

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ

ФИЗИКА

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

1·2026

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 69

Январь, 2026

№ 1 (818)

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Основан в 1957 г.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ
ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ
ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА
ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ
ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ
КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-84127 от 28 ноября 2022 г.
выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций

12+

Журнал входит в перечень рецензируемых научных журналов,
включенных в список ВАК, для публикации основных результатов
кандидатских и докторских диссертаций

Учредитель:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
Томский государственный университет»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Шеремет М.А., проф. (гл. редактор), Томск, Россия
Козырев А.В., проф. (зам. гл. редактора), Томск, Россия
Пермякова Л.В. (отв. секретарь), Томск, Россия
Алексеев С.В., акад. РАН, Новосибирск, Россия
Асеев А.Л., акад. РАН, Новосибирск, Россия
Борисов А.В., проф., Москва, Россия
Вараксин А.Ю., акад. РАН, Москва, Россия
Ворожцов А.Б., проф., Томск, Россия
Войцеховский А.В., проф., Томск, Россия
Гитман Д.М., проф., São Paulo, Бразилия
Демин В.А., проф., Пермь, Россия
Джафаров Р.Г., д.ф.-м.н., Баку, Азербайджан
Дитенберг И.А., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Ивонин И.В., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Кистенев Ю.В., проф., Томск, Россия
Ковалевская Т.А., проф., Томск, Россия
Колобов Ю.Р., проф., Белгород, Россия
Коротаев А.Д., проф., Томск, Россия
Майер Г.В., проф., Томск, Россия
Манка Оронцо, проф., Неаполь, Италия
Месяц Г.А., акад. РАН, Москва, Россия
Неклюдов И.М., акад. НАН Украины, Харьков
Озтоп Хакан, проф., Элязыг, Турция
Ратахин Н.А., акад. РАН, Томск, Россия
Сагхир Зиад, проф., Торонто, Канада
Саранин А.А., чл.-корр. РАН, Владивосток, Россия
Суржиков А.П., проф., Томск, Россия
Суханов Д.Я., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Тао Вен-Куан, академик Китайской академии наук, Сиань, Китай
Углов В.В., проф., Минск, Республика Беларусь
Ушаков В.Я., проф., Томск, Россия
Чайковская О.Н., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Черепанов В.Н., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Чумляков Ю.И., проф., Томск, Россия
Шаповалов А.В., проф., Томск, Россия
Шипилов С.Э., д.ф.-м.н., Томск, Россия

EDITORIAL BOARD

Sheremet M.A. (Editor-in-Chief), Professor, Tomsk, Russia
Kozyrev A.V. (Deputy Editor-in-Chief), Professor, Tomsk, Russia
Permyakova L.V. (Executive Editor), Tomsk, Russia
Alekseenko S.V., Academician RAS, Novosibirsk, Russia
Aseev A.L., Academician RAS, Novosibirsk, Russia
Borisov A.V., Professor, Moscow, Russia
Varaksin A.Y., Academician RAS, Moscow, Russia
Vorozhtsov A.B., Professor, Tomsk, Russia
Voitsekhovskii A.V., Professor, Tomsk, Russia
Gitman D.M., Professor, São Paulo, Brazil
Demin V.A., Professor, Perm, Russia
Jafarov R.G., Professor, Baku, Republic of Azerbaijan
Ditenberg I.A., Professor, Tomsk, Russia
Ivonin I.V., Professor, Tomsk, Russia
Kistenev Y.V., Professor, Tomsk, Russia
Kovalevskaya T.A., Professor, Tomsk, Russia
Kolobov Y.R., Professor, Belgorod, Russia
Korotaev A.D., Professor, Tomsk, Russia
Mayer G.V., Professor, Tomsk, Russia
Manca Oronzio, Professor, Naples, Italy
Mesyats G.A., Academician RAS, Moscow, Russia
Neklyudov I.M., Academician UAS, Kharkov, Ukraine
Oztop Hakan, Professor, Elazığ, Turkey
Ratakhin N.A., Academician RAS, Tomsk, Russia
Saghir Ziad, Professor, Toronto, Canada
Saranin A.A., Corr. Member RAS, Vladivostok, Russia
Surzhikov A.P., Professor, Tomsk, Russia
Sukhanov D.Y., Professor, Tomsk, Russia
Tao Wen-Quan, Academician of the Chinese Academy of Sciences, Xi'an, China
Uglov V.V., Professor, Minsk, Republic of Belarus
Ushakov V.Ya., Professor, Tomsk, Russia
Tchaikovskaya O.N., Professor, Tomsk, Russia
Cherepanov V.N., Professor, Tomsk, Russia
Chumlyakov Y.I., Professor, Tomsk, Russia
Shapovalov A.V., Professor, Tomsk, Russia
Shipilov S.E., Professor, Tomsk, Russia

Журнал «Известия вузов. Физика» выходит 12 раз в год и распространяется по подписке. Подписной индекс 70380 в объединенном каталоге «Пресса России». Полные тексты статей доступны на сайте Научной электронной библиотеки: <https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>. **Публикация статей в журнале – бесплатная.**

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Адрес: 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, д. 36
Телефон: +7(3822) 53-33-35, 78-37-02
Сайт: <http://journals.tsu.ru/physics/>
E-mail: physics@mail.tsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

Кузнецов В.В., Шамирзаев А.С. Теплофизические проблемы отвода тепла от локальных источников большой мощности.....	5
Харламов Г.В. Диффузия в простых жидкостях по результатам расчетов методом молекулярной динамики	13
Васильков С.А., Кабанов Е.А. Расчет частот столкновений капель при воздействии электрического поля на эмульсию типа вода в масле.....	20
Шигапова А.Р. Верификация RANS-моделей турбулентности на задаче внешнего обтекания маслоохладителя	29
Молчанов Т.И., Кукшинов Н.В. Исследование вязкости и состава гидрофторэфира различной степени загрязнения.....	37

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Журавлев Д.В., Васильков С.А. Определение подвижностей ионов в диэлектрических жидкостях на основе токовых характеристик	44
--	----

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Блинова Е.Н., Воронов В.Д., Ишкиняев Э.Д., Либман М.А., Осинцев А.В., Петровский В.Н., Пиченко В.И., Шурыгина Н.А. Влияние температуры лазерного воздействия на структуру и механические свойства естественных композитов, созданных на основе сплава Fe–18Cr–10Ni	53
Кошоридзе С.И. Кавитация в присутствии слаборастворимых наноразмерных пузырьков в воде	64
Бурлаченко А.Г., Мировой Ю.А., Буякова С.П. Влияние высокоэнергетической механической активации дисперсных систем на структуру композиционных материалов ZrB ₂ –SiC	71
Чумляков Ю.И., Куксгаузен И.В., Куксгаузен Д.А., Петраков В.А., Киреева И.В., Кириллов В.А. Сверхэластичное поведение [001]-монокристаллов неэквивалентного высокоэнтропийного сплава Fe–28Ni–17Co–11.5Al–2.5Ta с наноразмерными частицами γ'-фазы.....	78
Гарин А.С., Григорьев Д.А., Байгонакова Г.А., Марченко Е.С., Жуков А.С. Влияние температуры диффузионного жидкофазного спекания на структуру и фазовый состав пористых сплавов на основе никелида титана.....	84
Валихов В.Д., Синкина И.Л., Ворожцов А.Б. Структура и физико-механические свойства алюминиевого сплава А7, упрочнённого волокнами базальта	93
Евсеев Н.С., Хрусталева А.П., Бельчиков И.А., Хмелева М.Г., Жуков И.А. Влияние углеродных материалов на структуру и фазовый состав композиционной керамики на основе многокомпонентной системы Hf–Ti–B–C–N.....	100
Козулин А.А., Петров П.О., Жуков И.А., Гаркушин Г.В., Савиных А.С., Разоренов С.В., Каракулов В.В. Изучение поведения образцов тяжелого бетона при ударно-волновом сжатии	107

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

Чайковская О.Н., Бочарникова Е.Н., Тельминов Е.Н., Ежов Д.М. Лазерно-индуцированная флуоресценция и спектроскопия наведенного поглощения бисфенола А.....	116
---	-----

ПЕРСОНАЛИЯ

Майер Г.В., Некрылов С.А. О принципе дополненности Бора в практике университетского образования. Исторический аспект (к 100-летию квантовой теории и технологий и к 150-летию основания Императорского Томского университета)	125
---	-----

CONTENTS

THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS

Kuznetsov V.V., Shamirzaev A.S. Thermophysical problems of heat removal from local high-power sources.....	5
Kharlamov G.V. Diffusion in simple liquids based on molecular dynamics simulations.....	13
Vasilkov S.A., Kabanov E.A. Calculation of droplet collision frequencies in an electric field acting on a water-in-oil emulsion.....	20
Shigapova A.R. Verification of RANS turbulence models for external flow around an oil cooler.....	29
Molchanov T.I., Kukshinov N.V. Study of viscosity and composition of hydrafluoroether with various degrees of contamination.....	37

PLASMA PHYSICS

Zhuravlev D.V., Vasilkov S.A. Determination of ion mobilities in dielectric liquids based on current characteristics.....	44
--	----

CONDENSED-STATE PHYSICS

Blinova E.N., Voronov V.D., Ishkinyaev E.D., Libman M.A., Osintsev A.V., Petrovskiy V.N., Pichienko V.I., Shurygina N.A. Effect of laser exposure temperature on the structure and mechanical properties of natural composites based on Fe–18Cr–10Ni alloy.....	53
Koshoridze S.I. Cavitation in the presence of slightly soluble nanoscale bubbles in water.....	64
Burlachenko A.G., Mirovoy Yu.A., Buyakova S.P. Effect of high-energy mechanical activation of dispersed systems on the structure of composite materials ZrB ₂ –SiC.....	71
Chumlyakov Y.I., Kuksgauzen I.V., Kuksgauzen D.A., Petrakov V.A., Kireeva I.V., Kirillov V.A. Superelastic behavior of [001]-oriented single crystals of the nonequiatomic high-entropy Fe–28Ni–17Co–11.5Al–2.5Ta alloy with nanosized γ' -phase particles.....	78
Garin A.S., Grigoriev D.A., Baigonakova G.A., Marchenko E.S., Zhukov A.S. Effect of diffusion liquid-phase sintering temperature on the structure and phase composition of porous titanium nickelide-based alloys.....	84
Valikhov V.D., Sinkina I.L., Vorozhtsov A.B. Structure and physical and mechanical properties of aluminum alloy A7 reinforced with basalt fibers.....	93
Evseev N.S., Khrustalev A.P., Belchikov I.A., Khmeleva M.G., Zhukov I.A. Influence of carbon materials on the structure and phase composition of composite ceramics based on a multicomponent system Hf–Ti–B–C–N.....	100
Kozulin A.A., Petrov P.O., Zhukov I.A., Garkushin G.V., Savinykh A.S., Razorenov S.V., Karakulov V.V. Investigation of heavy-duty concrete samples behavior under shock-wave compression.....	107

OPTICS AND SPECTROSCOPY

Tchaikovskaya O.N., Bocharnikova E.N., Telminov E.N., Ezhov D.M. Laser-induced fluorescence and nanosecond transient absorption spectroscopy of bisphenol A.....	116
---	-----

PERSONALITY

Mayer G.V., Nekrylov S.A. On Bohr's Principle of Complementarity in the Practice of University Education. Historical Aspect (on the 100th Anniversary of Quantum Theory and Technology and the 150th Anniversary of the Founding of Imperial Tomsk University).....	125
--	-----

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 536.4.033

DOI: 10.17223/00213411/69/1/1

**Теплофизические проблемы отвода тепла
от локальных источников большой мощности ***В.В. Кузнецов¹, А.С. Шамирзаев¹¹ *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Применительно к разработке систем охлаждения теплонпряженного оборудования экспериментально установлены физические механизмы теплообмена и кризиса кипения воды в микроканальной и микроструйной системе отвода тепла от локальных источников большой мощности. Разработан метод расчета теплообмена при кипении недогретой жидкости, учитывающий совместно вклад вынужденной конвекции и пузырькового кипения. Установленные закономерности теплообмена на малых масштабах позволяют разработать методы управления процессами теплообмена при кипении и вынужденной конвекции в двухфазных системах отвода тепла от локальных источников большой мощности.

Ключевые слова: отвод тепла, микроканалы, микроструи, теплообмен, эффективность охлаждения, вынужденная конвекция, кипение, кризис кипения.

Введение

Последние разработки в области высокопроизводительных компьютерных чипов, больших центров обработки данных и силовой электроники привели к значительному увеличению тепловыделения от локальных источников тепла, и существующие системы, основанные на воздушном охлаждении, не позволяют эффективно рассеивать выделяемую тепловую энергию. В докладе IRDS за 2022 г. [1] приводится прогноз, согласно которому тепловыделение высокопроизводительных процессоров возрастет на 35% к 2026 г. и увеличение числа транзисторов будет проводиться путем создания его объемной архитектуры [2]. При создании 3D-архитектуры процессора одной из основных проблем является отвод тепла от локальных источников большой мощности. Оптимизированное решение для отвода больших тепловых потоков, учитывая ограничения на электроэнергию, потребляемую электронными устройствами, должно включать условие минимальных затрат на прокачку охлаждающего теплоносителя. Одним из решений, разрабатываемых для отвода больших тепловых потоков от локальных источников, является применение микроканальных и микроструйных систем охлаждения в режиме однофазной конвекции. В [3] проведено сравнение теплогидравлической эффективности микроканального и микроструйного охлаждения затопленными струями в данных условиях, определены оптимальные условия отвода тепла с использованием этих технологий. В частности, подробно рассмотрен отклик систем охлаждения на изменение их геометрических параметров, поскольку уменьшение размера охлаждаемого устройства может значительно повысить сложность производства и стоимость предлагаемого решения по терморегулированию. Вместе с тем применение однофазных систем отвода тепла не обеспечивает терморегулирование локальных источников тепла с высоким уровнем тепловыделения, поэтому применение микроразмерных двухфазных систем отвода тепла, использующих скрытую теплоту фазового перехода, становится определяющей технологией [4]. Двухфазные системы охлаждения обладают значительными преимуществами по сравнению с однофазными системами отвода тепла, поскольку их ключевым недостатком является большой градиент температуры. Двухфазные системы отвода тепла способны поддерживать равномерность температуры поверхности охлаждаемого устройства, так как в них поддерживается температура, близкая к температуре насыщения охлаждающего теплоносителя.

Известно, что применение микроканальных систем охлаждения ограничено возникновением преждевременного кризиса кипения [5]. Поэтому поиску путей увеличения критического тепलो-

* Работа выполнена при поддержке государственного задания ИТ СО РАН (№ 121031800215).

Диффузия в простых жидкостях по результатам расчетов методом молекулярной динамики*

Г.В. Харламов¹

¹ Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Россия

Изучена температурная зависимость коэффициента самодиффузии в жидкости Леннарда-Джонса. Ранее нами было показано, что температурная зависимость коэффициента диффузии при постоянной плотности является линейной. В свою очередь коэффициенты этой зависимости линейно связаны с плотностью жидкости. Исследование плотности жидкости в зависимости от температуры показывает, что она сильно уменьшается при повышении температуры. В результате сильная температурная зависимость коэффициента самодиффузии в жидкости связана с сильной зависимостью плотности от температуры. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными по самодиффузии в жидком аргоне.

Ключевые слова: диффузия в жидкостях, метод молекулярной динамики, жидкий аргон.

Введение

Молекулярная диффузия в жидкостях давно привлекает внимание исследователей. Накоплена богатая экспериментальная база данных по коэффициентам диффузии и самодиффузии в различных жидкостях [1, 2]. Существуют теоретические модели диффузии, некоторые из которых являются успешными. Например, теории Эйнштейна, Смолуховского [3] и Ланжевена [4] очень хорошо описывают диффузию броуновских частиц в жидкостях. К сожалению, эти теории не применимы к описанию молекулярной диффузии, хотя часто используются для интерпретации экспериментальных данных.

Наиболее часто используется модель диффузии в жидкостях, развитая Я.И. Френкелем [5]. Согласно этой модели тепловое движение какой-либо молекулы в жидкости описывается как колебания вблизи некоторого положения равновесия в ячейке, созданной окружающими ее молекулами. При этом молекула время от времени совершает скачки из одной ячейки в соседнюю, преодолевая потенциальный барьер, обусловленный взаимодействием с другими молекулами ячейки. Таким образом, диффузия происходит за счет этих относительно редких скачков молекул, подобно диффузии атомов в твердых телах. Эта модель приводит к зависимости коэффициента диффузии от температуры в соответствии с формулой Аррениуса

$$D = D_m e^{-\frac{\Delta W}{kT}}, \quad (1)$$

где D_m – коэффициент, слабо зависящий от температуры; ΔW – энергия активация прыжка молекулы. Такая зависимость часто подтверждается экспериментально.

Другой подход к описанию диффузии в жидкостях следует из кинетической теории газов [6]. Решая уравнение Больцмана методом Чепмена – Энскога [7], получают коэффициент самодиффузии в виде

$$D_0 = \frac{3\sqrt{\pi m_0 kT}}{8m_0 \rho \pi \sigma_0^2 \Omega^{(1,1)*}}, \quad (2)$$

где m_0 – масса молекулы; k – постоянная Больцмана; T – температура; ρ – концентрация газа; σ_0 – эффективный диаметр молекулы; $\Omega^{(1,1)*}$ – так называемый омега-интеграл. Уравнение (2) применимо только для разреженного газа, и в этом случае оно успешно работает. Распространение этой теории на плотные газы носит название теории Энскога [8], и, к сожалению, она плохо работает при описании диффузии в жидкостях. Это связано с тем, что механизм диффузии в разреженных газах принципиально иной. В этом случае происходят относительно редкие парные столкно-

* Автор благодарит администрацию СГУПС в лице С.А. Бехера за финансовую поддержку.

Расчет частот столкновений капель при воздействии электрического поля на эмульсию типа вода в масле*

С.А. Васильков¹, Е.А. Кабанов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Для моделирования процесса распада водонефтяной эмульсии под действием электрического поля в промышленных установках необходимо решение уравнения на плотность распределения капель по размерам, для которого частоты столкновений капель оцениваются аналитически. Проведены расчеты частот на основе решения системы уравнений движения большого количества капель, и полученные результаты сопоставлены с аналитическими оценками.

Ключевые слова: водонефтяная эмульсия, электрическое поле, частота столкновений, компьютерное моделирование, метод дискретных элементов.

Введение

Сырая нефть при добыче загрязнена водой, которая должна быть удалена перед ее дальнейшей транспортировкой и переработкой. Распад водонефтяной эмульсии под действием гравитации может занимать длительное время, вплоть до недель [1], так как остатки воды содержатся в нефти в виде медленно оседающих мелких капель. Поэтому для ускорения процесса распада эмульсии используются различные технологии, включая воздействие электрического поля.

Механизм действия электрического поля на эмульсию следующий. Так как капли воды обладают большей электропроводностью и диэлектрической проницаемостью, чем нефть, то во внешнем электрическом поле они поляризуются, приобретая дипольный момент, сонаправленный с электрическим полем. Между находящимися рядом каплями начинают действовать электростатические силы, под действием которых капли одновременно выравниваются вдоль направления поля и притягиваются друг к другу. Таким образом, капли объединяются быстрее, чем без поля. Объединяясь друг с другом, капли увеличиваются в размерах, и их скорость осаждения существенно возрастает, что позволяет быстрее очищать нефть от воды. Процесс сближения и объединения капель в электрическом поле называют электрокоалесценцией, а аппараты, использующие это явление для очистки нефти, – электродегидраторами.

Для проектирования электродегидраторов при помощи компьютерного моделирования важно как можно точнее моделировать процесс распада водонефтяной эмульсии в электрическом поле. Можно выделить несколько уровней описания эмульсии [2].

На самом фундаментальном уровне рассматривается взаимодействие нескольких капель. Соответствующие компьютерные модели, как правило, основаны на методе конечных элементов или объемов и в приближении сплошной среды описывают движение нефти вокруг капель, движение воды внутри них, распределение электрического потенциала в объеме и действующие на поверхность силы. Такие модели позволяют изучать деформацию капель и их движение, а также процессы во время контакта капель [3–7], включая предсказание исхода взаимодействия – объединение, отскок или распыление. При контакте капель формируется водная перемычка, и капли обмениваются зарядами. Отскок происходит, когда две исходные капли не успевают слиться в одну, и электрические силы растягивают их в противоположные стороны. При определенных условиях капля может распасться на множество дочерних капель или край капли может заостриться и с нее может начаться распыление очень маленьких капель [8, 9]. Однако такие модели ресурсоемки и не могут быть использованы для моделирования эмульсии из большого количества капель.

* Работа выполнена за счет средств гранта РНФ № 24-79-00150.

Верификация RANS-моделей турбулентности на задаче внешнего обтекания маслоохладителя

А.Р. Шигапова¹

¹ *Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия*

Рассматриваются вопросы математического моделирования внешнего аэродинамического обтекания единичной секции промышленного маслоохладителя с развитой внешней поверхностью. Скорость нагнетаемого газа на входе в воздушные каналы единичной секции не превышает 10 м/с, число Рейнольдса, рассчитанное по высоте зазора, изменяется в диапазоне от 20000 до 400000, также наблюдается дополнительная геометрически обусловленная турбулизация течения в воздушном тракте единичной секции. Исследуется влияние RANS-моделей турбулентности на структуру потока в воздушных каналах единичной секции маслоохладителя и за секцией, а также оценивается влияние моделей турбулентности на потери давления в воздушном тракте. Методами математического моделирования решается квазистационарная пространственная задача внешней аэродинамики, постановка которой согласуется с экспериментальными исследованиями течения в аэродинамической трубе открытого типа. Приводятся результаты валидации RANS-моделей турбулентности на экспериментальных данных. На основании качественного анализа сопоставимости численных и экспериментальных распределений полей избыточного давления в выходном сечении единичной секции производится первичный выбор моделей турбулентности, позволяющих корректно описать аэродинамику маслоохладителя. На основании количественного анализа расчетных и экспериментальных профилей давления в центральном сечении единичной секции установлено, что для корректного моделирования рабочих процессов во внешних поточных трактах промышленного маслоохладителя целесообразно применять модели турбулентности BSL, BSL ERASM, Спаларта – Алмараса и $k-\omega$ и дополнительное уплотнение расчетных ячеек вблизи развитых поверхностей единичной секции.

Ключевые слова: маслоохладитель, математическое моделирование, аэродинамика, RANS-модели турбулентности, избыточное давление.

Введение

Перегрев силовых установок и гидравлического оборудования остается одной из наиболее распространенных причин выхода из строя [1] промышленного оборудования различного назначения. Эффективным методом предупреждения перегрева систем промышленного оборудования является включение теплообменных устройств различной сложности и назначения в схему рабочей гидравлической системы. Так, для отвода избыточного тепла от рабочих гидравлических жидкостей применяются промышленные маслоохладители. В общем случае промышленный маслоохладитель [1, 2] представляет собой систему из раздающего и собирающего коллекторов, соединенную набором пластинок, как правило, выполненных из алюминиевого сплава. Каждая пластинка содержит внутренние каналы с интенсификаторами теплообмена для подачи масла и развитую (оребренную) внешнюю поверхность для повышения эффективности теплоотдачи масло/металл/воздух. Соответственно, набор двух пластинок, расположенных на расстоянии друг от друга [1], формирует единичную секцию маслоохладителя, где в межреберном пространстве формируются воздушные криволинейные каналы малой толщины с переменной геометрией продольного сечения. Другой характерной особенностью конструкций промышленных маслоохладителей [1, 2] является использование внешних вентиляторов для принудительной подачи холодного воздуха в воздушные каналы маслоохладителя. Таким образом, при величине модуля скорости воздуха на входе в воздушные каналы маслоохладителя не более 10 м/с совокупное влияние геометрических особенностей его конструктивного исполнения и закрутки воздушного потока при его нагнетании вентилятором обеспечивает [3] турбулизацию потока газа, что требует корректного разрешения турбулентных и переходных течений при численном моделировании рабочих процессов в маслоохладителе.

Известно [4] значительное количество методов, подходов и моделей для численного разрешения турбулентных течений. Однако вопросы корректного выбора используемых в ходе численного моделирования физических, технических и технологических процессов моделей турбулентности предполагают [4, 5] не только обязательный учет особенностей физической природы исследуемых процессов, но и вычислительную сложность и емкость конечной математической модели изучаемого процесса.

Исследование вязкости и состава гидрофторэфира различной степени загрязнения

Т.И. Молчанов¹, Н.В. Кукшинов¹

¹ *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия*

Определены зависимости коэффициента кинематической вязкости от температуры для чистого и загрязненного различными примесями гидрофторэфира HFE-7100. Проведена оценка степени влияния примесей на изменение кинематической вязкости теплоносителя. Методом матрично-активированной лазерной десорбции/ионизации определены компоненты, входящие в загрязненный HFE-7100.

Ключевые слова: диэлектрические жидкости, гидрофторэфир, кинематическая вязкость, масс-спектрометрия.

Введение

Диэлектрические жидкости с низкой температурой кипения рассматриваются как теплоносители для различных технических систем [1–3]. Одним из наиболее перспективных и исследуемых теплоносителей является гидрофторэфир HFE-7100 [4–10]. Температура кипения данной жидкости составляет 61 °С, что позволяет использовать фазовый переход для отвода теплоты от различных компонентов технических систем при сохранении рабочего диапазона температур компонентов.

В настоящее время количество работ, посвященных определению теплофизических свойств гидрофторэфиров, невелико [11, 12], в связи с этим определение свойств становится актуальной задачей. При эксплуатации гидрофторэфиров вследствие того, что в химическом соединении присутствует фтор, со временем в растворах начинается процесс образования солей-фторидов, при этом чем больше различных примесей в гидрофторэфире, тем интенсивнее происходит образование фторидов [13].

При эксплуатации систем, использующих в качестве теплоносителя HFE-7100, при контакте с жидкостью может происходить процесс вымывания связующих веществ из элементов системы, что влияет на изменения свойств самого теплоносителя и работу системы в целом. В процессе эксплуатации теплоноситель напрямую контактирует с различными компонентами оборудования, включая металлы, пластики, полимеры, изоляционные материалы, сэвилены, флюсы и прочие антипирены.

Изменение свойств зачастую связано с изменением состава веществ, которое происходит вследствие попадания в него примесей. Изучение примесей в жидких веществах в основном проводится с помощью методов спектрометрии, таких как ИК-спектрометрия, рамановская спектрометрия и масс-спектрометрия. Исследование состава жидкостей на основе гидрофторэфира в чистом виде для составления альбома спектров проводится методом масс-спектрометрии [14].

Данные о теплофизических свойствах теплоносителей, используемых в системах охлаждения, необходимы для определения характеристик кипения [15]. Одним из ключевых свойств является вязкость вещества. Исследований, посвященных экспериментальному нахождению зависимости кинематической вязкости от температуры для гидрофторэфиров, существует крайне мало.

Цель данной работы – определение коэффициента кинематической вязкости чистого и загрязненного примесями гидрофторэфира HFE-7100 в зависимости от температуры капиллярным методом [16]. Для изучения состава примесей используется масс-спектрометрия методом матрично-активированной лазерной десорбции/ионизации (МАЛДИ), позволяющая исследовать летучие жидкости и полимерные примеси [17, 18].

Постановка эксперимента по исследованию кинематической вязкости

Для определения вязкости жидкости используется капиллярный метод, заключающийся в оценке времени истечения жидкости через капилляр характерного размера при определенной температуре. Необходимое оборудование – капиллярный вискозиметр для определения вязкости

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 537.226

DOI: 10.17223/00213411/69/1/6

Определение подвижностей ионов в диэлектрических жидкостях на основе токовых характеристикД.В. Журавлев¹, С.А. Васильков¹¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Предложена методика определения подвижностей ионов в слабопроводящих диэлектрических жидкостях на основе анализа ампер-секундных характеристик. Метод протестирован с использованием численного моделирования в системе электродов нить – цилиндр и позволяет отдельно восстанавливать подвижности положительных и отрицательных ионов. Особенностью подхода является возможность анализа подвижностей естественных ионов, возникающих за счет диссоциации, без инъекции или внешней ионизации.

Ключевые слова: электродинамика, диэлектрическая жидкость, подвижность ионов, ампер-секундная характеристика, вольт-амперная характеристика, численное моделирование.

Введение

Подвижность ионов в жидких диэлектриках – один из ключевых параметров, характеризующих способность заряженных частиц перемещаться под действием электрического поля. Точные значения подвижности ионов необходимы для анализа, разработки и оптимизации различных технологических процессов, связанных с электрогидродинамическими (ЭГД) явлениями.

Важным является изучение подвижности ионов в изоляционных материалах, таких как трансформаторные масла и маслonaполненная бумага, используемых в высоковольтной технике [1]. Знание значений подвижности позволяет проводить точный анализ надежности и срока службы изоляции, а также лучше понимать механизмы электрической проводимости, особенно в условиях высоких напряжений и температур.

Точные значения подвижности также необходимы при анализе и разработке ЭГД-насосов и электрогидродинамических систем теплоотвода. В работе [2] было показано, что подвижность ионов играет ключевую роль в определении эффективности ЭГД-насоса, основанном на униполярной инъекции зарядов: чем ниже подвижность ионов, тем выше эффективность работы насоса. Для ЭГД-насоса проводимости (EHD-conduction pump) критически важным фактором является соотношение подвижностей ионов разного знака, что показано в исследованиях [3, 4].

Несмотря на важность точного знания подвижности ионов, существующие методы ее определения нередко сопряжены с серьезными ограничениями. Основные трудности связаны с необходимостью искусственной генерации зарядов, сложностью интерпретации получаемых данных и невозможностью отдельного определения подвижностей положительных и отрицательных ионов.

На практике исследователи электрогидродинамических явлений часто сталкиваются с отсутствием достоверных экспериментальных данных о подвижности ионов в конкретных жидкостях. В таких случаях прибегают к косвенной оценке, наиболее распространенной формой которой является использование правила Вальдена [5–10]. Этот подход устанавливает связь между подвижностью иона и вязкостью среды, предполагая, что ионы можно рассматривать как сферические частицы, перемещающиеся в вязкой жидкости под действием электрического поля. Однако применение этого метода требует знания гидродинамического радиуса иона – параметра, сильно зависящего от состава и свойств конкретной жидкости, что ограничивает точность получаемых оценок.

Одним из основных подходов к измерению подвижности является метод пролета, в котором фиксируется время перемещения ионов между электродами под действием электрического поля. На его основе рассчитывается подвижность как отношение пройденного расстояния к произведению времени и напряженности поля.

Однако ключевым недостатком является то, что он требует дополнительной генерации ионов – обычно за счет внешнего воздействия: ионизации [11], фотоэмиссии [12] или инъекции зарядов

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 539.89:669

DOI: 10.17223/00213411/69/1/7

**Влияние температуры лазерного воздействия
на структуру и механические свойства естественных композитов,
созданных на основе сплава Fe–18Cr–10Ni**

Е.Н. Блинова¹, В.Д. Воронов², Э.Д. Ишкиняев², М.А. Либман¹,
А.В. Осинцев², В.Н. Петровский², В.И. Пичиенко², Н.А. Шурыгина^{1,3}

¹ Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина, г. Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

³ МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия

Исследовано влияние температуры лазерного воздействия на формирование структурных состояний и механические свойства естественных композитов, созданных на основе аустенитно-мартенситного сплава Fe–18Cr–10Ni. Методом просвечивающей электронной микроскопии была исследована микроструктура областей аустенита, полученных сверхбыстрым лазерным нагревом до различных температур в интервале устойчивости γ -фазы, что соответствует температурам 550–850 °С. Было выявлено наличие определенных различий в микроструктуре γ -фазы, полученной в результате нагрева лазерным излучением до различных температур. Анализ механических свойств образцов естественных композитов показал, что изменение температуры лазерного воздействия существенным образом влияет на форму кривых «деформация – напряжение», а следовательно, на соотношение прочностных и пластических характеристик композита.

Ключевые слова: композит, мартенсит, аустенит, прямое и обратное мартенситные превращения, лазерное воздействие, механические свойства, структура, просвечивающая электронная микроскопия.

*Посвящается светлой памяти
профессора Александра Марковича Глезера*

Лазерная обработка металлических материалов относится к одному из тех научных направлений, которые в настоящее время эффективно применяются как для обработки поверхности металлов, так и для создания материалов с новыми сочетаниями эксплуатационных свойств [1, 2]. В результате сверхбыстрого лазерного нагрева формируются неравновесные структурно-фазовые состояния, обладающие сочетанием физических или механических свойств, которые не могут быть реализованы в равновесном состоянии. В работах [3–7] были рассмотрены особенности фазовых и структурных превращений в легированных сталях с различной исходной структурой при воздействии на нее лазерного излучения высокой интенсивности. Так было изучено явление структурной наследственности [3], рассмотрены закономерности перекристаллизации сталей, влияние предварительного отпуска и деформации на формирование зеренной структуры [4, 5], определен механизм зарождения аустенита в сталях, имеющих различную исходную структуру [6]. В работе [7] было экспериментально доказано, что при лазерном нагреве сталей с ферритно-перлитной и перлитной структурами наблюдается бездиффузионный сдвиговый механизм образования аустенита. Лазерное излучение используется также при формировании физических, в частности, магнитных свойств, аморфных и нанокристаллических сплавов [8–13]. В настоящее время все большее значение приобретает применение лазерного воздействия для создания новых композитных металлических материалов. При варьировании основных характеристик такого излучения (мощность, локальность) удастся изготавливать естественные композиты, сочетающие макроскопические области с различным уровнем физических или механических свойств. Примером таких композитов являются материалы, созданные на основе сплавов железа, претерпевающих прямые и обратные фазовые превращения с широким температурным гистерезисом, в частности, аустенитно-мартенситные сплавы системы железо – хром – никель, в которых реализуются прямое ($\gamma \rightarrow \alpha$) и обратное ($\alpha \rightarrow \gamma$) мартенситные превращения [14]. В работах [15–20] было установлено, что для сплава системы железо – хром – никель, содержащего 18.35% Cr и 9.65% Ni (Fe–18Cr–10Ni), использование холодной пластической деформации для реализации прямого мартенситного превра-

Кавитация в присутствии слаборастворимых наноразмерных пузырьков в воде

С.И. Кошоридзе¹

¹ *Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия*

Рассматривается акустическая кавитация в присутствии слаборастворимых нанопузырьков в воде. Исследована зависимость порога кавитации от размера пузырьков и поверхностного натяжения границы газ – вода в рамках теории Толмена. Показано, что линейное приближение для уравнения Рэлея – Плессета для нанопузырьков несправедливо даже в слабом акустическом поле и для расчета кавитации в данном уравнении следует сохранять нелинейные члены.

Ключевые слова: нанопузырь, порог кавитации, параметр Толмена, уравнение Рэлея – Плессета.

Введение

Явления кавитации встречаются повсеместно как в природе, так и в промышленности [1–4]. Схлопывание кавитационных пузырьков имеет место при струйной печати, ультразвуковой очистке поверхностей, неинвазивных разрушениях камней в почках с помощью акустических ударных волн, сонохимии, сонолюминесценции, а также при исследованиях геотермальных процессов. Разрушение гидродинамически возникающих кавитационных пузырьков оказывает неблагоприятное воздействие на гидравлические системы, клапаны и лопасти гребных винтов, вызывая износ и эрозию, в то время как образование кавитационных пузырьков может повлиять на характеристики судов на подводных крыльях. В биологии, где температура определяется окружающей средой, метастабильная вода образуется главным образом за счет снижения давления. Схлопывание кавитационных пузырьков создает в папоротниках механизмы, подобные катапульте, и позволяет креветкам оглушать добычу. Наоборот, кавитация создает препятствие при подъеме сока по высоким деревьям, где наблюдается значительное отрицательное давление.

Согласно классической теории нуклеации [5], макроскопический объем абсолютно чистой воды при комнатной температуре должен выдерживать давление в районе от –120 до –160 МПа достаточно длительное время. Однако реальность такова, что добиться абсолютной чистоты жидкостей практически невозможно. Даже применяя современные методы очистки воды, избавиться от микро- и наноразмерных нерастворимых гидрофобных примесей невозможно [6, 7]. Кроме того, влияют стенки контейнеров, дефекты поверхности или щели, в которых ранее находились пузырьки газа, действующие как зародыши кавитации. Эти факторы вызывают существенное понижение порогового кавитационного давления от значений, предсказываемых классической теорией нуклеации.

В настоящей работе рассматривается явление кавитации в воде при присутствии наноразмерных пузырьков, наполненных слаборастворимым в воде газом. Целью нашего исследования является изучение зависимости порога кавитации от размера и поверхностного натяжения на границе газ – вода. Поверхностное натяжение считается зависимым от радиуса кривизны и описывается теорией Толмена [8]. Будет исследовано влияние так называемого параметра (длины) Толмена на явление кавитации и оценена частота звуковой волны, при которой можно ожидать появления акустической кавитации.

Влияние изменяющегося с кривизной поверхностного натяжения на порог кавитации было исследовано ранее в [9]. Но так как долгоживущие объемные нанопузырьки в жидкостях были обнаружены относительно недавно (см. обзорную статью [10]), в [9] рассматривались только микро-размерные пузырьки, для которых эффект Толмена незначителен и зависимость поверхностного натяжения от радиуса обусловлена другими причинами (это главным образом адсорбция поверхностно активных веществ на границе раздела газ – вода и отрицательное давление, вызванное зарядом на поверхности нанопузырька [11]).

Таким образом, можно считать, что влияние наноразмерных пузырьков на кавитацию в литературе не рассматривалось.

Влияние высокоэнергетической механической активации дисперсных систем на структуру композиционных материалов ZrB_2-SiC^*

А.Г. Бурлаченко¹, Ю.А. Мировой¹, С.П. Буякова¹

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

Изучено влияние высокоэнергетической механической обработки дисперсных систем ZrB_2 и ZrB_2-SiC . Показано, что механическая обработка порошков при ускорении 30g в планетарной мельнице обеспечивает активацию, что сопровождается появлением новых границ раздела в частицах (уменьшается размер ОКР) и микродеформации кристаллической решетки ZrB_2 . Механическая обработка порошков сопровождалась увеличением площади удельной поверхности, что явилось результатом образования плотных агрегатов. Увеличение длительности механической обработки способствовало увеличению плотности керамики ZrB_2 и керамических композитов ZrB_2-SiC . Наибольшей относительной плотностью обладал керамический композиционный материал ZrB_2-SiC .

Ключевые слова: механическая активация, диборид циркония, карбид кремния.

Введение

Тугоплавкие соединения оксидов, боридов, карбидов металлов являются основной частью материалов для изделий, эксплуатируемых в термонагруженных условиях. Среди материалов с высокой температурой плавления особый интерес представляют керамические композиты на основе ZrB_2 [1–4]. Керамические композиционные материалы ZrB_2-SiC демонстрируют высокую термохимическую стабильность, стойкость к окислению при высоких температурах в воздушной среде. Высокая температура плавления тугоплавких соединений предполагает высокую температуру консолидации порошковых изделий из них, что не всегда возможно обеспечить в реальных условиях их изготовления. Как и все вещества с ковалентной связью, диборид циркония демонстрирует низкую концентрацию и низкую подвижность дефектов кристаллической ячейки, сильная ковалентная связь в ZrB_2 является причиной низкой диффузионной подвижности атомов, что затрудняет его спекание [5–7]. Для активации процесса консолидации и улучшения термостойкости в окислительной атмосфере в состав композитов на основе ZrB_2 добавляют кремнийсодержащие добавки. Помимо этого, одним из решений по активации процесса консолидации дисперсных систем тугоплавких соединений является высокоэнергетическая механическая обработка [8–11]. Несмотря на хорошую изученность процессов, происходящих при механической обработке порошков, для каждой порошковой системы требуется изучение влияния длительности механической обработки на свойства и фазовый состав порошков после обработки, поскольку эти характеристики в значительной мере определяют структуру и свойства получаемых из них изделий [12]. Хорошо известно, что при высокоэнергетической обработке порошков происходят разные процессы: удаление с поверхности частиц сорбированных газов; деформация; образование новых поверхностей в результате разрушения частиц; химико-реакционное взаимодействие между компонентами порошковой смеси; образование и разрушение агрегатов [13, 14]. В результате этих процессов происходит изменение физических характеристик дисперсных систем. Даже для твердых и прочных материалов после высокоэнергетической механической обработки фиксируют увеличение микродеформации кристаллической решетки, уменьшение размеров областей когерентного рассеяния рентгеновских лучей [8, 15]. Изменение удельной площади поверхности отражает влияние механической обработки на поверхность частиц порошков. Увеличение удельной поверхности в процессе обработки порошков может быть связано как с уменьшением размеров частиц, так и с увеличением дефектности поверхности. Уменьшение удельной поверхности является индикатором образования устойчивых агрегатов в процессе высокоэнергетической механической обработки.

Цель данной работы – исследование влияния высокоэнергетической механической обработки порошковых смесей ZrB_2-SiC на физические свойства и структуру получаемых керамических композитов.

* Работа выполнена в рамках реализации мероприятий программы развития научного центра мирового уровня «Новые материалы специального назначения», соглашение о предоставлении субсидии от 25 июня 2025 г. № 075-15-2025-589.

**Сверхэластичное поведение [001]-монокристаллов
неэквивалентного высокоэнтропийного сплава Fe–28Ni–17Co–11.5Al–2.5Ta
с наноразмерными частицами γ' -фазы**

Ю.И. Чумляков¹, И.В. Куксгаузен¹, Д.А. Куксгаузен¹,
В.А. Петраков¹, И.В. Киреева¹, В.А. Кириллов¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Впервые исследована обратимая деформация при γ - α' -мартенситном превращении (МП) в неэквивалентных высокоэнтропийных Fe–28Ni–17Co–11.5Al–2.5Ta (ат.%) кристаллах, ориентированных вдоль направления [001], при растяжении. Большая обратимая деформация $\epsilon_{об} = 10.5\%$ наблюдается при размере частиц γ' -фазы $d = 3\text{--}5$ нм и уменьшается до 5.8% при $d = 7\text{--}9$ нм. Установлено, что $\epsilon_{об} = 10.5\%$ превышает теоретическое значение деформации решетки превращения $\epsilon_{пр} = 7.76\%$. Физическая причина $\epsilon_{об} > \epsilon_{пр}$ связана с развитием обратимого γ - α' МП и упругого $\langle 011 \rangle \{110\}$ механического двойникования в α' -мартенсите.

Ключевые слова: γ - α' -термоупругое мартенситное превращение, обратимая деформация, монокристаллы, наноразмерные частицы γ' -фазы.

Введение

Известно, что в неэквивалентных высокоэнтропийных сплавах Fe–Ni–Co–Al–X (X = Ta, Ti, Nb, V) наблюдается эффект памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичность (СЭ), которые связаны с обратимым ГЦК(γ)–ОЦТ(α') термоупругим мартенситным превращением (МП) [1–14]. Эти сплавы по функциональным и прочностным свойствам не уступают сплавам TiNi, которые широко используются в технике и медицине. Необходимые условия для обратимого γ - α' МП достигаются за счет выделения наноразмерных частиц γ' -фазы (упорядоченная по типу Ni₃Al L1₂-структура) размером $d < 10$ нм [1–3, 6–13].

В поликристаллах Fe–Ni–Co–Al–Ta–V при температуре 300 К при растяжении были обнаружены большая обратимая деформация $\epsilon_{об}$ до 13.5%, высокие прочностные свойства до 1 ГПа и большой механический гистерезис $\Delta\sigma$ [1]. Физическая причина аномально высокой обратимости, которая превышала теоретическую величину деформации решетки при превращении $\epsilon_{пр} = 8.7\%$ при деформации растяжением вдоль направления [001], связана с вкладом в обратимую деформацию $\langle 011 \rangle \{011\}$ упругого механического двойникования α' -мартенсита [10]. Это экспериментально было показано на монокристаллах Fe–Ni–Co–Al–Nb с осью растяжения вдоль направления [001], содержащих наноразмерные частицы γ' -фазы ((FeNiCo)₃AlNb) диаметром $d = 3\text{--}5$ нм [10].

В представленной работе ставилась задача выяснить принципиальную возможность достижения условия $\epsilon_{об} > \epsilon_{пр}$ в монокристаллах Fe–28Ni–17Co–11.5Al–2.5Ta (ат.%) при растяжении вдоль направления [001] и исследовать зависимость величины $\epsilon_{об}$ от размера частиц γ' -фазы при температуре старения 973 К в течение 0.5 и 5 ч.

1. Материал и методы исследования

Монокристаллы сплава Fe–28Ni–17Co–11.5Al–2.5Ta (ат.%) выращивали методом Бриджмена. Образцы для растяжения вдоль направления [001] в форме двойной лопатки размером $2 \times 1.5 \times 15$ мм вырезали на электроискровом станке. Образцы гомогенизировали в атмосфере гелия при 1570 К в течение 24 ч и затем закачивали в воду. Старение при 973 К проводили в атмосфере гелия. Температуры МП при охлаждении до 77 К и нагреве до 573 К исследовали по температурной зависимости электрического сопротивления $\rho(T)$. Структуру α' -мартенсита изучали на оптическом микроскопе Keyence VHX-2000. Размер частиц γ' -фазы и тип двойников в α' -мартенсите определяли на электронном микроскопе Jeol 2010 при ускоряющем напряжении 200 кВ. Механические свойства и величину обратимой деформации при растяжении исследовали на испытательной машине Instron 5969 при скорости деформации $4 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Напряжения $\sigma_{кр}$ в температурном интер-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 25-19-00024, <https://rscf.ru/project/25-19-00024/>.

Влияние температуры диффузионного жидкофазного спекания на структуру и фазовый состав пористых сплавов на основе никелида титана*

А.С. Гарин¹, Д.А. Григорьев¹, Г.А. Байгонакова¹, Е.С. Марченко¹, А.С. Жуков¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Исследовано влияние температуры диффузионного спекания (1230–1270 °С) на структуру и фазовый состав пористых сплавов на основе никелида титана (TiNi), полученных методом диффузионного жидкофазного спекания. Установлено, что повышение температуры спекания приводит к уменьшению пористости, изменению распределения пор по размерам и изменению фазового состава сплава. Определены оптимальные режимы спекания, обеспечивающие баланс между пористостью, структурой и фазовым составом, что является ключевым для получения материалов с заданными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: TiNi, диффузионное спекание, фазовый состав, структура, пористость, оптическая микроскопия, электронная микроскопия, рентгеновская дифракция.

Введение

Сплавы TiNi обладают уникальным сочетанием эффекта памяти формы, сверхэластичности, высокой коррозионной стойкости и биосовместимости, что делает их востребованными в современной технике и медицине [1, 2]. Особый интерес представляют пористые сплавы на основе TiNi, которые благодаря пористо-проницаемой структуре обеспечивают адгезию и пролиферацию клеток, а также достаточную проницаемость для биологических жидкостей [3]. В тканевой инженерии и сосудистой хирургии данные материалы используются как каркасы для выращивания клеточных культур и имплантов, способствующие интеграции с окружающими тканями [2, 4].

В литературе описаны различные методы получения пористых сплавов на основе TiNi, начиная от традиционного порошкового спекания до селективного лазерного плавления и микроволнового спекания [2, 5–7]. Во всех этих методах ключевым параметром является температура спекания, определяющая интенсивность атомной диффузии, формирование межчастичных связей, сохранение необходимого уровня пористости и контроль фазового состава [8, 9]. Неправильно выбранный режим термообработки может приводить либо к недостаточному уплотнению и низкой прочности материала, либо к чрезмерной усадке пор и образованию хрупких интерметаллических фаз [10].

Несмотря на многочисленные исследования, в которых рассматривались отдельные аспекты микроструктуры и фазообразования при спекании TiNi, до сих пор отсутствует всесторонний анализ влияния температуры жидкофазного диффузионного спекания именно в узком температурном интервале 1230–1270 °С. Существует разрыв между данными, полученными при традиционном спекании при более низких температурах, и результатами экспериментов с применением более сложных технологий, где температурный диапазон, как правило, шире или включает другие легирующие добавки.

Цель настоящей работы – систематическое исследование влияния температуры спекания в диапазоне 1230–1270 °С на микроструктуру, распределение пор и фазовый состав пористых сплавов на основе TiNi, полученных методом жидкофазного диффузионного спекания. Установление оптимальных условий термообработки позволит создавать материалы с заданным балансом прочностных и функциональных характеристик, необходимых для биомедицинских материалов.

Материалы и методы

В качестве исходного материала использовался порошок TiNi марки ПВ-Н55Т45, обладающий двойной морфологией – компактной и губчатой, сформировавшейся в ходе гидридно-кальциевой восстановительной реакции оксида титана. Порошок загружали в кварцевую цилиндрическую трубку и подвергали диффузионному жидкофазному спеканию в электровакуумной пе-

* Исследование проводилось при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2025-607 от 01/07/2025).

Структура и физико-механические свойства алюминиевого сплава А7, упрочнённого волокнами базальта*

В.Д. Валихов¹, И.Л. Синкина¹, А.Б. Ворожцов¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Проведено исследование влияния базальтовых волокон в количестве 5 мас.% на структуру и физико-механические свойства алюминиевого сплава А7. Комбинация ультразвукового и вибрационного воздействия на расплав алюминия и упрочняющего эффекта базальтовых волокон позволили повысить предел прочности, условный предел текучести и относительное удлинение до 83 МПа, 33 МПа и 40% соответственно. В результате исследований зафиксировано незначительное снижение электропроводности на 3%.

Ключевые слова: алюминий, базальт, базальтовые волокна, упрочнение, ультразвуковая обработка, вибрационная обработка.

Введение

Для улучшения механических свойств технически чистого алюминия и создания композиционных материалов на его основе предпочтительно используются тугоплавкие керамические частицы, такие как оксид алюминия (Al_2O_3) и карбид кремния (SiC). Введение нано- и микроразмерных частиц SiC приводит к значительному повышению предела прочности и твёрдости по Виккерсу.

Исследования, представленные в работах [1–3], показывают, что механические свойства алюминия улучшаются с увеличением концентрации наноразмерного SiC вплоть до 7.5 мас.%. Дальнейшее увеличение содержания SiC оказывает негативное влияние на трещиностойкость и пластичность. Композиционные материалы, армированные микроразмерным карбидом кремния, также демонстрируют тенденцию к одновременному росту предела прочности и твёрдости по Виккерсу. Важно отметить, что при этом плотность композита снижается с повышением доли SiC .

Введение карбида кремния негативно влияет на электропроводность технического алюминия. Основными причинами снижения проводимости являются увеличение пористости [4], диэлектрическая природа самого карбида кремния [5], повышение плотности дислокаций, что препятствует свободному движению электронов [6].

Аналогичная ситуация наблюдается при использовании оксида алюминия (Al_2O_3), который, будучи диэлектриком, также замедляет движение электронов [7]. Механизмы, способствующие повышению прочности, также вносят дополнительный негативный вклад в проводимость, как было указано для карбида кремния.

В работе [8] для повышения механических свойств чистого алюминия в него были введены углеродные нанотрубки (УНТ) методом пропитки расплавом под низким давлением. Чтобы предотвратить реакцию между УНТ и алюминиевым расплавом с образованием карбида алюминия (Al_4C_3), который негативно влияет на прочностные свойства, нанотрубки были покрыты оксидом кремния (SiO_2).

Однако оксид кремния также вступает в реакцию с расплавом алюминия, образуя оксид алюминия (Al_2O_3) [9]. Это согласуется с результатами Park et al. [10], которые зафиксировали ярко выраженные пики Al_4C_3 в образцах, полученных методом пропитки расплавом, по сравнению со спеклёнными образцами. Их исследования показали, что добавление 0.3 мас.% УНТ резко снижает пластичность, делая композит хрупким, что может быть напрямую связано с образованием Al_4C_3 .

Температура обработки оказывает сильное влияние на образование карбидов, что объясняется более высокой реакционной способностью. Избежать образования карбидов становится практически невозможно при увеличении количества промежуточных этапов обработки (например, горячего прессования или искроплазменного спекания) или при использовании более высоких температур.

* Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2024-0007.

Влияние углеродных материалов на структуру и фазовый состав композиционной керамики на основе многокомпонентной системы Hf-Ti-B-C-N^*

Н.С. Евсеев¹, А.П. Хрусталеv¹, И.А. Бельчиков¹, М.Г. Хмелева¹, И.А. Жуков¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Рассмотрено влияние углерода на композиционную керамику на основе многокомпонентной системы Hf-Ti-B-C-N . Процесс получения композиционного материала основан на высокотемпературных экзотермических реакциях. При этом элементы Ti и Hf подвергаются вакуумному спеканию для образования твердого раствора (Ti, Hf) и используются в качестве исходных компонентов смеси Hf-Ti-B-C . В качестве углерода в работе используются отходы химического производства (сажа) и графит. Исследованы структура и фазовый состав композиционной керамики на основе системы Hf-Ti-B-C-N в зависимости от аллотропных модификаций углерода (сажа, графит). Представленные результаты демонстрируют принципиальную возможность получения методами порошковой металлургии композиционной керамики $(\text{Hf,Ti})\text{CN}-(\text{TiB}_2/\text{TiC}-\text{TiB}_2)$. Показано, что применение термически сопряженного синтеза и графита в качестве источника углерода способствует образованию фазы TiC в композиционной структуре.

Ключевые слова: композиционная керамика, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, структура, фазовый состав, карбонитрид гафния, диборид титана, карбид титана.

Введение

В последние годы высокоэнтропийные материалы (ВЭМ) привлекают значительное внимание научного сообщества благодаря их уникальным механическим, термическим и функциональным свойствам, обусловленным высокой энтропией смешения [1]. Если изначально исследования были сосредоточены на высокоэнтропийных сплавах (ВЭС) [2], то в последнее десятилетие активно развивается направление высокоэнтропийной керамики (ВЭК), включающей оксидные [3], нитридные, боридные [4] и карбидные [5] соединения, а также их более сложные вариации (оксинитриды, карбонитриды и др.) [6–9].

На сегодняшний день тугоплавкие высокоэнтропийные сплавы и керамики рассматриваются как новый вид жаропрочных материалов с большими перспективами применения благодаря своим превосходным механическим свойствам. Такие сплавы обладают потенциалом для их использования в качестве жаропрочных материалов нового поколения взамен материалов на основе никеля. Использование тугоплавких многокомпонентных сплавов и керамик может способствовать улучшению функциональных характеристик ракетно-космических летательных аппаратов, увеличению коэффициента полезного действия авиационных двигателей, нефтедобывающих газотурбинных установок и транспортной техники. Приобретение новых фундаментальных знаний о процессах синтеза и физико-химических закономерностях формирования структуры и свойств керамики на основе тугоплавких высокоэнтропийных систем позволят получать материалы с необходимым набором функциональных характеристик (высокая жаропрочность, износостойкость, коррозионная стойкость и др.).

Особый интерес представляет керамика на основе переходных металлов (Ti, Zr, Hf, Nb, Ta), обладающая высокой твердостью, термической стабильностью и стойкостью к окислению. В частности, нитриды (например, $(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{N}$), карбиды $((\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{C})$ и бориды $((\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2)$ демонстрируют потенциал для применения в защитных покрытиях, инструментальных материалах и термоядерных технологиях [10]. Обзор современных научных работ, посвященных получению высокоэнтропийных материалов, показал возрастающий интерес исследователей к керамическим материалам на основе элементов Ti и Hf [7, 8, 11–13]. Так, в работе [8] были получены керамики $(\text{Ti,Hf})(\text{C,N})$ с различным содержанием гафния методом карбо-термического восстановления-нитридации и последующего электроискрового плазменного спекания и установлено, что добавление гафния улучшает коррозионную стойкость керамики $(\text{Ti,Hf})(\text{C,N})$ в растворе NaOH.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00664, <https://rscf.ru/project/25-29-00664/>.

Изучение поведения образцов тяжелого бетона при ударно-волновом сжатии*

А.А. Козулин¹, П.О. Петров¹, И.А. Жуков¹, Г.В. Гаркушин²,
А.С. Савиных², С.В. Разоренов², В.В. Каракулов¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

² *ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН, г. Черноголовка, Россия*

Приведены результаты экспериментальных и теоретических работ по изучению особенностей механического поведения при ударно-волновом сжатии образцов тяжелого бетона. В экспериментах нагружающий микросекундный плоский ударный импульс был сгенерирован взрывной линзой. В результате получены экспериментальные профили скорости свободной поверхности на образцах длиной от 25 до 500 мм. Определены значения динамической прочности при сжатии образцов из исследуемого тяжелого бетона и коэффициент динамического упрочнения. Методами численного моделирования исследованы эффекты прохождения ударной волны в модельном образце бетона в виде гетерогенной среды со стохастическим распределением частиц наполнителя. Результаты численного моделирования механического поведения бетона при ударном нагружении показали формирование нестационарных и существенно неоднородных полей деформации с образованием диссипативных структур на мезомасштабном уровне.

Ключевые слова: ударно-волновое нагружение, прочность на сжатие, тяжелый бетон, численное моделирование.

Введение

Научное исследование, описанное в данной работе, касается оценки деформационного поведения тяжелого бетона при ударно-волновом сжатии как сложно структурированного композиционного материала. Изучение особенностей деформирования бетонов на разных масштабных уровнях при высокоэнергетических воздействиях представляет интерес с точки зрения физики конденсированного состояния. Полученные результаты работы актуализируются возросшей напряженностью в геополитическом положении, что создает дополнительные угрозы военного, техногенного и террористического воздействия на энергетические и социально-значимые инфраструктурные объекты – это требует прогностической оценки ресурса конструкций в экстремальных ситуациях при действии взрывных, ударно-волновых и импульсных нагрузок для детальной проработки инфраструктуры на стадии проектирования и строительства. В открытом доступе и наукометрических базах мало информации по динамическим свойствам отечественных бетонов и методикам проведения численного моделирования взрывного воздействия на них [1, 2]. При моделировании деформирования бетонных конструкций бетон часто рассматривается как однородный или квази-однородный материал. Однако на практике этот материал представляет собой комплекс компонентов (цементной пасты и гранитного заполнителя) с различными физико-механическими свойствами. Эти компоненты образуют композитную структуру бетона. Структура и ее изменение в процессе деформирования могут оказывать существенное влияние на механические и эффективные свойства бетона. Отсюда существует острая необходимость описания динамических прочностных свойств отечественных бетонов, используемых при строительстве ответственных сооружений несущих и защитных конструкций энергетики и социально-значимых объектов [3–5]. А комплексная оценка с использованием экспериментальных и теоретических подходов позволяет лучше понять физику деформационных процессов. Эта информация полезна для ряда заинтересованных лиц как эксплуатирующих организаций, так и для инженеров-проектировщиков, производителей бетонов и строителей.

Цель данной работы – необходимость оценки прочностных свойств тяжелого бетона при ударно-волновом сжатии и поведения его структуры на мезоскопическом масштабном уровне, что достигалось проведением экспериментальных работ и численного моделирования.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00750, <https://rscf.ru/project/25-29-00750/>.

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 539.194:535.37

DOI: 10.17223/00213411/69/1/15

**Лазерно-индуцированная флуоресценция
и спектроскопия наведенного поглощения бисфенола А***О.Н. Чайковская^{1,2}, Е.Н. Бочарникова^{1,3}, Е.Н. Тельминов¹, Д.М. Ежов¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*² *Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Россия*³ *Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск, Россия*

Бисфенол А – известный разрушитель эндокринной системы человека. Исследование направлено на выявление особенностей лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) и наведенного поглощения бисфенола А при различных рН и растворителя для разработки метода обнаружения токсиканта в растворителях и твердых матрицах. Спектральные характеристики бисфенола А очень чувствительны к длине волны возбуждения. Были использованы три длины волны возбуждения от Nd:YAG-лазера. Спектры ЛИФ бисфенола А в воде при возбуждении на 266 нм имеют длинноволновый слабый «хвост» в области 350–510 нм. Для изучения свойств синглетных и триплетных возбужденных состояний были изучены спектры наведенного поглощения бисфенола А в воде, этаноле, изопропанол и диметилсульфоксиде (ДМСО), а также при различных рН среды в области от 200 до 800 нм. Наведенное поглощение и лазерно-индуцированная флуоресценция бисфенола А показали чувствительность к рН среды. Показано, что с увеличением донорного числа растворителя (от гексана с низким донорным числом до ДМСО с высоким донорным числом) происходил батохромный сдвиг в спектрах поглощения и ЛИФ бисфенола А. Этот сдвиг указывает на стабилизацию основного и возбужденного состояний бисфенола А за счет сольватации растворителем с более сильными донорными свойствами. Полоса наведенного поглощения при 485 нм связана с синглет-синглетным поглощением, которое уменьшается со временем в спиртовых растворителях и ДМСО, но не в воде. Триплет-триплетное поглощение в области 400 нм зависит от рН среды, что свидетельствует о влиянии протонирования/депротонирования на спектральные свойства триплетного состояния бисфенола А.

Ключевые слова: бисфенол А, спектроскопия, фосфоресценция, лазерно-индуцированная флуоресценция, наведенное поглощение, оптический сенсор.

Введение

Проблема загрязнения окружающей среды токсичными веществами является одной из наиболее актуальных в современном мире [1]. Среди широкого спектра загрязнителей особое внимание привлекает бисфенол А, широко используемый в производстве поликарбонатного пластика, эпоксидных смол и термобумаги [2, 3]. Благодаря своему широкому применению бисфенол А повсеместно обнаруживается в различных объектах окружающей среды, включая воду, почву, воздух и пищевые продукты [4]. Бисфенол А является эндокринным дизраптором, способным имитировать или блокировать действие гормонов, что приводит к негативным последствиям для здоровья человека и животных, таким как нарушение репродуктивной функции, развитие ожирения, сахарного диабета и некоторых видов рака [5, 6].

В связи с растущей обеспокоенностью по поводу воздействия бисфенола А на окружающую среду и здоровье человека разработка эффективных и чувствительных методов его обнаружения является крайне важной задачей [7]. Традиционные методы анализа, такие как газовая хроматография-масс-спектрометрия и жидкостная хроматография-масс-спектрометрия, обладают высокой точностью и чувствительностью, но требуют сложной пробоподготовки, дорогостоящего оборудования и квалифицированного персонала [8, 9]. В связи с этим возрастает потребность в разработке простых, быстрых и экономичных методов обнаружения бисфенола А, пригодных для мониторинга в режиме реального времени и полевых условиях [10].

Лазерно-индуцированная флуоресценция (ЛИФ) является перспективным методом для обнаружения различных веществ благодаря своей высокой чувствительности, селективности и воз-

* Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030), проект № НУ 2.0.4.25 МЛ.

ПЕРСОНАЛИЯ

УДК 539.194:535.37

DOI: 10.17223/00213411/69/1/16

**О принципе дополнительности Бора
в практике университетского образования. Исторический аспект
(к 100-летию квантовой теории и технологий
и к 150-летию основания Императорского Томского университета)***

Г.В. Майер¹, С.А. Некрылов¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Приводится изначальная модель Императорского Томского университета, заключающаяся в сочетании элементов модели Гумбольдта и задач промышленного освоения Сибири. Обсуждается проявление принципа дополнительности Бора в практике университетского образования. Представлены примеры научно-педагогических школ, эффективно сочетающих рациональные и иррациональные подходы в университетском образовании.

Ключевые слова: университетское образование, принцип дополнительности Бора, рациональное и иррациональное, научно-педагогическая школа, Тартаковский, Прилежаева, Иваненко.

Введение

Национальный исследовательский Томский государственный университет, учрежденный 16(28) мая 1878 г. Указом императора Александра II как Императорский Сибирский университет (и открытый в 1888 г. как Императорский Томский университет), стал первым и долгое время был единственным высшим учебным заведением в азиатской части Российской империи, первым национальным центром высшего образования, науки и культуры на огромной территории, простирающейся от Уральских гор до Тихого океана. У истоков Томского университета стояли выдающиеся деятели образования и науки, профессора В.М. Флоринский и Д.И. Менделеев (хорошо знакомые с передовой системой образования европейских стран), талантливые ученые (в частности, первый ректор университета, известный физик Н.А. Гезехус и др.), крупные промышленники Сибири и меценаты (А.М. Сибиряков, З.М. Цибульский и др.), представители демократической общественности (Г.Н. Потанин, Н.М. Ядринцев и др.) [1].

Сочетание такого неординарного сообщества устроителей университета привело к тому, что Томский университет воспринял не только передовые тогда гумбольдтовские принципы исследовательского университета (свобода преподавания и обучения с приоритетом фундаментальных наук; единство преподавания и научных исследований), но и прямо противоположные этой модели идеи практического использования знаний в деле промышленного освоения Сибири. В частности, в письме на имя Министра народного просвещения графа И.Д. Делянова попечитель Западно-Сибирского учебного округа В.М. Флоринский писал: «Не подлежит сомнению, что Сибирь настоятельно нуждается в исследованиях, что ее естественные богатства далеко еще не определены и почти не початы, что наука и промышленность имеют полное основание ожидать от профессоров Сибирского университета, как местных деятелей, первая – богатых научных вкладов, вторая – разъяснений и указаний, могущих быть представленными на пользу местной промышленности» [2].

Но, помимо этих изначально заложенных университетских принципов, следует отметить еще одно очень существенное обстоятельство, которое в значительной мере повлияло на развитие Томского университета. Основатели университета и их последователи, будучи крупными учеными и мыслителями, внесли в университет и общефилософские и методологические принципы науки и образования, которые, в частности, как выяснится позднее, являлись элементами принципа дополнительности, в общем сформулированного Н. Бором.

* Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030), проект № НУ 2.0.4.25 МЛ.

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2026. Т. 69. № 1

Адрес редакции и издателя:
634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, д. 36,
Томский государственный университет,
редакция журнала «Известия вузов. Физика»

Старший редактор *Л.А. Пивоварова*
Выпускающий редактор *Л.В. Пермякова*
Редактор-переводчик *И.А. Бобровникова*
Оригинал-макет *Д.В. Фортеса*

Подписано к печати 20.01.2026. Выпуск в свет 28.01.2026. Заказ № 6639.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 15.35. Уч.-изд. л. 17.19. Тираж 42 экз. Цена свободная.

Отпечатано на полиграфическом оборудовании
Издательства Томского государственного университета,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, тел. (3822) 531-528, 529-849.
<http://publish.tsu.ru>; e-mail: rio.tsu@mail.ru

