0 + 0.45	5.0E+03	1.7E+03	11	2.3E+03	7.60E-05
5.0 + 0.75	4.2E+03	1.9E+03	8	2.1E+03	7.10E-05
7.0 + 1.0	3.8E+03	2.1E+03	8	2.0E+03	6.90E-05
Сопло 8 мм					
1.0 + 0.15	6.8E+03	8.5E+02	14	3.3E+03	1.05E-04
3.0 + 0.45	5.0E+03	1.2E+03	12	2.3E+03	7.60E-05
5.0 + 0.75	4.2E+03	1.6E+03	9	2.2E+03	7.40E-05
7.0 + 1.0	3.8E+03	1.9E+03	8	2.1E+03	7.10E-05
Сопло 10 мм					
1.0 + 0.15	6.8E+03	5.5E+02	15	3.3E+03	1.05E-04
3.0 + 0.45	5.0E+03	8.5E+02	13	2.7E+03	8.70E-05
5.0 + 0.75	4.2E+03	1.1E+03	11	2.6E+03	8.40E-05
7.0 + 1.0	3.8E+03	1.4E+03	9	2.6E+03	8.40E-05

Результаты измерения скорости частиц ZrO_2 размером 0.1, 0.3, 0.5, 1, 3, 5 мкм во всех изученных режимах работы плазмотрона в графическом виде представлены на рис. 5. Значения для каждого типа сопла обозначены индивидуальными маркерами, скорость частиц каждого размера растет с увеличением расхода плазмообразующего газа. На рис. 5(а) видно, что

для всех типов сопел значения скорости частиц размером 0.1-1 мкм перед входом в пограничный слой составляют 200-1000 м/с (в зависимости от расхода плазмообразующего газа 1...7 г/с). Скорость этих частиц практически не зависит от размера и определяется исключительно характеристиками газового потока. Это связано с тем, что частицы имеют малую массу и полностью следуют линиям тока газа. Скорость частиц размером 3, 5 мкм при входе в пограничный слой составляет 200-1500 м/с и, как правило, превышает скорость более мелких частиц. Это связано с тем, что на дистанциях 50-70 мм от среза сопла плазмотрона скорость газового потока начинает снижаться независимо от эффекта пограничного слоя подложки, и субмикронные частицы замедляются активнее, чем крупные частицы.

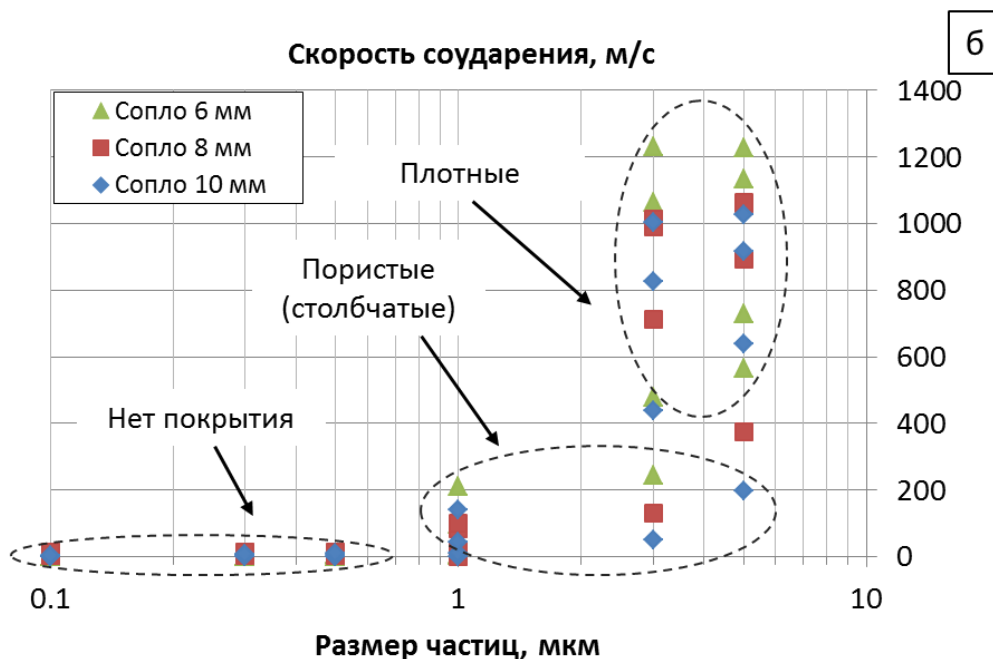
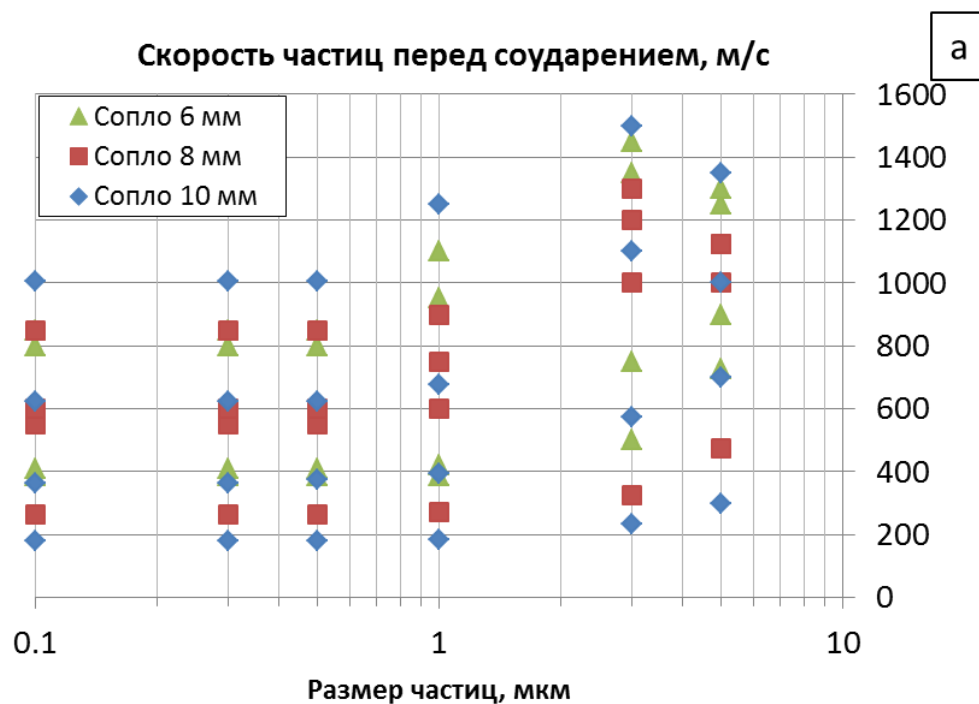


Рисунок 5 – Зависимость скорости частиц при входе в пограничный слой (а) и при соударении с поверхностью подложки (б) от их размера. Точка инъекции $r_{inj} = 0.1$ мм

С практической точки зрения наибольший интерес представляет анализ скорости частиц в момент соударения с подложкой. На рис. 5 (б) можно видеть, что во всех режимах напыления частицы размером 0.1-0.5 мкм снижают осевую скорость до нуля и огибают подложку по линиям тока газа, не соударяясь с ней. Очевидно, что такие частицы не будут участвовать в формировании покрытия. Важно подчеркнуть, что субмикронные частицы, имея скорость 200-1000 м/с, полностью теряют ее в пограничном слое.

Частицы размером 3-5 мкм практически во всех режимах (за исключением наиболее низкоскоростного $G_{nl}=1$ г/с) при соударении с поверхностью имеют высокую скорость 400-1200 м/с, потеря скорости в пограничном слое составляет 100-400 м/с. Такие высокие значения скорости на практике обеспечивают формирование покрытий с высокой плотностью. При низкой скорости потока частицы размером 3-5 мкм имеют низкую скорость соударения до 200 м/с, которая приводит к формированию пористых покрытий.

Диаметр частиц 1 мкм является критическим: в низкоскоростных режимах ($G_{nl}=1-3$ г/с), а также при инъекции вдали от оси струи, частицы отклоняются от подложки по линиям тока газа и не формируют покрытие; при высокоскоростных режимах напыления ($G_{nl}=5-7$ г/с) скорость соударения частиц составляет 10-150 м/с, что приводит к формированию пористых покрытий. Принимая во внимание, что малая осевая (нормальная к подложке) скорость таких частиц совмещена с высокой радиальной (касательной к подложке) скоростью 100-250 м/с, можно предполагать, что именно такие режимы напыления обеспечивают условия «затенения» поверхности подложки и формирования столбчатых структур, характерных для суспензионного напыления [17].

На рис. 6 показано обобщение результатов расчетов в терминах влияния критерия Стокса на скорость соударения с поверхностью частиц различных размеров. Для частиц размером 0.1-0.5 мкм число Стокса принимает значения $St=10^{-4} \dots 10^{-1}$, поэтому такие капли следуют линиям тока газового потока и не соударяются с поверхностью подложки. Для частиц размером 1 мкм число Стокса составляет $St=0.5 \cdot 10^{-1} \dots 5 \cdot 10^{-1}$, а для 3-5 мкм – $St=1-20$. Таким образом, результаты численных расчетов показали полное согласие с теоретическим критерием преодоления пограничного слоя частицами дисперсной фазы [18].

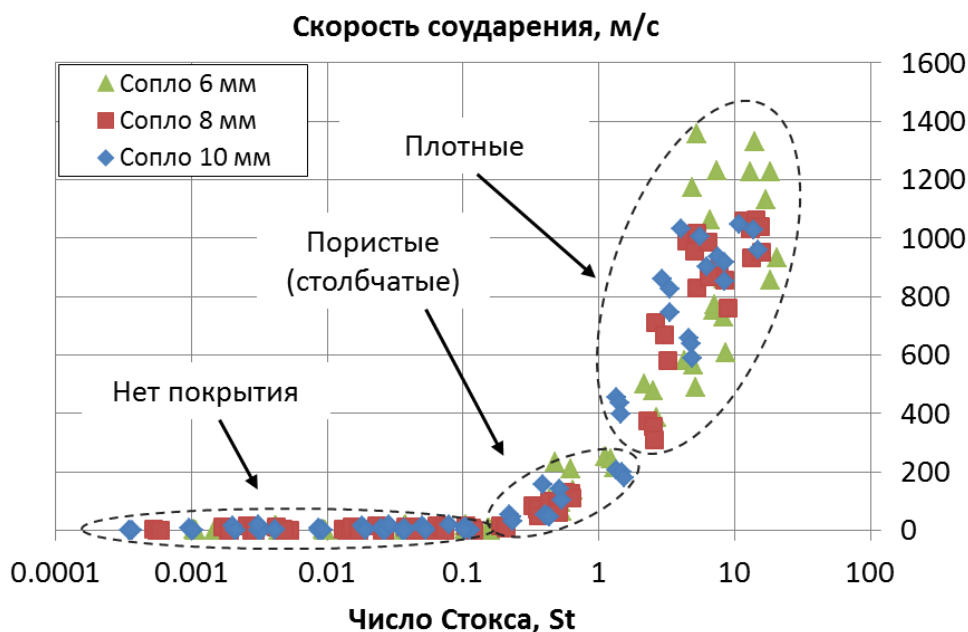


Рисунок 6 – Влияние числа Стокса на скорость соударения частиц ZrO_2 с поверхностью во всех изученных режимах напыления

Положение точки ввода частиц в поток (радиальной координаты) имеет одинаковое влияние на движение частиц во всех режимах: чем ближе к оси осуществляется инъекция, тем

большую скорость набирает частица. Такой траекторный эффект связан с тем, что в осевой области скорость (и температура) плазменного потока имеет максимальные значения [19; 21].

Выводы

Было проведено численное моделирование взаимодействия одиночных частиц напыляемого оксида циркония размером 0.1-5 мкм с плазменным потоком с использованием пакета Ansys Fluent 17.2. В расчётах использована геометрия канала плазматрона «ПНК-50» с соплами диаметром 6, 8, 10 мм, соответствующими условиям нанесения покрытий в экспериментах. Исследован диапазон расходов плазмообразующего газа $G_{пл}=1-7$ г/с. Подложка диаметром 25 мм (основа для нанесения покрытия) размещалась на расстоянии 80 мм от среза сопла плазматрона.

Полученные результаты численных расчетов позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Частицы размером менее 1 мкм практически не участвуют в формировании покрытия вследствие их малой инерции.
2. Диапазон минимальных размеров частиц, на который следует ориентироваться в практических работах по жидкофазному плазменному напылению покрытий, составляет 1-3 мкм.
3. Условия газодинамического потока, благоприятные для формирования покрытия (соударение частиц с подложкой), могут быть обеспечены не только с помощью сопла с критическим диаметром 6 мм, но и 8 мм, и 10 мм.

Литература

1. Bakan, E. Ceramic Top Coats of Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings: Materials, Processes, and Properties / E. Bakan, R. Vaßen // Journal of Thermal Spray Technology. – 2017. – Vol. 26. – P. 992–1010.
2. Thermal Plasma Spraying Applied on Solid Oxide Fuel Cells / D. Soysal, J. Arnold, P. Szabo [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. – 2013. – Vol. 22 (5). – P. 588–598.
3. Demands, Potentials, and Economic Aspects of Thermal Spraying with Suspensions: A Critical Review / F.-L. Toma, A. Potthoff, L.-M. Berger, C. Leyens // Journal of Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol. 24 (7). – P. 1143–1152.
4. Liquid Feedstock Plasma Spraying: An Emerging Process for Advanced Thermal Barrier Coatings / N. Markocsan, M. Gupta, S. Joshi [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. – 2017. – Vol. 26 (7). – P. 1104–1114.
5. Jordan, E. The Solution Precursor Plasma Spray (SPPS) Process: A Review with Energy Considerations / E. Jordan, C. Jiang, M. Gell // Journal Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol. 24 (7). – P. 1153–1165.
6. What Do We Know, What are the Current Limitations of Suspension Plasma Spraying / P. Fauchais, M. Vardelle, A. Vardelle, S. Goutier // Journal Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol. 24 (7). – P. 1120–1129.
7. Killinger, A. What Do We Know, What are the Current Limitations of Suspension HVOF Spraying / A. Killinger, P. Muller, R. Gadow // Journal Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol. 24 (7). – P. 1130–1142.
8. The key process parameters influencing formation of columnar microstructure in suspension plasma sprayed zirconia coatings / P. Sokołowski, S. Kozerski, L. Pawłowski, A. Ambroziak // Surface & Coatings Technology. – 2014. – Vol. 260. – P. 97–106.
9. Characterization of Microstructure and Thermal Properties of YSZ Coatings Obtained by Axial Suspension Plasma Spraying (ASPS) / A. Ganvir, N. Curry, S. Björklund [et al.] // Journal Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol. 24 (7). – P. 1195–1204.

10. Three-Dimensional Analysis of the Suspension Plasma Spray Impinging on a Flat Substrate / M. Jadidi, M. Mousavi, S. Moghtadernejad, A. A. Dolatabadi // *Journal Thermal Spray Technology*. – 2015. – Vol. 24 (1-2). – P. 11–23.
11. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines : special issue MRS Bulletin. – 2012. – Vol. 37 (10). – 273 p.
12. Шляхтина, А. В. Синтез и свойства кислородпроводящих соединений семейства редкоземельных пироксидов : автореферат на соискание ученой степени доктора химических наук / А. В. Шляхтига. – Москва, 2010. – 46 с. – Текст : непосредственный.
13. Application of Suspension Plasma Spraying (SPS) for Manufacture of Ceramic Coatings / H. Kassner, R. Siegert, D. Hathiramani [et al.] // *Journal Thermal Spray Technology*. – 2008. – Vol. 17 (1). – P. 115–123.
14. Functional Performance of Gd₂Zr₂O₇/YSZ Multi-layered Thermal Barrier Coatings Deposited by Suspension Plasma Spray / S. Mahade, N. Curry, S. Bjorklund [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – Vol. 318. – P. 208–216.
15. Беляев, В. В. Верификация численной модели газодинамики сверхзвукового воздушного плазменного потока / В. В. Беляев, И. П. Гуляев. – Текст : непосредственный // *Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии*. – 2018. – № 2 (9). – С. 47–53.
16. Варгафтик, Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. – Москва : Наука, 1972. – 721 с.
17. Control of dispersed-phase temperature in plasma flows by the spectral-brightness pyrometry method / A.V. Dolmatov, I. P. Gulyaev, P. Yu. Gulyaev, V. I. Jordan // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 110. – P. 012058.
18. Гуляев, П. Ю. Моделирование технологических процессов плазменного напыления покрытий наноразмерной толщины / П. Ю. Гуляев, И. П. Гуляев. – Текст : непосредственный // *Системы управления и информационные технологии*. – 2009. – Т. 35, № 1-1. – С. 144–148.
19. Бороненко, М. П. Определение фундаментальной диаграммы потока ламинарного плазмотрона с постоянной подачей порошка / М. П. Бороненко, П. Ю. Гуляев, А. Л. Трифонов. – Текст : непосредственный // *Вестник Югорского государственного университета*. – 2012. – № 2 (25). – С. 16–20.
20. Thermal analysis of reaction producing K_xTiO₂ / K. Borodina, S. Sorokina, N. Blinova [et al.] // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2018. – Vol. 131. – P. 561–566.
21. Бороненко, М. П. Измерение скорости и температуры частиц в потоке низкотемпературной плазмы / М. П. Бороненко, П. Ю. Гуляев, А. Е. Серегин. – Текст : непосредственный // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2014. – Т. 57, № 3-2. – С. 70–73.

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ
РЕАЛИЗАЦИИ
УГОЛОВНО-ПРАВОВЫХ И
КРИМИНОЛОГИЧЕСКИХ МЕР
ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ
ПРЕСТУПНОСТИ

Е. В. Авдеева

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИСЧИСЛЕНИЯ СРОКА ЛИШЕНИЯ СВОБОДЫ ПРИ ЗАЧЕТЕ ВРЕМЕНИ СОДЕРЖАНИЯ ПОД СТРАЖЕЙ И ДОМАШНЕГО АРЕСТА

Предмет исследования состоит в рассмотрении вопросов порядка зачета времени нахождения под стражей или домашним арестом в сроки наказаний как при постановлении приговора, так и в ходе его исполнения. Цель исследования состоит в раскрытии проблемных вопросов исчисления периода содержания под стражей, подлежащего в зачет срока лишения свободы, начала срока отбывания наказания в виде лишения свободы. Рассмотрен порядок производства зачета времени нахождения лица под домашним арестом до вступления приговора суда в законную силу, если судом назначается наказание, не связанное с изоляцией от общества.

Основные результаты исследования отражают проблемы при постановлении приговора, если время содержания под стражей поглощает срок наказания, назначенного подсудимому судом, а также вопросы применения льготных правил зачета времени содержания под стражей в срок лишения свободы при назначении наказания по совокупности преступлений и совокупности приговоров, действия уголовного закона во времени при зачете времени в срок наказания к преступлениям, совершенным до 14 июля 2018 года.

В качестве основополагающего направления отмечена научно-практическая обоснованность уголовно-правовой политики и законотворческих процессов, оптимизация реализации уголовного закона.

Ключевые слова: порядок зачета времени нахождения под стражей или домашним арестом в срок лишения свободы, льготные правила зачета времени, совокупность преступлений, совокупность приговоров, исчисление сроков, обратная сила закона.

E. V. Avdeeva

ACTUAL ISSUES OF CALCULATING THE TERM OF IMPRISONMENT WHEN SET OFF THE TIME OF DETENTION AND HOUSE ARREST

The subject of the study is to consider the issues regarding the set-off of the time spent in custody or house arrest at the time of punishment, both during the sentencing and during its execution.

The purpose of the study is to disclose the problematic issues of calculating the period of detention subject to offsetting the term of imprisonment, the beginning of the term of serving a sentence of imprisonment. The procedure for setting off the time spent by a person under house arrest until a court verdict comes into force is considered if a court imposes a sentence that is not related to isolation from society.

The main results of the study reflect problems in sentencing if the time of detention absorbs the sentence assigned to the defendant by the court, as well as the issues of applying preferential rules for setting off the time of detention in custody when sentencing for the totality of crimes and the totality of sentences, criminal of the law in time when the time in the sentence is set off, for crimes committed before July 14, 2018.

As a fundamental direction, the scientific and practical validity of the criminal law policy and legislative processes, the optimization of the implementation of the criminal law are noted.

Key words: procedure for setting off the time of detention in custody or house arrest during the term of imprisonment, preferential rules for setting the time, set of crimes, set of sentences, calculation of terms, retroactive effect of the law.

Введение

Реализация принципа справедливости и соразмерности в механизме уголовно-правовой охраны прав и свобод человека актуализирует исследование вопроса об исчислении момента окончания срока лишения свободы. Особая значимость данного вопроса предопределяется спецификой осуществления данного вида уголовного наказания, а также обеспечением общепризнанных принципов международного права и конституционных прав и свобод в РФ. На правоприменительном уровне имеет место проблема, обусловленная нарушениями при подсчете срока лишения свободы, в частности в случаях, когда осужденному были назначены меры пресечения в виде домашнего ареста или содержания под стражей.

Стоит отметить, что в целях устранения возникающих на практике спорных вопросов 3 июля 2018 года был принят Федеральный закон № 186-ФЗ «О внесении изменений в статью 72 Уголовного кодекса Российской Федерации», внесший существенные коррективы по детализации положений, предусмотренных ст. 72 УК РФ. Прежде всего, вышеуказанный закон устанавливает частью 3² статьи 72 УК РФ более расширенный перечень преступлений, по которым не допускается применение льготных правил зачета наказания. Также в результате введенных новелл была проведена дифференциация зачета времени нахождения под стражей или домашним арестом в сроки наказаний исходя из таких факторов, как характер совершенного преступления; наказание, назначенное судом; вид и режим исправительного учреждения. При этом закон предусматривает учет иных юридически значимых обстоятельств.

Результаты и обсуждение

Степень эффективности реализации положений Федерального закона № 186-ФЗ «О внесении изменений в статью 72 Уголовного кодекса Российской Федерации» целесообразно рассмотреть с учетом статистических данных поступивших и рассмотренных Верховным Судом РФ жалоб и ходатайств. Так, в первом полугодии 2019 года, согласно сводным статистическим данным, в Верховный Суд РФ в производство поступило 7825 жалоб, ходатайств и представлений, касающихся нарушений прав граждан при зачете времени содержания под стражей, а также времени в соответствии со ст. 72, 103 и 104 УК РФ (п. 11 ст. 397 УПК РФ) пребывания их в лечебном учреждении. Примечательно, что по результатам рассмотрения 3854 ходатайства были удовлетворены, что составило 63,7 % от общего количества поданных жалоб и ходатайств. Отказу в удовлетворении подлежали 1106 жалоб и ходатайств.

Примечательно, что в 2018 году рассмотрению Верховным Судом РФ по проблемам зачета времени содержания под стражей и времени пребывания в лечебном учреждении в соответствии со ст. 72, 103 и 104 УК РФ (п. 11 ст. 397 УПК РФ) подлежали 21231 ходатайство и жалоба. Из них 21231 ходатайство (жалоба) было удовлетворено. Решение об отказе в удовлетворении было принято по 2460 жалобам, ходатайствам и представлениям. В отношении 7894 ходатайств, представлений и жалоб было принято решение о прекращении производства, передаче по подсудности либо отзыву.

Исходя из вышеприведенных данных, внесение новелл в уголовный закон по вопросу порядка исчисления сроков наказания и зачета времени нахождения под стражей или домашним арестом в сроки наказаний не решило на правоприменительном уровне ряд спорных моментов. Причиной тому является порождение данными новеллами ряда новых дополнительных спорных вопросов, возникающих в ходе реализации уголовно-правовых норм, в частности в ходе отправления правосудия при вынесении приговора, а также его исполнении.

Рассматривая наиболее проблемные вопросы, следует обратить внимание прежде всего на правоприменительные коллизии, возникающие при постановлении приговора. Среди таких коллизий стоит выделить неоднозначные подходы правоприменителя к толкованию поправок, внесенных законодателем в ст. 72 УК РФ Федерального закона № 186, касающихся дифференциации условий и порядка зачета времени содержания под стражей в срок лишения свободы с учетом от вида режима исправительного учреждения.

Согласно внесенным новеллам, следует исчислять срок на основании временной пропорции по принципу один день за один день в отношении осужденного, который отбывал наказание в строгих условиях либо находился: а) в штрафном или дисциплинарном изоляторе (ШИЗО или ДИЗО); б) в помещении камерного типа (ПКТ); в) в едином помещении камерного типа (ЕПКТ) [7, с. 8]. Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что для применения данного порядка исчисления сроков к осужденным, отбывающим наказание в исправительной колонии общего режима или воспитательной колонии, по пропорции исчисления один к одному необходимо установить наличие двух юридических факторов: 1) отбывание осужденным наказания в строгих условиях; 2) применение в период отбывания осужденным наказания в строгих условиях меры взыскания.

Следующий требующий особого внимания на правоприменительном уровне момент реализации положений Федерального закона № 186 связан с тем, что на основании ч. 3¹ ст. 72 УК РФ время содержания лица под стражей можно засчитывать в срок лишения свободы за исключением условий, регламентированных частями 3² и 3³ данной статьи.

Необходимо акцентировать внимание на том, что при вынесении судом обвинительного приговора с назначением наказания в виде лишения свободы в срок лишения свободы следует засчитывать период со дня фактического задержания осужденного до дня вступления данного приговора суда в законную силу. Таким образом, если засчитанное на основании части 3¹ статьи 72 УК РФ время содержания осужденного под стражей поглощает срок наказания, который назначен ему судом, то суд в порядке п. 2 ч. 5 и п. 2 ч. 6 ст. 302 УПК РФ обязан вынести приговор с назначением наказания и освобождением от его отбывания [10, с. 85]. При этом осужденный подлежит немедленному освобождению в зале суда.

Одним из актуальных вопросов на правоприменительном уровне является регламентация исходя из содержания новой редакции статьи 72 УК РФ порядка определения начала исчисления срока отбывания наказания в виде лишения свободы. Данная проблема обусловлена тем, что суд, руководствуясь ч. 7 статьи 302 УПК РФ, обязан установить в обвинительном приговоре с назначением наказания, подлежащего отбыванию осужденным, начало исчисления срока отбывания наказания.

В этой связи стоит обратить внимание на то, что статья 72 УК РФ в редакции Федерального закона от 3 июля 2018 года № 186-ФЗ предписывает началом срока отбывания наказания считать день вступления приговора в законную силу. Между тем регламентируются исключения, предусматривающие исчисление срока отбывания наказания со дня прибытия осужденного: 1) в исправительный центр (часть 1 статьи 603 УИК РФ); 2) в колонию-поселение (часть 3 статьи 751 УИК РФ); 3) в тюрьму (часть 1 статьи 130 УИК РФ), а также особый порядок исчисления срока отбывания наказания со дня задержания (часть 7 статьи 751 УИК РФ) [1, с. 22].

Что касается исчисления срока отбывания наказания, следует учитывать, что при установлении судом срока отбывания окончательного наказания в виде лишения свободы в соответствии с частью 5 статьи 69, статьи 70 УК РФ необходимо срок определять непосредственно со дня вступления последнего приговора в законную силу.

При этом в случаях, когда осужденный, в отношении которого назначено наказание в виде условного осуждения, в течение испытательного срока совершает умышленное тяжкое преступление (часть 5 статьи 74 УК РФ), суд должен вынести постановление об отмене условного наказания и зачесть в срок окончательного наказания время содержания под стражей, под домашним арестом по первому делу на основании положений статьи 72 УК РФ.

Следующий спорный момент имеет место при установлении порядка зачета времени непосредственно в случае содержания осужденного под стражей [2, с. 49]. Это связано с тем, что существуют на правоприменительном уровне разнообразные подходы к решению вопроса относительно возможности применения льготных правил, регламентированных пунктами «б» и «в» части 3¹ статьи 72 УК РФ, при исчислении срока лишения свободы, когда судом определяется наказание по: 1) совокупности преступлений; 2) совокупности приговоров [12, с. 55].

В частности, проблема заключается в том, что возникает вопрос о том, может ли суд при назначении наказания в виде лишения свободы по совокупности преступлений засчитывать время содержания осужденного под стражей исходя из следующего расчета: 1) один день лишения свободы – за полтора дня отбывания наказания в воспитательной либо исправительной колонии общего режима; 2) один день лишения свободы – за два дня отбывания наказания в колонии-поселении.

Рассматривая данную проблему с учетом новеллизации норм уголовного закона на основании Федерального закона от 3 июля 2018 года № 186-ФЗ, стоит отметить, что установленный порядок исчисления срока при назначении наказания в виде лишения свободы по совокупности преступлений подлежит применению за исключением следующих случаев назначения окончательного наказания по совокупности преступлений: 1) во-первых, когда одно из преступлений, образующих их совокупность, содержится в перечне, регламентируемом частью 3² ст. 72 УК РФ; 2) во-вторых, если осужденному суд постановляет отбывание окончательного наказания в тюрьме или исправительной колонии строгого или особого режима [3, с. 48; 8, с. 94].

Обращая внимание на порядок исчисления срока с учетом вышеперечисленных льготных условий, также следует рассмотреть специфику реализации норм зачета времени содержания под стражей в срок лишения свободы при назначении наказания непосредственно по совокупности приговоров.

Так, зачет времени следует осуществлять судом на льготных условиях расчета в случаях, когда: 1) лицо осуждено по первому приговору – за преступление, предусмотренное ч. 3² статьи 72 УК РФ, по второму приговору – за преступление, не входящее в перечень, регламентируемый частью 3² статьи 72 УК РФ; 2) суд не назначает в порядке статьи 70 УК РФ отбывание осужденным окончательного наказания в тюрьме или исправительной колонии строгого или особого режима [4, с. 48; 5, с. 72].

Таким образом, если суд выносит в отношении подсудимого постановление о назначении: по первому приговору в порядке ч. 2 ст. 228 УК РФ – наказания в виде лишения свободы условно; по второму приговору на основании ч. 2 ст. 158 УК РФ – наказания в виде реального лишения свободы, то при установлении срока окончательного наказания по совокупности приговоров необходимо произвести зачет времени содержания под стражей по последнему приговору согласно п. «б» ч. 3¹ ст. 72 УК РФ, а именно, учитывая то, что время содержания лица под стражей следует засчитать в срок лишения свободы из расчета: один день – за полтора дня отбывания осужденным наказания в воспитательной колонии или исправительной колонии общего режима. В том случае, когда по первому приговору осужденный также находился под стражей, данный период в срок лишения свободы засчитывается в порядке части 3² ст. 72 УК РФ согласно следующей пропорции – один день за один день [6, с. 83; 11, с. 28].

В ходе раскрытия основных проблем, имеющих место на правоприменительном уровне при назначении судом наказания, необходимо подчеркнуть роль законодательных новелл, внесенных в ст. 72 УК РФ относительно реализации положений, предусмотренных ч. 3¹ и 3⁴ данной статьи. Стоит сказать, что речь идет о порядке применения вышеуказанных норм к преступлениям, совершенным до 14 июля 2018 года с учетом положений, касающихся ст. 9 и ст. 10 УК РФ.

Реализация на основании ч. 1 ст. 10 УК РФ принципа обратной силы закона характерна при зачете времени содержания под стражей в срок лишения свободы на основании положе-

ний п. «б» и «в» ч. 3¹ статьи 72 УК РФ в отношении лиц, совершивших преступления до 14 июля 2018 года. Следовательно, для данной категории осужденных действуют нормы, улучшающие их правовое положение, а значит, влекущие применение правил повышения коэффициентов кратности.

Примечательно, что на основании части 1 статьи 10 УК РФ обратной силы не имеют следующие положения. Например, порядок исчисления, установленный ч. 3⁴ ст. 72 УК РФ, предусматривает зачет домашнего ареста в срок лишения свободы из расчета два дня нахождения под домашним арестом за один день лишения свободы. Вместе с тем примечательно, что в отношении лица, совершившего преступление до 14 июля 2018 года, т. е. до вступления ФЗ от 3 июля 2018 года № 186-ФЗ в силу, время пребывания под домашним арестом подлежит зачету в срок лишения свободы из соотношения один день за один день, в том числе и в случае избрания, а также продолжения применения данной меры пресечения после указанной даты.

При этом необходимо отметить, что зачет времени нахождения лица под домашним арестом в срок лишения свободы осуществляется до вступления приговора суда в законную силу, если в приговоре домашний арест сохранен в качестве меры пресечения.

Стоит учитывать следующий момент при нахождении лица до вступления приговора суда в законную силу под домашним арестом. Так, если суд в качестве наказания назначает такие виды, как содержание в дисциплинарной воинской части, ограничение свободы, ограничение по военной службе, принудительные, исправительные или обязательные работы, порядок исчисления производится согласно положениям ч. 3 ст. 72 УК РФ с учетом положений части 3⁴ статьи 72 УК РФ. Например, лицо до вступления приговора суда в законную силу находилось под домашним арестом в течение 12 месяцев. Приговором суда осужденному было назначено наказание в виде исправительных работ на срок 2 года. Руководствуясь частью 3⁴ статьи 72 УК РФ, суд должен 12 месяцев пребывания лица под домашним арестом зачесть как 6 месяцев содержания под стражей. Согласно ч. 3 ст. 72 УК РФ суд обязан обратить внимание на то, что время содержания под стражей подлежит зачету в срок исправительных работ по соотношению один день за три дня. Исходя из изложенного, следует, что суд при назначении наказания с учетом пребывания лица 12 месяцев под домашним арестом должен назначить наказание в виде исправительных работ сроком на 1 год 6 месяцев [9, с. 108].

При рассмотрении наиболее актуальных вопросов, связанных с исчислением сроков лишения свободы, можно отметить ряд проблемных моментов, имеющих место в случаях зачета времени принудительного нахождения подозреваемого или обвиняемого по решению суда в медицинской организации, оказывающей в стационарных условиях медицинскую или психиатрическую помощь.

При исчислении сроков в данном случае учитывается тот факт, что подозреваемый или обвиняемый в период принудительного по решению суда нахождения в медицинской организации, предоставляющей в стационарных условиях медицинскую или психиатрическую помощь, не содержался непосредственно в условиях изоляции от общества, которые установлены в отношении лиц, находящихся под стражей. Так как судом в отношении данного лица мера пресечения в виде заключения под стражу не назначалась, суд в результате констатирует при определении срока лишения свободы отсутствие оснований для применения повышающих коэффициентов кратности. Таким образом, суд в данном случае с учетом пребывания лица в стационарных условиях в медицинской организации для оказания медицинской или психиатрической помощи назначает наказание в виде лишения свободы из расчета один день за один день.

Следовательно, если в отношении подозреваемого или обвиняемого в период принудительного пребывания в стационарных условиях в медицинской организации для оказания медицинской или психиатрической помощи судом была избрана и не подлежала отмене мера пресечения в виде заключения под стражу, то при назначении наказания в виде лишения

свободы суд должен произвести зачет с учетом оснований применения повышающих коэффициентов кратности.

Необходимо подчеркнуть также наличие ряда спорных вопросов, возникающих на стадии исполнения приговора. Одним из наиболее проблемных моментов следует признать возможность применения коэффициентов кратности, регламентированных пунктами «б» и «в» части 3¹ статьи 72 УК РФ, непосредственно при решении вопросов, связанных с зачетом периодов содержания под стражей на стадии исполнения приговора в срок отбывания наказания.

Руководствуясь нормами уголовного и уголовно-исполнительного законодательства, стоит отметить, что повышающие коэффициенты кратности не подлежат применению на стадии исполнения приговора, который вступил в законную силу. Из сказанного вытекает, что повышающие коэффициенты кратности не могут применяться судом в отношении следующих этапов пребывания осужденного, а именно: 1) периода направления осужденного после вступления приговора суда в законную силу в исправительное учреждение для отбывания наказания; 2) периода нахождения осужденного под стражей, если он был задержан на срок до 48 часов по основаниям, установленным частью 2 статьи 30, частью 64 статьи 32, частью 4 статьи 46, частью 6 статьи 58, частью 4 статьи 60², частью 6 статьи 75¹ УИК РФ; 3) периода заключения под стражу осужденного в порядке, регламентируемом пунктами 18 и 18¹ статьи 397 УПК РФ, а также в случаях отмены условного осуждения к лишению свободы или условно-досрочного освобождения; 4) периода пребывания осужденных в следственных изоляторах в предусмотренном статьей 77¹ УИК РФ порядке при отсутствии факта избирания судом в отношении их меры пресечения в виде заключения под стражу.

Принимая во внимание действие принципа обратной силы закона, приговоры суда не подлежат пересмотру, если на основании положений, установленных статьей 72 УК РФ, суд при определении срока наказания лицу, осужденному к лишению свободы, произвел зачет периода его содержания лица под стражей в срок лишения свободы по соотношению один день за один день. Причиной тому является тот факт, что новеллы уголовного закона также устанавливают пропорцию зачета в срок лишения свободы времени содержания осужденного лица под стражей из пропорции один день за один день (например, пункт «а» части 3¹, часть 3² статьи 72 УК РФ). Следовательно, ходатайства осужденных, содержащие требования о приведении приговора суда с учетом новеллизации уголовного закона, не подлежат удовлетворению, так как не содействуют улучшению правового положения осужденного, о чем суд обязан уведомить ходатайствующее лицо посредством вынесения соответствующего постановления, содержащего обоснование применения части 1 статьи 10 УК РФ.

Что касается пересмотра приговора суда, по которому окончательное наказание было назначено в порядке статьи 70 УК РФ, то в данном случае следует учитывать применение положений нового уголовного закона в отношении первого приговора, при этом если первый приговор в порядке статьи 10 УК РФ при наличии к тому оснований не был пересмотрен. В данном случае окончательное наказание, которое было назначено на основании статьи 70 УК РФ, подлежит смягчению. Применение указанной статьи может быть исключено, если имеет место факт отбытия осужденным наказания по предыдущему приговору.

Правовой интерес на правоприменительном уровне представляет решение вышерассмотренного вопроса о применении ФЗ от 3 июля 2018 года № 186-ФЗ в отношении следующих категорий лиц: 1) условно-досрочно освобожденных от отбывания наказания; 2) осужденных, которым неотбытая часть наказания в виде лишения свободы заменена более мягким видом наказания. Если рассматривать действие новелл уголовного закона в отношении второй категории лиц, то суд обязан вынести решение о сокращении срока оставшейся неотбытой части наказания или срока более мягкого наказания, которое было назначено судом в порядке замены неотбытой части лишения свободы. Однако данный срок подлежит сокращению при условии сокращения срока неотбытой части наказания в виде лишения свободы.

На правоприменительном уровне возникает вопрос об изменении коэффициента кратности в случаях, когда на основании статьи 78 УИК РФ был изменен вид исправительного

учреждения. По данному вопросу следует сказать, что изменение коэффициента кратности является невозможным. Причиной тому является то, что ФЗ от 3 июля 2018 года № 186-ФЗ не предусматривает пересмотра правил зачета наказания, примененных судом в приговоре, в таких случаях изменения вида исправительного учреждения на основании статьи 78 УИК РФ, как: 1) с целью улучшения условий отбывания наказания, в частности при переводе осужденного в соответствии с п. «в» ч. 2 ст. 78 УИК РФ из исправительной колонии общего режима в колонию-поселение; 2) с целью ужесточения условий отбывания наказания, например, при замене колонии-поселения на колонию общего режима.

Заключение и выводы

Уголовно-правовое регулирование вопросов порядка зачета времени нахождения под стражей или домашним арестом в сроки наказаний как при постановлении приговора, так и в ходе его исполнения требует комплексного подхода путем сочетания и взаимодействия внутригосударственных и международных механизмов. Преимущественное значение приобретает национальная уголовно-правовая политика, направленная на совершенствование мер уголовно-правового, уголовно-процессуального и уголовно-исполнительного законодательства, в связи с чем требуется согласованность принципов уголовного права с нормами Конституции РФ и международного права. Особого внимания заслуживает повышение качества вычисления периода времени, подлежащего зачету в срок наказания. Так, непосредственно сотрудники исправительных учреждений, на которых возлагается осуществление подсчета срока лишения свободы осужденных, производят расчет периода в разных временных измерениях, в частности днях или месяцах. В результате на практике при одном сроке пребывания осужденных имеют место различные статистические показатели. С целью недопустимости нарушения принципа законности следует руководствоваться разъяснениями ФСИН России о порядке исчисления сроков освобождения от отбывания наказания в виде лишения свободы, согласно которым срок, подлежащий зачету, должен исчисляться путем учета количества календарных дней, в течение которых осужденный находился под стражей.

С учетом реализуемой национальной уголовно-правовой политики активизации заслуживает внутригосударственное взаимодействие правоохранительных органов.

Литература

1. Антонов, Т. Г. Исчисление срока лишения свободы при зачете времени содержания лица под стражей в срок наказания / Т. Г. Антонов, Е. А. Журавлева. – Текст : непосредственный // Вестник Кузбасского института. – 2018. – № 4 (37). – С. 17–23.
2. Бунин, О. Ю. О несправедливости в регламентации срока содержания под стражей в уголовном, уголовно-процессуальном и уголовно-исполнительном законодательстве / О. Ю. Бунин. – Текст : непосредственный // Право и практика. – 2017. – № 3. – С. 48–51.
3. Дашин, А. В. Зачет времени содержания под стражей. Домашнего ареста и запрета определенных действий в срок наказания в аспекте прогрессивных систем исполнения и отбывания уголовных наказаний и мер уголовно-правового характера / А. В. Дашин, П. М. Малин, А. В. Пивень. – Текст : непосредственный // Вестник Самарского юридического института. – 2019. – № 1 (32). – С. 45–50.
4. Долотов, Р. О. Условно-досрочное освобождение от наказания и домашний арест: проблемы взаимозачета / Р. О. Долотов. – Текст : непосредственный // Право : журнал Высшей школы экономики. – 2016. – № 2. – С. 45–54.
5. Зателепин, О. К. Зачет сроков мер пресечения в срок наказания. Новые разъяснения ВС РФ / О. К. Зателепин. – Текст : непосредственный // Уголовный процесс. – 2019. – № 11 (179). – С. 70–78.

6. Зезюлина, Т. А. Зачет времени содержания под стражей в срок наказания: новеллы уголовного законодательства / Т. А. Зезюлина, Н. А. Горшкова. – Текст : непосредственный // Вестник Владимирского юридического института. – 2018. – № 3 (48). – С. 82–85.
7. Качалова, О. В. Зачет срока заключения под стражей по «льготной» формуле лицу, которое уклоняется от наказания / О. В. Качалова. – Текст : непосредственный // Уголовный процесс. – 2019. – № 3 (171). – С. 8.
8. Квык, А. В. О справедливости зачета срока содержания под домашним арестом в общий срок наказания в виде лишения свободы: исторические предпосылки, современное состояние / А. В. Квык. – Текст : непосредственный // Расследование преступлений: проблемы и пути их решения. – 2016. – № 3 (13). – С. 92–95.
9. Митин, Д. Ю. Правоприменительная практика изменений, внесенных в статью 72 УК РФ / Д. Ю. Митин. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Экономические и юридические науки. – 2019. – № 3. – С. 106–114.
10. Осипов, С. Ю. Неконституционность ст. 72 исчисление сроков наказаний и зачет наказания уголовного кодекса РФ и экономический эффект ее отмены / С. Ю. Осипов. – Текст : непосредственный // Юридический факт. – 2017. – № 20. – С. 84–86.
11. Толкаченко, А. А. Некоторые практические вопросы зачета мер пресечения в срок уголовного наказания / А. А. Толкаченко. – Текст : непосредственный // Мировой судья. – 2019. – № 11. – С. 26–31.
12. Фроловичев, Я. В. Зачет домашнего ареста в сроки уголовных наказаний: законодательная регламентация и судебная практика / Я. В. Фроловичев. – Текст : непосредственный // Инновационная наука. – 2017. – № 10. – С. 54–59.

С. В. Розенко, Е. О. Игонина

**ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ ЯТРОГЕННЫМ ПРЕСТУПЛЕНИЯМ:
УГОЛОВНО-ПРАВОВЫЕ И УГОЛОВНО-ПРОЦЕССУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ**

В статье проводится исследование проблемных вопросов уголовно-правового противодействия ятрогенным преступлениям. Толкование отраслевых нормативных правовых актов приводит к выводу, что в процессе процессуальной проверки следователь не вправе получать сведения, составляющие врачебную тайну, что препятствует правильной квалификации содеянного. Квалификация ятрогенных преступлений требует обязательного обращения к медицинскому праву. Раскрывая тему, исследуются работы ведущих российских специалистов в области медицины и уголовного права. В работе исследуется проблематика судебно-следственной практики по данным преступным посягательствам. В ходе исследования авторы указывают на признаки врачебных ошибок и дефектов оказания медицинской помощи, позволяющие установить общие обстоятельства, влияющие на точную квалификацию преступления. Предлагается закрепить в Уголовном кодексе РФ самостоятельные составы преступлений, то есть специальные положения в отношении медицинских работников, что позволит исключить ошибки при квалификации.

Ключевые слова: ятрогенные преступления, врачебная ошибка, ятрогенная, дефект оказания медицинской помощи.

S. V. Rozenko, E. O. Igonina

**COUNTERING IATROGENIC CRIMES:
CRIMINAL LAW AND CRIMINAL PROCEDURE ISSUES**

The article investigates problematic issues of criminal legal counteraction to iatrogenic crimes. Interpretation of industry regulations leads to the conclusion that in the process of procedural verification, the investigator does not have the right to receive information that constitutes a medical secret, which prevents the correct qualification of what was done. The qualification of iatrogenic crimes requires mandatory recourse to medical law. Opening the topic, we study the work of leading Russian specialists in the field of medicine and criminal law. The paper examines the problems of judicial and investigative practice on these criminal attacks. In the course of the study, the authors point to signs of medical errors and defects in the provision of medical care, which allow us to establish General circumstances that affect the exact qualification of the crime. It is proposed to fix in the Criminal code of the Russian Federation independent elements of crimes, that is, special provisions for medical workers, which will eliminate errors in qualification.

Key words: iatrogenic crimes, medical error, iatrogenia, medical care defect.

Актуальность противодействия ятрогенным преступлениям состоит в том, что медицина и юриспруденция в жизни российского общества и государства имеют крайне важное социальное значение. Их цели и задачи тождественны – защита прав и интересов граждан. Неблагоприятным последствиям, возникающим в процессе осуществления медицинской деятельности, эксперты Всемирной организации здравоохранения дали определение «ятрогенные» (от греч. *iatros* – врач и *gennes* – порождаемый). Вышеуказанный термин постепенно закрепился в юридической литературе, а через некоторое время в уголовном праве появился термин «ятрогенные преступления», под которыми понимаются все преступления, порождае-

мые неправомерными действиями (бездействиями) медицинских работников. Данные преступления характеризуются, с одной стороны, неосторожной формой вины, а с другой – специальным субъектом, работающим в области здравоохранения, деятельность которого повлекла наступление общественно опасных последствий. От ошибок никто не застрахован, но в медицине специально создаются условия для их предотвращения.

В 2017 году в Уральском федеральном округе (далее – УрФО) было возбуждено 133 уголовных дела о преступлениях, связанных с врачебными ошибками, из них 26 в Ханты-Мансийском автономном округе (далее – ХМАО). Число преступлений, обусловленных небрежным исполнением своих профессиональных обязанностей медицинскими работниками, в 2018 году значительно возросло: в УрФО возбуждено 261 уголовное дело, из них в ХМАО – 34 уголовных дела. Сотрудниками Следственного комитета Российской Федерации (далее – Следственный комитет) был проведен комплекс профилактических мероприятий, направленных на снижение врачебных ошибок и фактов оказания некачественной медицинской помощи: приняты кадровые решения о специализации следователей по расследованию ятрогенных преступлений; проведены совещания с участием медицинских работников, в ходе которых последним разъяснена ответственность за ненадлежащее оказание медицинской помощи; в медицинские организации направлены представления о принятии мер по устранению причин и условий, способствовавших совершению ятрогенных преступлений. Вышеуказанные меры привели к снижению ятрогенной преступности в 2019 году: в УрФО возбуждено 208 уголовных дел, из них в ХМАО – 19 уголовных дел.

Противодействие преступлениям в сфере оказания медицинских услуг является одной из сложных уголовно-правовых проблем, поскольку требует уяснения бланкетного содержания статей Особенной части УК РФ, обусловленного отраслевым федеральным законодательством и иными нормативными правовыми актами, имеющими порой узкую профессиональную врачебную специализацию. Особое значение имеет и другая медицинская документация. В этой связи возникают проблемы и в области уголовного судопроизводства. В частности, проведение проверок в порядке ст. 144-145 Уголовно-процессуального кодекса Российской Федерации (далее – УПК РФ) в отношении медицинских работников отличается существенными особенностями. Поводом к проведению проверки, а при наличии оснований и к возбуждению уголовного дела чаще всего служат жалобы граждан, здоровью которых причинен вред, или родственников умерших на неправильное лечение, т. е. основанием для данных проверок должно быть как минимум причинение вреда здоровью потерпевшего. Процессуальная проверка о совершении ятрогенного преступления имеет ряд особенностей и отличается своей специфичностью, что обусловлено установлением факта ненадлежащего оказания медицинской помощи и причинно-следственной связи между непрофессиональным исполнением медицинским работником своих обязанностей и наступившими последствиями.

Процессуальная проверка проводится с привлечением специалистов узкого профиля, обладающих специальными медицинскими познаниями, а также специалистов Федеральной службы по надзору в сфере здравоохранения и социального развития (Росздравнадзор), специалистов из департамента здравоохранения (Министерство здравоохранения и социального развития РФ). При проведении процессуальной проверки для объективной оценки правомерности деятельности медицинских работников необходимо оперативно изъять медицинскую документацию пациента; материалы ведомственной проверки, проводимой местными органами здравоохранения; материалы заседаний комиссий по изучению летальных исходов в медицинской организации.

Правовая неурегулированность изъятия медицинской документации в ходе процессуальной проверки порождает проблемы в правоприменительной практике.

Согласно ч. 1 ст. 13 Федерального закона от 21.11.2011 № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» сведения о факте обращения гражданина за оказанием медицинской помощи, состоянии его здоровья и диагнозе, иные сведения, полученные при его медицинском обследовании и лечении, составляют врачебную тайну. В то же

время согласно ч. 3 ст. 13 вышеуказанного закона с письменного согласия гражданина или его законного представителя допускается разглашение сведений, составляющих врачебную тайну, другим гражданам. П. 3 ч. 4 ст. 13 вышеуказанного закона уполномочивает сотрудников медицинского учреждения предоставлять сведения, составляющие врачебную тайну, без согласия гражданина или его законного представителя по запросу органа следствия в связи с проведением расследования или судебным разбирательством.

Исходя из вышеизложенного, следователь не вправе получить сведения, составляющие врачебную тайну, в ходе доследственной проверки сообщения о преступлении. Истребование медицинских документов возможно только в рамках возбужденного уголовного дела и только в виде следственного действия на основании судебного решения в соответствии со ст. 165, 183 УПК РФ по аналогии с изъятием документов в инспекциях ФНС, содержащих налоговую тайну, и изъятием документов, составляющих банковскую тайну.

Для разрешения вопроса о наличии или отсутствии оснований для возбуждения уголовного дела в большинстве случаев требуется заключение комиссионной судебно-медицинской экспертизы, проведение которой возможно при наличии оригиналов медицинской документации у следователя. Получение медицинской документации должно быть произведено как можно быстрее, так как нельзя исключать возможность фальсификации сведений, содержащихся в ней, и их умышленную утрату [1].

В настоящее время изъятие медицинской документации надлежащим образом не урегулировано, в связи с чем нередко возникают ситуации, связанные с отказом медицинских учреждений предоставлять сведения, составляющие врачебную тайну, органам следствия по запросам, направленным в ходе доследственной проверки сообщения о преступлении. По нашему мнению, необходимо внести соответствующие изменения в Федеральный закон «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» и УПК РФ: предусмотреть возможность изъятия следователем (дознавателем) при проверке сообщения о преступлении необходимой медицинской документации по судебному решению путем производства выемки либо по запросу.

При расследовании ятрогенных преступлений и доказывании вины медицинского работника в наступлении неблагоприятных для здоровья пациента последствий либо его смерти важное значение имеет заключение комиссионной судебно-медицинской экспертизы. Производство данной экспертизы сопряжено с разрешением целого ряда узкоспециальных вопросов медицинского характера. Для проведения комиссионной судебно-медицинской экспертизы привлекаются квалифицированные врачи-специалисты различных профилей (акушеры-гинекологи, хирурги, невропатологи, инфекционисты, неврологи, эндокринологи, реаниматологи и другие). При выборе экспертного учреждения для проведения экспертизы необходимо учитывать требования ст.ст. 60, 70 УПК РФ, которые касаются незаинтересованности и независимости экспертов. Целесообразно для проведения комиссионной судебно-медицинской экспертизы выбирать экспертное учреждение, расположенное на территории другого субъекта РФ, нежели где находится медицинское учреждение, в котором проходил лечение пациент, что связано с медицинской солидарностью и коллегиальным взаимодействием в медицинской среде. Только в условиях непредвзятости и беспристрастности заключение комиссионной судебно-медицинской экспертизы будет объективным.

В основу большинства обвинительных приговоров ложится заключение данной экспертизы, которое подтверждает наличие причинно-следственной связи между действиями врача и наступившими тяжкими последствиями у пациента либо его смертью.

Так, в соответствии с приговором Минераловодского городского суда Ставропольского края от 16.01.2019 Хубиев А. М., являющийся врачом-терапевтом ГБУЗ СК «Минераловодская районная больница», признан виновным в совершении преступления, предусмотренного ч. 2 ст. 109 УК РФ, и ему назначено наказание в виде ограничения свободы сроком на 1 год. Как указано в приговоре: «согласно заключению комиссионной судебно-медицинской экспертизы № 200 от 22.03.2018 и заключению дополнительной комиссионной судебно-

медицинской экспертизы № 704 от 18.10.2018, 31.10.2017 до 09 часов 32 минуты наступила смерть Г. в результате ишемической болезни сердца, осложнившейся развитием острой коронарной недостаточности. Больной Г с ЭКГ-признаками мерцательной тахикардии и очаговыми изменениями в миокарде левого желудочка нуждался в госпитализации в стационар в 03 часа 20 минут 31.10.2017. Отказ врача- терапевта ГБУЗ СК «Минераловодская РБ» Хубиева А. М. от госпитализации Г. вызвал развитие у больного острой сердечно-сосудистой недостаточности тяжелой степени, то есть здоровью Г. причинен тяжкий вред по квалифицирующему признаку развития угрожающего жизни состояния и расстройства жизненно важных функций организма, в связи с чем отказ Хубиева А. М. в госпитализации не обоснован и привёл к смерти больного. Между отказом врача-терапевта Хубиева А. М. в госпитализации в стационар больного Г. и наступлением смерти больного имеется прямая причинно-следственная связь» [5].

В данном случае следователи, изучив заключение комиссионной судебно-медицинской экспертизы № 200 от 22.03.2018, для полноты следствия приняли решение в ходе следствия провести дополнительную комиссионную судебно- медицинскую экспертизу, которая подтвердила наличие причинно-следственной связи между смертью больного Г. и действиями врача-терапевта Хубиева А. М.

Например, приговором Волгодонского районного суда Ростовской области от 23.08.2017 Малинин А. Н., являющийся врачом-онкологом ГБУ РО «Онкологический диспансер», признан виновным в совершении преступления, предусмотренного ч. 2 ст. 109 УК РФ, и ему назначено наказание в виде ограничения свободы сроком на 2 года. Как указано в приговоре: «согласно выводам заключения судебно-медицинской экспертизы №-пк от ДД.ММ.ГГГГ и заключения №-пк от ДД.ММ.ГГГГ экспертной комиссией выявлены дефекты оказания медицинской помощи гр-ну Б. на этапе реализации оперативного вмешательства для удаления полипа ободочной кишки ГБУ РО «Онкологический диспансер» в виде своевременно не диагностированных электроожогов серозной ободочной и тонкой кишки, а также своевременно не диагностированного в послеоперационном периоде развившегося гнойно-септического состояния – фибринозно-гнойного перитонита.

Выявленные экспертами дефекты оказания медицинской помощи Б. в ГБУ РО «Онкологический диспансер» привели в дальнейшем к развитию у гр-на Б перфораций стенок ободочной и тонкой кишки с развитием разлитого фибринозно-гнойного перитонита – состояний, опасных для жизни человека. Между обнаруженными экспертной комиссией дефектами оказания медицинской помощи Б. в ГБУ РО «Онкологический диспансер» и наступлением тяжких последствий в виде развившегося разлитого фибринозно-гнойного перитонита, приведшего к наступлению его смерти, имеется прямая причинно-следственная связь» [6].

Обязательным условием является установление экспертной комиссией наличия или отсутствия прямой причинной связи, а также косвенной причинной связи между действием (бездействием) медицинского работника и наступлением у пациента неблагоприятного исхода в соответствии с общепринятыми в медицине представлениями об этиологии, патогенезе, клинической картине и лечении заболевания, травмы, состояния у конкретного пациента. В процессе проведения судебно-медицинской экспертизы экспертная комиссия руководствуется приказом Министерства здравоохранения РФ от 10.05.2017 № 203н «Об утверждении критериев оценки качества медицинской помощи», анализирует соблюдение порядков оказания медицинской помощи, стандартов медицинской помощи и клинических рекомендаций (протоколов лечения).

Также при расследовании ятрогенных преступлений обязательной для назначения является технико-криминалистическая экспертиза с целью установления фактов изменения первоначального содержания медицинских документов. При визуальном осмотре и обнаружении признаков фальсификации (приписок, дописок, исправлений) документов необходимо назначение технико-криминалистического исследования документов, на разрешение которого целесообразно поставить вопросы: не проводилось ли изменение первоначального содер-

жания документа; одним или разными красителями выполнены записи на представленной странице; не выполнен ли фрагмент на представленной странице после того, как был составлен основной текст; что выполнено раньше – текст документа или подпись и другие.

На сегодняшний день актуальной является проблема квалификации ятрогенных преступлений, поскольку отсутствует специальная статья, регламентирующая ответственность медицинских работников за ненадлежащее исполнение своих профессиональных обязанностей, повлекшее вред здоровью или смерть потерпевшего.

В настоящее время факты ненадлежащего оказания медицинской помощи квалифицируются по статьям УК РФ: ст. 109 «Причинение смерти по неосторожности», ст. 118 «Причинение тяжкого вреда по неосторожности», ст. 124 «Неоказание помощи больному», ст. 293 «Халатность», ст. 238 «Выполнение работ, оказание услуг, не отвечающих требованиям безопасности».

В большинстве случаев неправомерные действия медицинских работников квалифицируются по ч. 2 ст. 109 УК РФ или ст. 118 УК РФ. Указанные статьи имеют достаточно общую формулировку. В некоторых субъектах РФ факты ненадлежащего оказания медицинской помощи квалифицируются по ст. 238 УК РФ.

Исходя из анализа ст. 238 УК РФ, следует отметить, что данная статья включена в главу 25 УК РФ, устанавливающую ответственность за посягательства на здоровье населения и общественную нравственность. Объектом преступления является здоровье населения. Особенность преступлений против здоровья населения заключается в том, что они посягают на безопасность здоровья не отдельного человека (персонифицированной личности), а многих лиц, составляющих население страны. А объектом ятрогенных преступлений является жизнь и здоровье конкретного человека, пострадавшего в результате неправомерных действий медицинского работника.

Объективная сторона преступления, предусмотренного ст. 238 УК РФ, выражена такими действиями, как выполнение работ или услуг, не отвечающих требованиям безопасности жизни и здоровья потребителей. Основанием для определения оценки качества «услуги, не отвечающие требованиям безопасности» являются положения Закона РФ от 07.02.1992 г. «О защите прав потребителей».

Согласно пункту № 6 постановления Пленума Верховного Суда Российской Федерации от 25.06.2019 г. № 18 «О судебной практике по делам о преступлениях, предусмотренных ст. 238 УК РФ» деяния, перечисленные в ст. 238 УК РФ, характеризуются умышленной формой вины. В связи с этим при решении вопроса о наличии в действиях лица состава преступления суду необходимо установить, что несоответствие выполнения работ или оказания услуг требованиям безопасности охватывалось его умыслом. Если в результате выполнения работ и оказания услуг, не отвечающих требованиям безопасности, причиняются по неосторожности тяжкий вред здоровью либо смерть, то в целом такое преступление признается совершенным умышленно (ст. 27 УК РФ).

Согласно ст. 27 УК РФ, если в результате совершения умышленного преступления причиняются тяжкие последствия, которые по закону влекут более строгое наказание и которые не охватывались умыслом лица, уголовная ответственность за такие последствия наступает только в случае, если лицо предвидело возможность их наступления, но без достаточных к тому оснований самонадеянно рассчитывало на их предотвращение, или в случае, если лицо не предвидело, но должно было и могло предвидеть возможность наступления этих последствий. В целом такое преступление признается совершенным умышленно.

Врач при оказании медицинской помощи пациенту, исходя из своей квалификации и опыта, уверен, что его действия верные и наиболее благоприятные в сложившейся ситуации для пациента. Он не имеет умысла на наступление общественно опасных последствий для пациента и не желает этого. Вывод, который можно сделать из этого, что п. «в» ч. 2 ст. 238 УК РФ неприменим к медицинскому работнику бюджетного учреждения, оказывавшему медицинскую помощь пациенту, так как содержит в себе состав умышленного преступления,

заклучавшегося в осознанном совершении действия, представляющего опасность для пациента, который у медицинского работника де-факто отсутствует.

Ввиду особенностей юридической конструкции состава преступления, предусмотренного п. «в» ч. 2 ст. 238 УК РФ (статья преступления с двумя формами вины – ст. 27 УК РФ), при неосторожном причинении тяжкого вреда здоровью или смерти пациенту медицинский работник должен умышленно создавать угрозу жизни или здоровью пациента, оказывая медицинскую помощь с нарушением правил и требований безопасности. Учитывая цели и задачи медицинской деятельности, вышеуказанный случай является недопустимым и маловероятным.

Например, по ст. 238 УК РФ можно квалифицировать действия медицинского работника в случае небезопасного использования медицинских изделий, так как врач в данном случае умышленно выполнял услугу, не отвечающую требованиям безопасности жизни и здоровья потребителей. Все дефекты оказания медицинской помощи как процесса надлежит квалифицировать по статьям Уголовного кодекса РФ, предусматривающим ответственность за преступления против жизни и здоровья.

Баринев Е. Х., Гецманова И. В., Поздеев А. Р. смоделировали следующие ситуации, потенциально подпадающие под состав преступления, предусмотренный ст. 238 УК РФ: использование неисправной диагностической аппаратуры, создающей опасность поражения электрическим током; применение запрещенного способа введения лекарственных средств. Указанные авторы обращают внимание на одно условие, при котором действия врача могут быть квалифицированы как оказание услуг, не отвечающих требованиям безопасности, – осведомленность врача об этих изъянах [2].

Статья 238 УК РФ нашла свое широкое распространение в правоприменительной практике ввиду несовершенства конструкций ст. 109, 118, 124 и других статей УК РФ. Одни и те же действия медицинских работников в разных регионах страны могут квалифицироваться и по ст. 238 УК РФ, и по ст. 109 УК РФ. Однако в качестве критериев разграничения рассмотренных составов преступлений можно предложить объект преступления и субъективную сторону преступлений, которая применительно к ст. 238 УК РФ имеет форму умысла, а к составам ст.ст. 109, 118 УК РФ – неосторожности.

Довольно часто в связи с длительностью предварительного следствия подсудимые, по которым постановлены обвинительные приговоры, освобождаются от уголовного наказания по истечении срока давности уголовного преследования. Длительность предварительного следствия по ятрогенным преступлениям обусловлена правовой и фактической сложностью уголовных дел данной категории, проведением ряда сложных объемных экспертиз, в том числе комиссионных, требующих участия специалистов в различных областях, допросами множества свидетелей, установлением лица, подлежащего в качестве обвиняемого, а также проведением иных следственных действий.

В соответствии с приговором Новгородского районного суда от 27.12.2019 акушер-гинеколог Яковлева А. признана виновной в совершении преступлений, предусмотренных ч. 2 ст. 118 УК РФ и ч. 2 ст. 109 УК РФ. В ходе предварительного следствия и в судебном заседании было установлено, что 14.10.2015 Яковлева А., исполняя должностные обязанности врача акушера-гинеколога ГОБУЗ «Областной клинический родильный дом», являлась лечащим врачом роженицы ХХХ, в нарушение Положения № 5 к Порядку оказания медицинской помощи по профилю «Акушерство и гинекология» Министерства здравоохранения РФ необоснованно выбрала консервативную тактику ведения родов потерпевшей ХХХ через естественные пути, что повлекло за собой причинение тяжкого вреда здоровью потерпевшей ХХХ и, как следствие, смерть ребенка. Яковлевой А. по совокупности преступлений назначено наказание в виде ограничения свободы на срок 2 года 6 месяцев.

Однако в связи с истечением сроков давности, в соответствии с п. 3 ч. 1 ст. 24 УПК РФ Яковлева А. освобождена от наказания. Таким образом, де-факто за совершение ятрогенного преступления, которое повлекло тяжкие последствия для роженицы и смерть новорожденно-

го, Яковлева А. наказание не понесла, что является существенным нарушением принципа неотвратимости уголовно-правового воздействия, то есть принцип неотвратимости наказания в уголовном праве.

При этом виновное лицо, освободившееся от наказания, продолжает осуществлять медицинскую деятельность, ввиду истечения сроков давности на лицо невозможно наложить как основное, так и дополнительное наказание в виде лишения права занимать определенные должности или заниматься определенной деятельностью, указанное в ст. 47 УК РФ.

Согласно ст. 78 УК РФ лицо освобождается от уголовной ответственности, если со дня совершения преступления истекло 2 года после совершения преступления небольшой тяжести; 6 лет после совершения преступления средней тяжести; 10 лет после совершения тяжкого преступления и 15 лет после совершения особо тяжкого преступления.

15.07.2019 приговором Няганского городского суда Сиволапов В. В., занимающий должность врача-хирурга дежурной бригады врачей для оказания экстренной медицинской помощи приемного отделения БУ ХМАО-Югры «Няганская окружная клиническая больница», признан виновным в совершении преступления, предусмотренного ч. 2 ст. 109 УК РФ. Сиволапову В. В. назначено наказание – 2 года 6 месяцев ограничения свободы с лишением права заниматься врачебной деятельностью на срок 3 года. Однако на основании п. «а» ч. 1 ст. 78 УК РФ и п. 3 ч. 1 ст. 24 УПК РФ Сиволапов В. В. освобожден от отбывания назначенного наказания.

По преступлению, предусмотренному ч. 2 ст. 109 УК РФ, являющемуся преступлением небольшой тяжести, срок исковой давности составляет 2 года.

Так, в приемное отделение БУ ХМАО-Югры «Няганская окружная больница» в ночь с 13 на 14 апреля 2016 года поступил пациент Б. в компенсированном состоянии (состояние средней тяжести). Сиволапов В. В., являющийся его лечащим врачом, не провел ультразвукового исследования, не выполнил диагностическую лапароскопию, а также лапаротомию с целью исключения внутрибрюшного кровотечения и перевел пациента в наркологическое отделение. Пациент Б. нуждался в хирургическом вмешательстве в виде ушивания разрыва стенки мочевого пузыря и остановки внутрибрюшного кровотечения. Утром в 6 часов 35 минут пациент Б. скончался [7].

Несмотря на все вышеуказанные дефекты, которые состоят в причинно-следственной связи со смертью пациента, хирург Сиволапов В. В. освобожден от наказания.

Считается необходимым внести изменения в санкцию ч. 2 ст. 109 УК РФ применительно к наказанию в виде лишения свободы, которое увеличить на срок до 5 лет, таким образом преступление перейдет в разряд преступлений средней тяжести и срок исковой давности составит 6 лет.

Если ставить вопрос о гуманности увеличения санкции по ч. 2 ст. 109 УК РФ, то данный вопрос себя оправдывает, поскольку согласно ч. 3 ст. 15 УК РФ: «преступлениями средней тяжести признаются неосторожные деяния, за совершение которых максимальное наказание не превышает 10 лет лишения свободы».

В данном случае срок исковой давности по преступлению, предусмотренному ч. 2 ст. 109 УК РФ, позволит привлечь к уголовной ответственности и наказанию медицинских работников, в чьих действиях имеется состав преступления.

В 2019 году Следственный комитет Российской Федерации и представители Национальной медицинской палаты предложили дополнить Уголовный кодекс РФ новыми статьями для квалификации врачебных ошибок: ст. 124¹ «Ненадлежащее оказание медицинской помощи (медицинской услуги)», 124² «Соккрытие нарушения оказания медицинской помощи». Вышеуказанные нововведения одобрения не нашли и были забыты.

Введение самостоятельных составов преступлений, то есть специальных положений в отношении медицинских работников, позволит исключить ошибки квалификации преступлений, полноценно развиваться судебной практике и глубокой теоретической базе для уголовно-правовой и криминалистической оценки сложных и труднодоказуемых в силу своей спе-

цифики преступлений. В настоящее время ни одна из статей Уголовного кодекса Российской Федерации не учитывает особенности профессиональной медицинской деятельности, судебная практика не имеет единообразия, поскольку на стадии следствия затруднительно квалифицировать тот либо иной случай некачественного оказания медицинской помощи, чтобы это соответствовало как совершенному деянию, так и его последствиям.

Литература

1. Багмет, А. М. Тактика и методика расследования причинения смерти по неосторожности вследствие ненадлежащего исполнения медицинскими работниками своих профессиональных обязанностей / А. М. Багмет, Л. И. Черкасова. – Москва, 2013. – 138 с. – Текст : непосредственный.
2. Баринов, Е. Х. Практика применения специальных познаний судебной медицины в суде : монография / Е. Х. Баринов, И. В. Гецманова, А. Р. Поздеев. – Москва : Проспект, 2017. – 176 с. – ISBN 978-5-392-24627-4. – Текст : непосредственный.
3. О некоторых вопросах применения судами Конституции Российской Федерации при осуществлении правосудия : постановление Пленума Верховного Суда Российской Федерации от 31 октября 1995 года (ред. от 16.04.2013 № 9). – Текст : электронный // Гарант. – URL: <https://base.garant.ru/10103328/> (Дата обращения: 03.07.2020).
4. О судебной практике по делам о преступлениях, предусмотренных ст. 238 УК РФ : постановление Пленума Верховного Суда Российской Федерации от 25.06.2019 № 18. – Текст : электронный // Гарант. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72180394/> (Дата обращения: 03.07.2020).
5. Уголовное дело № 1-50/2019. – Текст : электронный // Минераловодский городской суд Ставропольского края. – URL: <https://clck.ru/PRX6W> (Дата обращения: 03.07.2020).
6. Уголовное дело № 1-234/2017. – Текст : электронный // Архив Волгодонского районного суда Ростовской области. – URL: <https://clck.ru/PRXq3> (Дата обращения: 03.07.2020).
7. Приговор Няганского городского суда от 15 июля 2019 г. по делу № 1-16/2019. – Текст : электронный // Судебные и нормативные акты РФ. – URL: <https://sudact.ru/regular/doc/iAmB5eb5b7N1/> (Дата обращения: 03.07.2020).
8. О Следственном комитете Российской Федерации : федеральный закон от 28 декабря 2010 года № 403-ФЗ. – Текст : электронный // КонсультантПлюс. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_108565/ (Дата обращения: 03.07.2020).
9. Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации : федеральный закон от 21 ноября 2011 года № 323-ФЗ (с изм. и доп.). – Текст : электронный // КонсультантПлюс. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_121895/ (Дата обращения: 03.07.2020).

Ю. В. Хармаев, Ж. А. Васильева

**ВОПРОСЫ ВИКТИМНОГО ПОВЕДЕНИЯ ГРАЖДАН
КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРОВОДИМЫХ НАУЧНЫМИ КОЛЛЕКТИВАМИ
ПРИГРАНИЧНЫХ ГОСУДАРСТВ**

В предлагаемой статье авторы предметом исследования определяют современные проблемы виктимности граждан приграничных государств (России и Монголии). Данная проблема актуальна в связи с тем, что с 2014 года между двумя соседними государствами был снят визовый режим, который предопределил повышенный поток туристов в оба направления. В целях определения факторов виктимизации иностранных граждан в стране пребывания автором были использованы как общенаучные, так и специальные методы познания, в том числе сравнительно-правовой, статистический, системный, документальный и др. В результате исследования специальной литературы, статистических данных правоохранительных органов, материалов уголовных дел были сделаны определенные выводы, установлены основные направления преступного посягательства в отношении иностранных граждан, а также определены меры профилактического характера по недопущению или сокращению подобных случаев и минимизации преступных последствий в отношении иностранных граждан на территории Российской Федерации.

Ключевые слова: виктимность, криминология, исследования, приграничные государства, Монголия.

Yu. V. Kharmaev, Zh. A. Vasilyeva

**ISSUES OF VICTIM BEHAVIOR OF CITIZENS AS AN OBJECT
OF RESEARCHES CONDUCTED BY SCIENTIFIC COLLECTIVES
OF BORDER STATES**

In this article, the authors of the study determine the current problems of victimization of citizens of border states (Russia and Mongolia). This problem is relevant due to the fact that since 2014 a visa regime was lifted between two neighboring states, which predetermined an increased flow of tourists in both directions. In order to determine the factors of victimization of foreign citizens in the host country, the author used both general scientific and special methods of cognition, including comparative legal, statistical, systemic, documentary, etc. As a result of a study of special literature, statistical data of law enforcement agencies, materials of criminal cases, certain conclusions were drawn, the main directions of criminal attacks against foreign citizens were established, and preventive measures were identified on the nature of preventing or reducing such cases and minimizing criminal consequences in relation to foreign citizens in the territory of the Russian Federation.

Key words: victimization; criminology; research; border states; Mongolia.

Введение

В юридической литературе нередко в последнее время поднимается вопрос о распространении очагов межнациональных конфликтов, усилении ксенофобии в российском обществе, а также возможности государства адекватно реагировать на эти негативные проявления [1, с. 8]. В рамках же нашего исследования следует обратить внимание еще на один аспект – проблему виктимности иностранных граждан.

Следует согласиться с мнением большого количества ученых и экспертов по данной проблематике, что миграционные процессы и все, что с ними связано, очень актуальны и злободневны в настоящий период [2, с. 36]. Криминологи традиционно рассматривают индивидуальный уровень виктимности (в зависимости от направления преступного посягательства) и коллективный (где рассматривается в том числе и виктимизация социально-этнических общностей). Все это очень характерно для такой социальной общности, как мигранты.

Проблема стихийных миграционных процессов в европейских и других регионах спровоцировала не только критику, но и порой негативное отношение к вопросам глобализации и интеграции, о чем свидетельствуют данные в средствах массовой информации и результаты изучения общественного мнения населения многих государств [3]. Современные миграционные проблемы имеют ярко выраженные экономические, политические и социальные оттенки и вследствие этого справедливо понимаются многими государствами как транснациональная проблема.

Несмотря на такой современный тренд, все же считаем, что необходимость унификации и приведения к единообразной форме национальных законодательств в международных отношениях все еще остается востребованной [7, с. 85; 6, с. 275]. Особенно это касается приграничных государств (например, России и Монголии), когда различия в нормах национальных правовых систем значительно затрудняют процедуру реализации международных договоров, так и простое общение граждан соседних государств на бытовом уровне. Монголия исторически соседствует с Россией с юго-восточной стороны, ее история, культура, обычаи и традиции давно тесно переплетены с населением прибайкальских и забайкальских регионов Бурятии, Тывы, Иркутской области, Забайкальского края Российской Федерации.

Результаты и обсуждение

Как отмечает политолог В. А. Родионов, «именно Россия уже в силу географического соседства объективно является самой заинтересованной стороной в деле удержания Монголии вне сферы монопольного китайского влияния» [8, с. 137]. Активизация российско-монгольских отношений предопределена текущими геополитическими соображениями, взаимовыгодными межгосударственными проектами последних лет, в том числе и в области образования и науки [9, с. 3; 10, с. 184]. Области применения достаточно широки: от развития международных экономических проектов до совместных научных разработок.

В условиях обострившейся политической обстановки, значительно сузившихся контактов России со странами Запада и другими международными организациями, национальная государственная внешняя политика направлена на расширение международных отношений со странами Азиатско-Тихоокеанского региона. Ученые Бурятского государственного университета в ходе своей научной деятельности давно используют уникальнейшие возможности своего географического, исторического и культурного положения и связей с Монголией в целях реализации международной российской политики в юго-восточном направлении.

Одним из примеров международного сотрудничества в научно-исследовательской деятельности можно привести поддержанный грант РФФИ¹ по защите прав и свобод граждан приграничных государств, временно находящихся на территории соседних стран.

Как и предполагали члены коллектива, статистические данные и материалы судебно-следственной и правоприменительной практики приграничных государств показали стабильный рост правонарушений, совершенных гражданами соседних государств в рассматриваемый период. В связи с увеличением потока туристов не вызывает удивления ситуация, когда административные правонарушения и уголовные дела, по статистическим данным правоохранительных органов, изменились в сторону увеличения. Объективные предпосылки

¹ Творческий коллектив БГУ совместно с учеными из Монголии выполнял задание по гранту РФФИ № 16-23-03006 «Защита прав и законных интересов граждан Монголии на территории Российской Федерации и граждан России на территории Монголии» (2016–2018 гг.).

такого состояния правоприменительной практики кроются, в первую очередь, в связи со снятием визового режима между двумя странами в 2014 году.

Наблюдаемый рост нарушений законодательства во многих случаях был спровоцирован отнюдь не умышленным противоправным поведением, а в большинстве своем незнанием нормативно-правовой базы приграничных государств, элементарной недооценкой правовых предписаний и запретов. В связи с этим перед коллективом была поставлена задача: в простой форме, без юридических и научных тонкостей дать приезжающим гостям ознакомиться с базовыми положениями административного, уголовного и другого законодательства. Следует учесть, что приезжающие гости из соседних государств (Монголия, Китай) прибывают в основном для туристических целей (отдых на Байкале, шопинг и др.), то есть на небольшой промежуток времени.

В качестве профилактических мероприятий стояла задача провести с иностранными гражданами занятия в доступной форме по повышению их уровня правового просвещения. Авторами были разработаны памятки, брошюры, буклеты, разъясняющие типичные ситуации по самым актуальным проблемам иностранных граждан в стране пребывания, с указанием адресов, телефонов экстренных и компетентных служб. Для удобства пребывания иностранных граждан на территории России информация по защите их прав и законных интересов была опубликована на трех языках (русском, монгольском, английском) не только на бумажных носителях, но и выложена в электронном виде в социальных сетях.

Удобство для приезжающих заключается в том, чтобы туристы, находящиеся в стране пребывания, могли не только прочитать информацию в бумажном варианте, но и воспользоваться указанными ссылками на нормативно-правовые источники, регулирующие те или иные практические ситуации.

Были подготовлены материалы и по более узким направлениям, например, как противостоять возможным коррупционным проявлениям со стороны правоохранительных и правоприменительных органов и куда обращаться в случае создавшейся ситуации на территории Российской Федерации. В связи с тем, что материалы административной практики показывают высокий уровень правонарушений, совершенных иностранными гражданами на территории Бурятии в сфере безопасности дорожного движения, аналогичные памятки были подготовлены авторским коллективом и на эту тематику [11, с. 3].

Думается, что предложенные меры для иностранных граждан должны оказать помощь им в сложной ситуации, а в случае совершения в отношении них более серьезных противоправных посягательств предоставят им возможность своевременно обратиться в компетентные органы для реализации своих прав и законных интересов.

Научная новизна исследования заключается в разработке концептуальных вопросов защиты основных прав и свобод иностранных граждан в стране пребывания (на примере России и Монголии), основанных на межотраслевом и комплексном подходе. Ранее в юридической науке как Российской Федерации, так и Монголии защита прав и законных интересов иностранных граждан в стране пребывания выступала объектом исследования разных отраслей, таких как уголовное право, конституционное право, уголовно-исполнительное право, гражданское право, административное право и др. [12, с. 4]. Комплексный подход решения данной проблемы позволит устранить существующий правовой пробел и выразить надежду в практической ее применимости.

Вышеотмеченная концепция рассматривает межотраслевой принцип защиты прав и свобод иностранных граждан в стране пребывания. Подготовленные коллективом авторов теоретические разработки и рекомендации в виде памяток, буклетов, брошюр на разных языках отражают специфику разных отраслей, таких как гражданское, административное, конституционное, уголовное право и др., которые уже получили положительные отзывы от граждан, посещающих с визитом приграничные государства.

Доктрина защиты прав и свобод иностранных граждан в стране пребывания строится на изучении региональной правоприменительной практики в конкретно взятом регионе (Рес-

публике Бурятия), статистики, результатов эмпирического исследования и анализа теоретических работ как в России, так и в Монголии. В ходе выполнения задания силами участников гранта опубликованы труды², среди которых коллективная монография; 2 статьи в рецензируемых журналах Scopus; 9 статей, индексируемых в ВАК; 8 статей, индексируемых в РИНЦ [11; 13; 14; 15].

Заключение и выводы

Разработанный коллективом авторов инструментарий, а также совокупность использованных методов и средств правового просвещения иностранных граждан, памятки-брошюры (на трех языках, на бумажных носителях и их электронные версии) и коллективная монография по итогам исследования – все это может быть использовано заинтересованными практическими органами, что подчеркивает прикладной характер проведенного исследования. Например:

- правоохранительными органами в рамках профилактики правонарушений и преступлений в сфере миграции;
- органами исполнительной власти, органами местного самоуправления для оптимизации и совершенствования деятельности по реализации миграционной политики на местах, в том числе органами исполнительной власти регионов, соседствующих с Монголией (Иркутская область, Республика Бурятия, Республика Тыва, Забайкальский край) для совершенствования существующих институтов социально-экономической поддержки и помощи мигрантам;
- организациями в сфере туризма в целях совершенствования деятельности в области туриндустрии;
- общественными объединениями и организациями, занятыми проблемами оказания помощи иностранным гражданам и организациям, в частности гражданам Монголии;
- в процессе преподавания в юридических вузах;
- рядовыми гражданами обоих государств (Российской Федерации и Монголии), посещающих соседнее государство.

В ходе исследования использовались общенаучные и специально-криминологические методы исследования: анализа и синтеза, исторические, статистические, сравнительные, анкетирование, интервьюирование как граждан Монголии, так и граждан Российской Федерации. Полагаем, что те меры, предложенные авторским коллективом для приезжающих туристов, помогут разобраться им в сложной ситуации, а в случае совершения в отношении них более серьезного противоправного посягательства предоставят возможность своевременно обратиться в компетентные органы для реализации своих законных интересов и прав.

Литература

1. Авдеев, В. А. Уголовно-правовая политика РФ в сфере противодействия преступности в условиях глобализации / В. А. Авдеев, О. А. Авдеева. – Текст : непосредственный // Вестник Югорского государственного университета. – 2018. – № 2 (49). – С. 9–17.

² По результатам научного исследования авторами подготовлена и опубликована коллективная монография: Защита прав и законных интересов граждан Монголии на территории Российской Федерации и граждан России на территории Монголии: монография / под общ. ред. д.ю.н., проф. Ю. П. Гармаева. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2018. – 193 с.; Garmaev Y.P., Kharmaev Y.V., Chumakova L.P. The inter-branch concept of protecting the rights and legitimate interests of the citizens of Mongolia in the territory of the Russian Federation and the citizens of Russia in the territory of Mongolia. *Espacios*. 2018. T. 39. N 18. P. 35.; Garmaev Y.P., Kharmaev Y.V., Gantulga N. Mongolian trace in the criminal penalties institute in Burayt society of the Russian Empire in XIX century // *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018. T. 7. N 4. P. 174-178. и др.

2. Авдеев, В. А. Правовая политика РФ в сфере обеспечения национальной и международной безопасности: основные направления противодействия контрабанде / В. А. Авдеев, О. А. Авдеева. – Текст : непосредственный // Стратегические направления противодействия преступности на национальном и транснациональном уровнях : сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции / под научной редакцией В. А. Авдеева, С. В. Розенко. – 2019. – С. 36–49.
3. Ростовский, Я. О критике глобализации / Я. О. Ростовский. – Текст : электронный // Общая тетрадь : вестник школы гражданского просвещения. – URL: <http://otetrad.ru/article-1515.html> (дата обращения: 10.10. 2019).
4. Гантулга, Н. Проблемы приграничного сотрудничества с Монголией в контексте миграционной политики государства на современном этапе / Н. Гантулга, Ю. В. Хармаев. – Текст : непосредственный // Вестник Восточно-Сибирского института Министерства внутренних дел России. – 2016. – № 4 (79). – С. 33– 40.
5. Комиссия по предупреждению преступности и уголовному правосудию принимает меры для борьбы с незаконным ввозом мигрантов. – Текст : электронный // Организация объединенных наций. – URL: <https://www.unodc.org/unodc/ru/frontpage/2014/May/crime-commission-tackles-migrant> (дата обращения: 11.10. 2019).
6. Хармаев, Ю. В. Проблемы совершенствования уголовно-исполнительной системы по законодательству России и Монголии / Ю. В. Хармаев. – Текст : непосредственный // Вестник Бурятского государственного университета. – 2012. – № 2. – С. 275–277.
7. Руденко, М. Н. Миграционные процессы в условиях глобализации и их влияние на региональную стабильность / М. Н. Руденко. – Текст : непосредственный // Вестник Астраханского технического университета. – 2015. – № 1 (59). – С. 85–96.
8. Родионов, В. А. Национальная безопасность Монголии в контексте отношений с Россией / В. А. Родионов. – Текст : непосредственный // Власть. – 2013. – Том. 21. – № 2. – С. 137–140.
9. Самбуудаваа, М. Российско-монгольские отношения в конце XX – начале XXI вв. : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата исторических наук / М. Самбуудаваа. – Астрахань, 2011. – 18 с. – Текст : непосредственный.
10. Эрдэнэбаяр, Г. Взаимодействие России и Монголии в области образования и науки / Г. Эрдэнэбаяр. – Текст : непосредственный // Вестник РУДН. Серия: Всеобщая история. – 2017. – Т. 9. – № 2. – С. 184–192.
11. Хорлоо Гэрэлчулуун. Монголия как субъект международно-правовых отношений в области прав человека и трудовой миграции : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата юридических наук / Хорлоо Гэрэлчулуун. – Москва, 2010. – 27 с. – Текст : непосредственный.
12. Защита прав и законных интересов граждан Монголии на территории Российской Федерации и граждан России на территории Монголии : монография / под общей редакцией Ю. П. Гармаева. – Улан-Удэ : Издательство Бурятского госуниверситета, 2018. – 193 с. – Текст : непосредственный.
13. Memo for Mongolian citizens in the territory of Russia. Prevention of corruption: study-practical guide / Y. P. Garmaev [et al.]. – Edition 3. – Ulan-Ude : Publishing house of Buryat State University, 2017. – 10 p.
14. Garmaev, Y. P. The inter-branch concept of protecting the rights and legitimate interests of the citizens of Mongolia in the territory of the Russian Federation and the citizens of Russia in the territory of Mongolia / Y. P. Garmaev, Y. V. Kharmayev, L. P. Chumakova // Revista Espacios digital. – 2018. – Vol. 39. – № 18. – P. 35.
15. Garmaev, Y. P. Mongolian trace in the criminal penalties institute in Burayt society of the Russian Empire in XIX century / Y. P. Garmaev, Y. V. Kharmayev, N. Gantulga // International Journal of Engineering and Technology (UAE). – 2018. – Vol. 7. – № 4. – P. 174–178.



ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Е. И. Сафонов, Д. В. Шиленков, И. Е. Кузнецова

**АВТОМАТИЗАЦИЯ СОСТАВЛЕНИЯ СПРАВКИ ОБ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИЕЙ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ОБУЧЕНИЯ**

В статье приводится описание автоматизации процесса составления справок об обеспеченности учебно-методической документацией образовательной программы преподавателями Югорского государственного университета. В настоящее время преподаватели заполняют справку вручную в соответствии с рабочей программой дисциплин и учебным планом. При ручном заполнении имеется большая вероятность совершения ошибок, указания недопустимой литературы, недостаточного количества изданий и прочих недочетов. Автоматизация процесса составления справки об обеспеченности учебно-методической документацией образовательной программы позволяет заполнять большинство динамических полей за преподавателя автоматически. Для автоматизации описанного процесса было принято решение разработать веб-приложение. Авторами приводится обзор аналогов. Проведено исследование системы автоматизации библиотек ИРБИС и баз данных электронного каталога Научной библиотеки Югорского государственного университета. Приводится описание используемых при разработке веб-приложения технологий и языков.

Ключевые слова: веб-приложение, MVC, PHP, Laravel Framework, ИРБИС, книгообеспеченность, система автоматизации библиотек.

E. I. Safonov, D. V. Shilenkov, I. E. Kuznetsova

**AUTOMATION OF THE PROCESS TO PREPARE A REFERENCE ON TEACHING-
METHODOICAL DOCUMENTATION OF AN EDUCATIONAL PROGRAM**

The article describes the automation process of preparation references on educational and methodical documentation of educational program elaborated by Yugra State University teaching staff. Currently, all teachers fill in the reference manually in accordance with the working program of a discipline and a study plan. In such case there is a high probability of making mistakes, indicating unacceptable literature sources, insufficient number of publications and other shortcomings. The automation process of preparation references on educational and methodical documentation of educational program allows to fill in automatically more dynamic fields for a teacher. To automate the described process, it was decided to develop a web application. The authors provide an overview of analogues. The study of the automation system of IRBIS libraries and databases of the electronic catalog of Yugra State University library was carried out. The description of the technologies and languages used in the elaboration of the web application is given.

Key words: web application, MVC, PHP, Laravel Framework, IRBIS, Book Supply, Library Automation System.

Введение

Справка об обеспеченности учебно-методической документацией образовательной программы – нормативный документ, устанавливающий наличие и местоположение запрашиваемого документа в фонде библиотеки Югорского государственного университета.

Цель справки – обеспечение преподавателей и обучающихся необходимой в достаточном количестве литературой по дисциплинам учебного плана, а также реализация требований федеральных государственных образовательных стандартов.

В настоящее время в образовательном процессе университета для подсчета книгообеспеченности дисциплин используется утвержденный документ «Справка об обеспеченности учебно-методической документацией образовательной программы», эта справка является неотъемлемой частью основной профессиональной образовательной программы. Справка заполняется вручную в соответствии с дисциплинами учебного плана. Во время выполнения этого процесса в ручном режиме имеется большая вероятность совершения ошибок, указания недоступной литературы и прочих недочетов.

Как следствие, совершение ошибок в процессе составления справок часто приводит к их отклонению при проверке сотрудниками библиотеки. Это в свою очередь ведет к дополнительным трудозатратам и повторным согласованиям справок.

При этом не исключается вероятность повторного отклонения уже исправленной справки.

Автоматизация процесса составления справки об обеспеченности учебно-методической документацией позволяет заполнять большинство динамически изменяющихся полей автоматически. При этом в приложении будет проверяться корректное заполнение справок, такое как выбор обязательного количества основной и дополнительной литературы, возможность библиотеки обеспечить направление обучения необходимой литературой и прочие частые причины отклонения.

Обзор аналогов

Для автоматизации работы библиотеки существуют системы автоматизации библиотек (САБ).

Выделим основные требования к САБ:

1. Система не должна зависеть от операционной системы Windows.
2. Система не должна требовать установки дополнительных компонентов в среду.
3. Интерфейс системы должен быть интуитивно понятен всем пользователям.
4. Должна поддерживаться работа с базой данных SQL-Oracle.
5. Стоимость лицензии должна быть как можно меньше.
6. Система должна быть расширяемой.
7. Система должна иметь достаточно подробную документацию.
8. Система должна иметь электронный каталог.
9. Система должна уметь формировать справку об обеспеченности учебно-методической документацией.

Для сравнения были выбраны следующие системы:

1. САБ «Ирбис».
2. САБ «Руслан».
3. САБ «МегаПро».
4. САБ «Марк-SQL».

После проведения анализа этих систем была построена сравнительная таблица (таблица 1) (сравнение проводилось на основе технических характеристик и субъективного мнения).

Таблица 1 – Сравнение систем автоматизации библиотек

САБ	«Ирбис»	«Руслан»	«МегаПро»	«Марк-SQL»	Наш сервис
Платформа	Windows 2000/XP и выше	Linux	WindowsServer 2008 и выше	WindowsServer 2008 и выше	Linux/Windows
Требования к ресурсам	Низкие	Средние	Средние	Высокие	Низкие

Модульность, расширяемость	Ограниченно да (дополнительные модули за отдельную плату)	Ограниченно да (дополнительные модули за отдельную плату)	Ограниченно да (дополнительные модули за отдельную плату)	Ограниченно да (дополнительные модули за отдельную плату)	Да
Поддержка облачных технологий	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть
Работа с базами данных	Встроенная	Oracle-SQL	MS SQL 2008 и выше	MS SQL 2008 и выше, Oracle 9 и выше, MS Access	Oracle-SQL, MS SQL, MySQL, PostgreSQL
Требуется установка дополнительных компонентов в архитектуру имеющейся системы	Да	Да	Да	Да	Нет
Дружелюбный интерфейс	Нет	Нет	Да	Нет	Да
Полнота документации	Неполная	Полная	Полная	Полная	Полная
Наличие электронного каталога	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Стоимость лицензии для университетов	0-165000	0-237000	-	0-360000	-
Анализ обеспеченности учебного процесса	Да	Да	Да	Да	Да

Сравнив все САБ по необходимым нам характеристикам, мы выяснили, что ни одно из имеющихся готовых решений не удовлетворяет всем выдвинутым требованиям по составлению справок об обеспеченности учебно-методической документацией. В связи с этим возникла необходимость в разработке веб-приложения.

Данное веб-приложение позволит сократить время на составление справки, существенно сократить количество различных отклонений и ошибок, заполняя большинство динамических полей документа автоматически, контролируя корректный выбор литературы, основываясь на данных, полученных из САБ ИРБИС.

Исследование САБ ИРБИС

В процессе исследования структуры САБ ИРБИС были выделены сущности, в которых хранится необходимая литература, доступная для использования в составляемых справках. К таким сущностям относятся:

- FOND – база данных научной библиотеки ЮГУ;
- LAN – база данных ЭБС «Лань»;
- ZNANIUM – база данных ЭБС Znanium.com;
- URAIT – база данных ЭБС «Юрайт».

Также было обнаружено, что САБ ИРБИС имеет свою собственную нереляционную СУБД – IBIS. Этот фактор существенно осложнил процесс разработки веб-приложения, так как эта СУБД не позволяет осуществить прямой доступ к данным литературы.

При исследовании метода обмена информацией с сервером библиотеки была изучена документация к программному обеспечению данного сервера, а именно IRBIS Server. Во время изучения документации было выяснено, что САБ ИРБИС так же, как и разрабатываемое веб-приложение, имеет клиент-серверную архитектуру и выполняет передачу данных между сервером и клиентом, используя сетевой протокол TCP_IP [1].

Разработка началась непосредственно с попытки установить соединение с сервером. С данным этапом проблем не возникло. Следующим шагом стала авторизация на сервере библиотеки. Написанный в соответствии с документацией [2] программный код для формирования и отправки пакетов на сервер долгое время не давал результатов. Информация от пользователей официального форума САБ ИРБИС никак не помогла прояснить ситуацию.

После большого количества безуспешных попыток авторизации на сервере библиотеки было принято решение установить аналогичный сервер в домашней локальной сети. При первой же попытке выполнить авторизацию на локальном сервере был получен положительный результат. Сразу после этого была выполнена повторная попытка авторизации уже на сервере библиотеки. Но, как и все предыдущие попытки, она не увенчалась успехом.

В результате появились предположения о том, что версия сервера, используемая библиотекой ЮГУ, не имеет возможности осуществлять обмен информацией, используя сетевое соединение, или же информация из документации к серверу не соответствует действительности. Для проверки данных теории нужно было определить, каким же образом используемая версия сервера выполняет передачу информации между клиентами. Для этого необходимо было отследить весь трафик, который передается между клиентом и сервером библиотеки от момента запуска клиента до его закрытия. Таким образом был получен формат пакетов, которые отправляет клиент серверу для авторизации.

После проведения анализа данных пакетов была подтверждена теория о том, что информация, описывающая формат отправляемых на сервер пакетов, не соответствует версии сервера, используемого библиотекой, по причине того, что формат пакета, посылаемого клиентом серверу, отличается от формата пакета, указанного в документации. Соответственно, был исправлен код, формирующий отправляемые серверу пакеты.

Разницу между фактическими форматами передаваемых пакетов клиентом и форматом, описанным в документации, можно увидеть на рисунке 1.

Формат пакета из документации		Фактический формат пакета	
1	Код команды	К	Код команды
2	АРМ	R	С
3	Код команды	К	К
4	Идентификатор	240954	Идентификатор
5	Номер команды	3	Номер команды
6			Пароль пользователя
7			Логин пользователя
8			
9			
10			
11	БАЗА	FOND	БАЗА
12	Запрос	QUERY	Запрос
13	Количество записей	1	Количество записей
14	Начиная с записи	1	Начиная с записи
15	Формат ответа	@brief	Формат ответа
			@

Рисунок 1 – Разница между форматами передаваемых пакетов

Интересно то, что сервер отклоняет любые попытки авторизации пользователей и администраторов САБ ИРБИС, используя данные для авторизации, принимаемые клиентами, кроме логина и пароля системного суперпользователя.

Решив проблему с авторизацией, можно было приступить к попыткам поиска литературы. Этот этап начался с изучения языка поисковых запросов САБ ИРБИС, имеющего одноименное название с собственной СУБД IBIS [2]. В процессе изучения конструкции поисковых запросов выяснилось, что ИРБИС способен осуществлять только полнотекстовый поиск литературы и только используя крайне ограниченный список параметров. Среди этих параметров присутствуют:

- автор;
- заглавие;
- ключевые слова.

Для упрощения составления поисковых запросов был спроектирован и разработан генератор поисковых запросов IBIS на языке PHP. Данный генератор безошибочно составлял поисковые запросы по полученным от пользователя данным для поиска. При получении информации о литературе ошибок не возникало.

После того, как был налажен метод получения информации о литературе из системы библиотеки, стало ясно, что необходимо дополнительно разработать синтаксический анализатор результатов поиска. Для этого требовалось изучить формат, в котором сервер возвращает литературу, соответствующую сгенерированному поисковому запросу результата поиска. В первую очередь были определены элементы описания литературы, которые необходимо получить и учитывать при составлении справки об обеспеченности учебно-методической документацией. К таким элементам относятся:

- автор издания;
- заглавие издания;
- вид издания;
- год издания;
- город издания;
- краткое описание;
- количество экземпляров, находящихся на хранении в библиотеке;
- ссылка на издание, если литература относится к электронным ресурсам.

Был написан синтаксический анализатор, способный обнаруживать необходимые элементы в результатах поиска. Однако и здесь не обошлось без подводных камней. А именно время от времени при выполнении поиска на этапе синтаксического анализа выполнение кода программы останавливалось с сообщением об ошибке при попытке получить какой-либо из элементов. При выявлении причин данных ошибок были обнаружены некорректные записи в базе данных. Среди них были:

- отсутствие информации об авторе или заглавии литературы;
- слитые воедино годы издания и переиздания литературы;
- заголовком описания может быть как автор, так и название издания;
- неработающие ссылки на электронные издания.

Для решения сложившихся проблем были приняты меры по усовершенствованию синтаксического анализатора и увеличению его отказоустойчивости. Результатом принятых мер стало повышение точности получения необходимых элементов из результатов поиска с 63 % до 96 %. Причиной появления ошибок в оставшихся 4 % является неверное заполнение полей в базе данных. Также при разработке синтаксического анализатора было выявлено изменение форматов ответа сервера в каждой из последующих версий. Данный факт может негативно сказаться на работоспособности разрабатываемого веб-приложения, лишив его возможности синтаксического анализа, а как следствие, и корректного поиска литературы и отображения пользователям результатов.

Последними этапами реализации функционала разрабатываемого веб-приложения, позволяющего выполнять обмен информацией с сервером библиотеки, стало разлогирование пользователя и разрыв соединения с сервером.

Исследование базы данных ЮГУ

В ходе исследования базы данных была выявлены сущности, которые необходимо задействовать для получения информации о пользователях, направлениях обучения, дисциплинах и годах набора.

Таблица с рабочими программами дисциплин – V_RPD_DISC содержит в себе всю достаточную и необходимую информацию о годах набора, формах обучения, направлениях обучения, кодах направлений обучения, дисциплинах и кодах дисциплин.

Данные о планах набора абитуриентов заимствуются из таблицы V_LR_PlanNabora.

Данные о пользователях берутся из таблицы Appointments. Данная таблица содержит в себе информацию о должностях сотрудников и их ФИО. На момент разработки веб-приложения этих данных достаточно для осуществления авторизации пользователей.

Разработка веб-приложения

Основным языком программирования серверной части разрабатываемого веб-приложения было решено использовать PHP 7.3. Для экономии времени и уменьшения трудозатрат в процессе разработки был выбран фреймворк Laravel.

Во время разработки пользовательского интерфейса (клиентской части) использовались таблица стилей CSS 3.0, язык гипертекстовой разметки HTML 5.0 и один из лидеров среди фреймворков, применяемых для разработки пользовательских интерфейсов, – Bootstrap 4.

Для программирования клиентской части разрабатываемого приложения использовался язык JavaScript.

Беря во внимание то, что в будущем имеется возможность внедрения разрабатываемого веб-приложения в ИС ЮГУ, в частности, как модуль системы ЮГУ «ELIOS», веб-приложение разрабатывается на клиент-серверной архитектуре, повторяя архитектуру ИС «ELIOS», позволяющую пользователям осуществлять доступ к электронным ресурсам серверов ЮГУ. В разрабатываемом приложении используется шаблон проектирования Model-View-Controller (MVC) [3].

Разработанное веб-приложение содержит в себе 7 моделей, 9 контроллеров и 14 представлений.

Опишем основные модели и контроллеры.

Модель рабочих программ – используется для получения из базы данных информации о годах набора, кодах и названиях направлений (в зависимости от полученного от пользователя года набора), кодах и названиях дисциплин (в зависимости от полученных от пользователя года набора и направления обучения). Эти данные необходимы для начала составления справки об обеспеченности учебно-методической документацией по направлению обучения.

Модель справок об обеспеченности учебно-методической документацией – инициализирует подключение к базе данных ЮГУ. Это подключение используется в методах этой же модели на протяжении всей работы с ней. В модели присутствуют методы, принимающие данные от контроллеров для их обработки, составления и выполнения запросов записи в БД или возврата полученной из БД информации. Также эта модель возвращает перечень уже составленных справок и сохраняет промежуточные данные о составляемой или редактируемой справке от момента начала ее составления до момента сохранения в БД при помощи механизма сессии. Фреймворк Laravel имеет встроенный конструктор запросов, который позволяет составлять запросы значительно быстрее в удобной для чтения и восприятия форме.

Контроллер IRBIS – выполняет все операции, связанные с обменом информацией с САБ библиотеки. Данный контроллер включает в себя такие методы, как:

- генерация поискового запроса на языке запросов IBIS;
- подключение к серверу библиотеки;
- авторизация на сервере библиотеки;
- конструктор пакета, отправляемого на сервер библиотеки;

- поиск литературы в базе данных библиотеки;
- отправка пакета серверу библиотеки;
- получение пакетов от сервера библиотеки;
- анализатор полученных от сервера пакетов;
- разлогирование на сервере библиотеки;
- разрыв соединения с сервером библиотеки.

Контроллер IRBIS позволяет осуществлять поиск литературы, необходимой для составления справки об обеспеченности учебно-методической документацией по направлению обучения.

Контроллер синтаксического анализа результатов поиска – занимается определением и получением обязательной информации о найденной литературе (автор, заглавие, вид издания, количество экземпляров в библиотеке, год издания, город издания, краткое описание) для составления справки.

Контроллер фильтрации результатов поиска – доводит до пользователя только те сведения, которые соответствуют всем указанным пользователем параметрам. Дополнительно для экономии времени составителя к поисковым параметрам был добавлен такой параметр, как «Стоп-слова». Этот параметр позволяет исключить из выдачи ту литературу, которая содержит в себе какое-либо из стоп-слов, например, хрестоматия, сборник трудов и т. д.).

К данному контроллеру также были добавлены такие правила фильтрации результатов поиска, как:

- искомая литература должна иметь возраст менее 20 лет;
- нельзя использовать издания, количество экземпляров которых в фонде библиотеке менее 3 экз.

Эти два правила применяются к результатам поиска исключительно в момент составления или редактирования справки.

Контроллер Word – реализует функционал сохранения принятых сотрудниками библиотеки справок об обеспеченности учебно-методической документацией образовательной программы в документ формата MS Word.

Для определения уровня доступа к разрабатываемому приложению выполняется определение роли пользователя путем получения структурного подразделения, к которому он принадлежит. После определения уровня доступа определяются доступные этому пользователю методы и контроллеры.

При помощи механизма сессии осуществляется авторизация пользователей в системе и промежуточное хранение информации о составляемых или редактируемых справках (общая информация о справке (год набора, код и название направления, код и название дисциплины, список литературы и история активности) до момента их записи в БД).

При каждом действии пользователя, связанном с заполнением информации о справке, которое требует получения сведений из базы данных, промежуточного сохранения составленной справки и сохранения справки в базе данных из представления, посылается AJAX-запрос на определенный URL-адрес.

Фреймворк Laravel позволяет сопоставить URL-адреса с конкретным контроллером и его методом, который будет заниматься его обработкой. Данный функционал может быть реализован при помощи встроенных в фреймворк методов маршрутизации [4].

Для того чтобы веб-приложение могло предоставить пользователям возможность загрузки на персональный компьютер составленных ими и принятых сотрудниками библиотеки справок в формате документа MS Word, к разрабатываемому приложению была подключена сторонняя PHP-библиотека – PhpWord, предназначенная для не прямой работы с документами формата MS Word с использованием языка программирования PHP [6]. Также был сформирован шаблон справки по утвержденной форме, который представлен на рисунке 2.

СПРАВКА об обеспеченности учебно-методической документацией программы направления подготовки $\{hr_special_special\}$, $\{hr_special_year\}$ год набора

№ ПЛП	Наименование дисциплины	Наименование печатных и (или) электронных учебных изданий, методические издания, периодические издания по всем входящим в реализуемую образовательную программу учебным предметам, курсам, дисциплинам (модулям) в соответствии с рабочими программами дисциплин, модулей, практик		Количество экземпляров	студентов учебной литературой (экземпляров на одного студента)
$\{d_discipline_number\}$	$\{d_discipline\}$	$\{one_literature\}$	$\{one_books\} \{one_memory\}$	$\{One_NumberOfCopies\}$	$\{One_NumberOfCopiesForStud\}$
			$\{one_books_2\} \{one_memory_2\}$	$\{One_NumberOfCopies_2\}$	$\{One_NumberOfCopiesForStud_2\}$
		$\{two_literature\}$	$\{two_books\} \{two_memory\}$	$\{Two_NumberOfCopies\}$	$\{Two_NumberOfCopiesForStud\}$
			$\{two_books_2\} \{two_memory_2\}$	$\{Two_NumberOfCopies_2\}$	$\{Two_NumberOfCopiesForStud_2\}$

Рисунок 2 – Шаблон справки об обеспеченности учебно-методической документацией

После того, как пользователь принимает решение скачать принятую библиотекой справку, на серверной стороне приложения создается переменная «объект типа `PhpWord`», в который загружается шаблон справки. Далее из базы данных загружается вся информация о справке, которую пользователь решил скачать. Из полученных данных формируется массив, включающий в себя следующие данные:

1. **Year** – год набора.
2. **SpecialityCode** – код направления обучения.
3. **Speciality** – название направления обучения.
4. **DisciplineCode** – код дисциплины.
5. **Discipline** – название дисциплины.
6. **Literature** – массив, содержащий в себе всю информацию о литературе.
 - 6.1. **AmountOfLiterature** – общее количество литературы.
 - 6.2. **AmountOfBaseLiterature** – количество основной литературы.
 - 6.3. **AmountOfDLCLiterature** – количество дополнительной литературы.
 - 6.4. **AmountOfBookLiterature** – количество печатной литературы.
 - 6.5. **AmountOfeBookLiterature** – количество электронной литературы.
 - 6.6. **TBook** – массив, содержащий в себе информацию обо всей печатной литературе.
 - 6.7. **EBook** – массив, содержащий в себе информацию обо всей электронной литературе.

Полученные из массива данные вставляются в шаблон в места, соответствующие этим данным. Если какие-либо данные являются пустыми, строка из шаблона, соответствующая этим данным, удаляется.

Если какие-либо переменные из этого массива также являются массивами, выполняется определение количества элементов в этом массиве. По результатам определения количества элементов в массиве выполняется перебор вложенного массива. При этом нужные строки в шаблоне дублируются необходимое количество раз. Таким образом, формируется динамический документ вне зависимости от количества выбранной для скачивания информации.

После того как файл был сформирован и все данные были записаны в соответствующие им места в шаблоне, выполняется сохранение файла на сервере. В случае если файл был успешно сохранен, пользователю возвращается ссылка на скачивание составленного документа.

Заключение

Разработано веб-приложение автоматизированного составления справок об обеспеченности учебно-методической документацией по направлению обучения.

Среднее время заполнения данных по дисциплине в справке с использованием веб-приложения – от 2 до 4 минут. При осуществлении этого процесса вручную среднее время составляло от 10 до 20 минут. Исходя из этого можно сделать вывод, что разработанное приложение позволяет сократить время на заполнение справки в 5 раз.

Также следует отметить, что меры, принятые для сокращения вероятности отклонения библиотекой справки об обеспеченности учебно-методической документацией, тоже продемонстрировали положительный результат и позволили значительно сократить весь процесс составления, проверки и утверждения справки.

Литература

1. Хант, К. TCP/IP. Сетевое администрирование / К. Хант. – 3-е издание. – Санкт-Петербург : Символ, 2007. – 816 с. – ISBN 5-93286-056-1. – Текст : непосредственный.
2. Справка ИРБИС64+ (Система автоматизации библиотек) : сайт. – URL: <http://sntnarciss.ru/irbis/spravka/irbis64.html> (дата обращения 20.01.2019). – Текст : электронный.
3. Реализация MVC паттерна на примере создания сайта-визитки на PHP – Хабр. – Текст : электронный // Habr : сайт. – 2012. – 27 августа. – URL: <https://habr.com/ru/post/150267/> (дата обращения: 10.01.2019).
4. Документация 5.x. – Текст : электронный // Laravel по-русски : сайт. – URL: <https://laravel.ru/docs/v5> (дата обращения 01.01.2019).
5. GitHub – PHPOffice/PHPWord A pure PHP library for reading and writing word processing document. – Текст : электронный // GitHub : сайт. – URL: <https://github.com/PHPOffice/PHPWord> (дата обращения: 14.03.2019).

НАШИ АВТОРЫ

Авдеева Екатерина Вадимовна Кандидат юридических наук Доцент кафедры уголовного процесса Восточно-Сибирского института Министерства внутренних дел России Тел.: +7 (395) 247-534 E-mail: E_V_Avdeeva@bk.ru	Ekaterina V. Avdeeva Candidate of Law Sciences Docent of the Department Legal Process, East-Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia Phone +7 (395) 247-534 E-mail: E_V_Avdeeva@bk.ru
Беляев Виталий Владимирович Младший научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН Тел.: +7 (383) 330-42-73 E-mail: belyaev@itam.nsc.ru	Vitaliy V. Belyaev Junior Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, SB RAS Phone (383) 330-42-73 E-mail: belyaev@itam.nsc.ru
Бороненко Марина Петровна Кандидат технических наук Доцент института нефти и газа Югорского государственного университета Тел.: +7 (3467) 377-000 (доб. 329) E-mail: marinab7@yandex.ru	Marina P. Boronenko Candidate of Technical Sciences Associate Professor, Institute of Oil and Gas, Yugra State University Phone: +7 (3467) 377-000 (ext. 329) E-mail: marinab7@yandex.ru
Васильева Жанна Александровна Заместитель декана по учебной работе Юри- дического факультета Бурятского государственного университета им. Доржи Банзарова Тел.: +7 (3012) 215-152	Zhanna A. Vasilyeva Deputy Dean for Academic Affairs, Faculty of Law, Buryat State University named Dorzhi Banzarova Phone +7 (3012) 215-152
Григорьевская Анжелика Анатольевна Бакалавр факультета математики и информационных технологий Алтайского государственного университета Тел.: +7 (3852) 66-90-53 E-mail: a.a.grig@bk.ru	Angelica A. Grigoryevskaya Bachelor of the Faculty of Mathematics and Information Technology, Altai State University Phone +7 (3852) 66-90-53 E-mail: a.a.grig@bk.ru
Гуляев Игорь Павлович Старший научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН Тел.: +7 (383) 347-77-77 (доб. 550) gulyaev@itam.nsc.ru	Igor P. Gulyaev Senior Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, SB RAS Phone +7 (383) 347-77-77 (ext. 550) gulyaev@itam.nsc.ru

Гуляев Павел Юрьевич Доктор технических наук Ведущий научный сотрудник Института нефти и газа Югорского государственного университета Тел.: +7 (963) 492-48-46 E-mail: p_gulyaev@ugrasu.ru	Gulyaev Pavel Yuryevich Doctor of Technical Sciences Leading Researcher, Institute of Oil and Gas, Yugra State University Phone +7 (963) 492-48-46 E-mail: p_gulyaev@ugrasu.ru
Долматов Алексей Викторович Кандидат технических наук Доцент Института цифровой экономики Югорского государственного университета E-mail: adolmatov@bk.ru	Alexey V. Dolmatov Candidate of Technical Sciences Associate Professor, Institute of Digital Economy, Yugra State University E-mail: adolmatov@bk.ru
Еськов Александр Васильевич Доктор технических наук Профессор кафедры информационной безопасности Краснодарского университета МВД России E-mail: alesc72@mail.ru	Alexander V. Eskov Doctor of Technical Sciences Professor of Department of Information Security, Krasnodar University of the Ministry of Internal Affairs of Russia E-mail: alesc72@mail.ru
Иголина Елена Олеговна Следователь Следственного управления по Ханты-Мансийскому автономному округу – Югре Тел.: +7 (922) 678 01 78 E-mail: elena_lovely@list.ru	Elena O. Igonina Crime Investigator, Investigative Department of the Investigative Committee Russian Federation on Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra Phone +7 (922) 678 01 78 E-mail: elena_lovely@list.ru
Иордан Владимир Иванович Кандидат физико-математических наук Доцент кафедры вычислительной техники и электроники Алтайского государственного университета Ведущий математик лаборатории № 6 Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН Тел.: +7 (3852) 38-07-51 E-mail: jordan@phys.asu.ru	Vladimir I. Jordan Candidate of Physical and Mathematics Sciences Associate Professor of the Department of Computer Engineering and Electronics, Altai State University Leading Mathematician of Laboratory No. 6, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, SB RAS Phone +7 (3852) 38-07-51 E-mail: jordan@phys.asu.ru

Кирюшин Иван Иванович	Ivan I. Kiryushin
Преподаватель кафедры информатики и специальной техники Барнаульского юридического института МВД России	Lecturer at the Department of Information, Barnaul Law Institute of the Ministry of the Interior of Russia
E-mail: kirjushinivan@mail.ru	E-mail: kirjushinivan@mail.ru
Клименко Любовь Степановна	Klimenko Lyubov Stepanovna
Доктор химических наук	Doctor of Chemical Sciences
Профессор института нефти и газа Югорского государственного университета	Professor of the Institute of Oil and Gas, Yugra State University
E-mail: L_klimenko@ugrasu.ru	E-mail: L_klimenko@ugrasu.ru
Кудреватых Александра Александровна	Alexandra A. Kudrevatykh
Старший преподаватель Института нефти и газа Югорского государственного университета	Senior Lecturer, Institute of Oil and Gas, Yugra State University
Тел.: +7 (929) 204-09-66	Phone +7 (929) 204-09-66
E-mail: Alexandra.korolkova@mail.ru	E-mail: Alexandra.korolkova@mail.ru
Кузнецова Ирина Егоровна	Irina E. Kuznetsova
Директор Научной библиотеки Югорского государственного университета	Director of Scientific Library, Yugra State University
Тел.: +7 (3467) 377-000 (доб. 218)	Phone +7 (3467) 377-000 (ext. 218)
E-mail: i_kuznecova@ugrasu.ru	E-mail: i_kuznecova@ugrasu.ru
Милюкова Ирина Васильевна	Irina V. Milyukova
Кандидат физико-математических наук	Candidate of Physical and Mathematical Sciences
Доцент института нефти и газа Югорского государственного университета	Associate Professor, Institute of Oil and Gas, Yugra State University
Тел.: +7 (3467) 377-000 (доб. 319)	Phone: +7 (3467) 377-000 (ext. 319)
E-mail: imil@list.ru	E-mail: imil@list.ru
Пронин Сергей Петрович	Sergey P. Pronin
Доктор технических наук	Doctor of Technical Sciences
Профессор кафедры информационных технологий Алтайского государственного технического университета	Professor of the Department of Information Technology, Altai State Technical University
Тел.: +7 (913) 085-96-65	Phone +7 (913) 085-96-65
E-mail: sppronin@mail.ru	E-mail: sppronin@mail.ru

Розенко Станислав Васильевич	Stanislav V. Rozenko
Кандидат юридических наук	Candidate of Law Sciences
Директор юридического института Югорского государственного университета	Director of Law Institute, Yugra State University
Тел.: +7 (3467) 377-000 (доб. 393)	Phone +7 (3467) 377-000 (ext. 393)
E-mail: s_rozenko@ugrasu.ru	E-mail: s_rozenko@ugrasu.ru
Сафонов Егор Иванович	Egor I. Safonov
Кандидат физико-математических наук	Candidate of Physics and Mathematics Sciences
Доцент Института цифровой экономики Югорского государственного университета	Associate Professor, Institute of Digital Economics, Yugra State University
Тел.: +7 (3467) 377-000 (доб. 375)	Phone +7 (3467) 377-000 (ext. 375)
E-mail: dc.gerz.hd@gmail.com	E-mail: dc.gerz.hd@gmail.com
Тамбовцев Александр Сергеевич	Alexander S. Tambovtsev
Лаборант Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН	Laboratory Assistant, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
E-mail: alsetams@gmail.com	E-mail: alsetams@gmail.com
Умбетов Сергей Владимирович	Sergey V. Umbetov
Ассистент кафедры информационных технологий Алтайского государственного технического университета	Assistant of the Department of Information Technology, Altai State Technical University
Тел.: +7 (961) 993-51-48	Phone +7 (961) 993-51-48
E-mail: eva_09@inbox.ru	E-mail: eva_09@inbox.ru
Хармаев Юрий Владимирович	Yuriy V. Kharmaev
Кандидат юридических наук	Candidate of Law Sciences
Заведующий кафедрой уголовного процесса и криминалистики Юридического факультета Бурятского государственного университета им. Доржи Банзарова	Head of the Department of Criminal Procedure and Criminalistics, Faculty of Law, Buryat State University named Dorzhi Banzarova
Тел.: +7 (3012) 211-917	Phone +7 (3012) 211-917
E-mail: kharmaev@mail.ru	E-mail: kharmaev@mail.ru
Цуй Хонг Жи	Cui Hong Zhi
Доктор наук	PhD
Заслуженный профессор школы Тайшань, декан колледжа материаловедения и инженерии Шаньдунского университета науки и технологии, Китай	Distinguished professor of Taishan Scholar, Dean of College of Materials Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, China
Тел.: +7 (49652) 46-376	Phone +7 (49652) 46-376
E-mail: director@ism.ac.ru	E-mail: director@ism.ac.ru

Чеклов Сергей Андреевич Магистрант института нефти и газа Югорского государственного университета Тел.: +7 (3467) 377-000 (доб. 319) E-mail: sergej-cheklov.c33@yandex.ru	Sergei A. Cheklov Undergraduate of the Institute of Oil and Gas, Yugra State University Phone: +7 (3467) 377-000 (ext. 319) E-mail: sergej-cheklov.c33@yandex.ru
Шахназаров Карэн Юрьевич Кандидат технических наук Доцент кафедры материаловедения и технологии художественных изделий Санкт-Петербургского горного университета Тел.: +7 (911) 017-32-79 E-mail: karen812@yandex.ru	Karen Yu. Shakhnazarov Candidate of Technical Sciences Associate Professor, Department of Material Science and Technology of Art Products, Saint-Petersburg Mining University Phone +7 (911) 017-32-79 E-mail: karen812@yandex.ru
Шиленков Денис Владимирович Магистр Института цифровой экономики Югорского государственного университета E-mail: Deoltesh.projects@yandex.ru	Denis V. Shilenkov Undergraduate of the Institute of Digital Economics, Yugra State University E-mail: Deoltesh.projects@yandex.ru
Шмаков Игорь Александрович Старший преподаватель кафедры вычислительной техники и электроники Алтайского государственного университета Тел.: +7 (3852) 38-07-51 E-mail: ihammers.sia@gmail.com	Igor A. Shmakov Senior Lecturer of the Department of Computer Engineering and Electronics, Altai State University Phone +7 (3852) 38-07-51 E-mail: ihammers.sia@gmail.com

Научное издание

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 2 (57)/2020

16+

Цена свободная

Учредитель и издатель: ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-73606 от 31 августа 2018 г.

Дата выхода в свет 18.09.2020

Формат 60x84 1/8. Гарнитура Times New Roman Усл. печ. л. 13,7.
Тираж 1000 экз. Заказ № 257.

Адрес учредителя, издателя и редакции:
628012, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра,
г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16

Отпечатано в секторе редакционно-издательской работы
Научной библиотеки ФГБОУ ВО ЮГУ:
628012, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра,
г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16

Главный редактор – Карминская Татьяна Дмитриевна,
тел. +7 (3467) 377-000 (доб. 101)