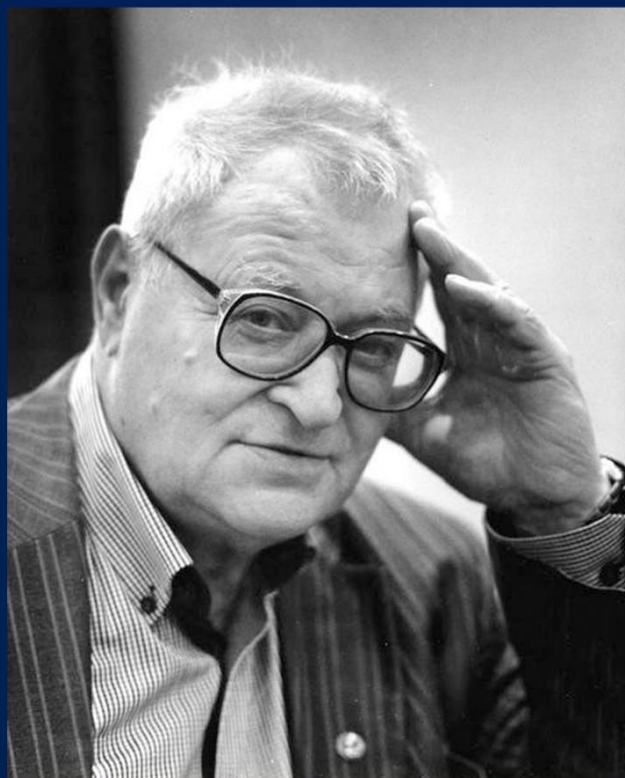


ФГБОУ ВО "Уральский государственный горный университет"
Уральское отделение РАН
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН
Межгосударственный координационный совет по физике
прочности и пластичности материалов



СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

LXIX Международной конференции
«Актуальные проблемы прочности»
памяти академика В.М. Счастливцева
15 – 19 июня 2026 года
Екатеринбург, Россия

Екатеринбург
2026

СПОНСОР



Компания SIAMS (ООО «СИАМС»)
info@siams.com siams.com
+7 (343) 379 00 34
Екатеринбург, Коминтерна, 16,
офис 604



ФГБОУ ВО "Уральский государственный горный университет"
Уральское отделение Российской академии наук
Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН
Межгосударственный координационный совет по физике прочности и
пластичности материалов

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

LXIX Международной конференции
«Актуальные проблемы прочности»
памяти академика В.М. Счастливцева
15 – 19 июня 2026 года
Екатеринбург, Россия

Екатеринбург 2026

УДК 539.4

Ответственные редакторы:

Зайцев Дмитрий Викторович, д.ф.-м.н., зав. кафедрой физики УГГУ

Печатается по решению Учебно-методического совета
Уральского государственного горного университета.

Актуальные проблемы прочности: Сборник тезисов LXIX Международной конференции памяти академика В.М. Счастливцева (г. Екатеринбург, 15 июня 2026 г.) / отв. редактор Д.В. Зайцев. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2026. – 188 с.

В сборнике материалов представлены результаты исследований, представленные на LXIX Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» памяти академика В.М. Счастливцева специалистами в области прочности и пластичности из России и ближнего зарубежья, посвященные вопросам физики и механики прочности, пластичности и разрушения материалов и конструкций; связи прочности со структурой металлов, аморфных, керамических, композиционных, полимерных, материалов природного происхождения и других перспективных материалов. Сборник предназначен для специалистов в области металлофизики, материаловедения, прочности и разрушения материалов, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей. Статьи опубликованы в авторской редакции. Оргкомитет не несёт ответственности за содержание опубликованных материалов.

© Уральский государственный горный университет, 2026

© Авторы, постатейно, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1 «Физика прочности и пластичности»	12
<i>А.А. Алексеев, А.Г. Колмаков</i> Кинетика низкотемпературного распада мартенсита среднеуглеродистой стали при длительном хранении деталей дизельного двигателя.....	12
<i>А.Р. Арутюнян, А.В. Варданян, Е.Г. Земцова</i> Исследование механических свойств сверхвысокомолекулярного полиэтилена после старения.....	13
<i>М.В. Юмашев, Т.А. Картвелишвили, И.М. Афанасьев</i> Обратная задача теплопроводности при радиационном воздействии на мерзлый грунт.....	15
<i>Е.Н. Блинова, В.Д. Воронов, М.А. Либман, В.Н. Петровский, Н.А. Шурыгина</i> Получение однородного высокопрочного аустенита в композитном материале на основе сплава X18H10T методом непрерывного лазерного воздействия.....	16
<i>Р.З. Валиев</i> Сверхпрочность и пластичность ультрамелкозернистых материалов - пути достижения и инновационные применения.....	18
<i>А.М. Власова</i> Деформация как стохастический процесс.....	19
<i>К.В. Кукуджанов, С.В. Дмитриев, И.А. Шепелев, А.И. Габдуллахатов</i> Влияние импульсов тока высокой плотности на пластическую деформацию стального прутка.....	20
<i>Ю.В. Осинская, С.Г. Магамедова, М.А. Еремеева</i> Зависимость величины магнитопластического эффекта от формы импульсного магнитного поля при старении сплава Al-Li.....	22
<i>Я.Д. Липатникова, Ю.В. Соловьева, В.А. Старенченко</i> Исследование макролокализации пластической деформации металлов в разных условиях динамического нагружения методом многоуровневого моделирования.....	23
<i>А.С. Луговская, А.Э. Федосеева</i> Анализ покрытий на основе оксида циркония для повышения эксплуатационных свойств высокохромистой стали типа P911.....	25
<i>Д.В. Лычагин, Л.Л. Лычагина</i> Структурная эволюция в подповерхностных слоях ГЦК монокристаллов при трении: эксперимент и моделирование.....	27
<i>А.Е. Медведев, М.Ю. Мурашкин</i> Рационализация химического состава сплавов системы Al-Fe для изготовления конкурентноспособных токопроводящих проволок.....	29
<i>Ю.В. Осинская, Д.Р. Нуретдинова</i> Влияние амплитуды напряженности импульсного магнитного поля на микротвердость и параметры тонкой структуры состаренного алюминиевого сплава В95пч.....	30
<i>А.Г. Пенкин, И.О. Банных, А.Г. Колмаков, В.И. Антипов, Н.А. Минина, Ю.Э. Мухина</i> Комплексное исследование физико-механических свойств и акустико-эмиссионных характеристик никелевого сплава ХН67МВТЮ (ЭП202) в условиях статического растяжения.....	32
<i>В.П. Пилюгин, Т.П. Толмачёв, А.М. Пацелов, Д.А. Сосян, Д.И. Мелкозёров, К.А. Постовалова</i> Особенности структурной фрагментации и упрочнение тугоплавких металлов при холодной деформации под давлением.....	34
<i>А.А. Попов, А.Е. Майер</i> Дислокационно-стимулированный рост нанопор в металлах при динамическом растяжении: параметрический анализ.....	36
<i>С.О. Рогачев, А.В. Моляров</i> Вариативность значений ударной вязкости трубного проката из стали 09Г2С.....	37
<i>С.О. Рогачев, А.Е. Шелест, В.А. Андреев, Д.В. Тен</i> Влияние роликоправильной обработки на механические свойства и характер кривых течения сплавов на основе циркония и титана.....	38

В.В. Родаев, А.О. Жигачев, А.И. Тюрин, В.А. Тюрин, Т.С. Пирожкова Повышение прочности льда за счет введения в его структуру макромолекул полимера.....	39
Р.Р. Саитова, А.Р. Арутюнян Моделирование высокотемпературной ползучести металлов при внешних воздействиях.....	41
И.С. Сугоняко, Д.В. Таров, Е.А. Корзникова, С.В. Дмитриев Механические свойства пластин из стали 09Г2с после залечивания трещин током.....	42
В.А. Федоров, Т.Н. Плужникова, Д.В. Балыбин, В.М. Тютюнник, С.Н. Плужников Механическое поведение аморфных сплавов на основе кобальта после воздействия щелочных сред.....	43
А.Э. Федосеева Влияние температуры закалки на сопротивление ползучести 9% Сг стали с высоким содержанием азота.....	45
Д.Н. Черепанов Моделирование влияния кинетики винтовых дислокаций на интенсивность генерации точечных дефектов.....	47
Ю.П. Шаркеев, А.Ю. Ерошенко, Е.В. Легостаева, И.А. Глухов, А.И. Толмачев, П.В. Уваркин, В.П. Кузнецов Деформационное поведение и микроструктура биосовместимого сплава системы Ti-Nb-Zr с утрамелкозернистой структурой при квазистатическом растяжении.....	49
К.И. Перескокова, Д.В. Зайцев, А.А. Куклина Физические механизмы разрушения алюминиевых сплавов при жидкометаллическом охрупчивании.....	50
У.А. Кукарская, И.М. Подсекина, А.А. Куклина, К.И. Перескокова, М.Е. Меженков, Д.В. Зайцев Механические свойства керамометаллического композита на основе алюминия.....	52
Секция 2 «Физическое материаловедение»	53
Д.Н. Абдуллина, И.В. Хомская, С.В. Разоренов, Г.В. Гаркушин, А.С. Савиных Структура и свойства сплавов меди при ударно-волновых воздействиях.....	53
С.А. Аккузин, И.Ю. Литовченко, Н.А. Полехина, А.В. Ким, В.В. Осипова, В.М. Чернов Особенности микроструктуры и механических свойств малоактивируемой аустенитной стали с повышенным содержанием кремния после термомеханических обработок.....	54
А.Ю. Волков, П.О. Подгорбунская Структура и свойства эквиатомного сплава CuAu, упорядоченного в поле внешних сил.....	56
Е.Г. Волкова, А.В. Макаров, С.В. Афанасьев, А.И. Валиуллин, А.А. Воннерук, И.С. Бахтеев Сварные соединения сплава системы Al-Mg-Si, структура и свойства.....	57
А.А. Елисеев Влияние тока пучка на электронно-лучевую наплавку алюминиевой бронзы на сталь.....	57
Н.В. Землякова, С.О. Рогачев Формирование наноструктуры в полиэдрах при равноканальном угловом прессовании.....	58
Н.М. Кащенко, М.А. Ботов, В.Г. Чащина Зависимость температуры Ms от концентрации 3d легирующих элементов при β - α мартенситном превращении в сплавах на основе титана	60
Р.С. Коньшин, Е.В. Харанжевский, А.Р. Газизянова, А.В. Тюкалов Оборудование и методика для короткоимпульсной плазменно-электрохимической обработки поверхности металлов и сплавов.....	62
П.В. Космачев, В.Ш. Зыонг, С.В. Панин Плазменная обработка армирующих волокон при изготовлении слоистых полимерных композитов.....	64

П.В. Космачев, А.В. Тяжеев, Д.Ю. Степанов и др. Рентгенографические исследования слоистых полимерных композитов с применением алгоритмов постобработки изображений.....	66
А.О. Курышев, И.Г. Бродова, И.Г. Ширинкина, В.В. Астафьев, В.В. Макаров, В.М. Семенчук, Ю.В. Кушнарев Исследование структуры деталей из алюминиевого сплава никалин, полученных методом аддитивного электродугового выращивания.....	67
Д.Л. Мерсон, А.В. Данюк, Е.Д. Мерсон, А.И. Брилевский Анизотропия механических и коррозионных свойств магниевых сплавов.....	68
С.Ю. Миронов, И.А. Шишов Микроструктурные аспекты сварки трением с перемешиванием.....	70
S.I. Borisov, P.D. Dolzhenko, I.S. Nikitin, A.A. Kalinenko, I.S. Zuiko, S.Yu. Mironov A two-step approach for differentiating δ -ferrite and martensite in steels using EBSD.....	71
А.В. Никоненко, Н.А. Попова, Е.Л. Никоненко Формирование градиентной структуры в сплаве Vt1-0 путем имплантации ионами никеля.....	72
А.А. Редикульцев, М. Л. Лобанов, М. А. Зорина Текстурная наследственность в металлах с различными типами структурных и фазовых превращений.....	74
Г.Ф. Сарафанов Нелинейная модель формирования ячеистых структур с субграницами в моно- и поликристаллах.....	76
Н.Н. Соболева, А.В. Березовский, Н.А. Давыдова, И.С. Бахтеев Применение новых азотсодержащих порошковых проволок для лазерной наплавки.....	78
Т.П. Толмачёв Кинетика деформационного растворения и фрактография в неравновесных сплавах Cu-Co	78
Е.В. Харанжевский, А.В. Макаров, А.С. Широбокова Структурные аспекты перехода к сверхнизкому трению и износу стали с оксидно-керамическими покрытиями.....	79
И.В. Хомская, Д.Н. Абдуллина, С.В. Разоренов, Л.А. Елишина, Г.В. Гаркушин, А.С. Савиных Структура и динамическая прочность сплавов и композитов на основе меди.....	80
А.А. Чуракова, Э.И. Исакова, Е.В. Воробьев Особенности коррозионного поведения сплавов TiNi различного фазового состава.....	82
А.А. Чуракова, Э.И. Исакова, Е.В. Воробьев Эволюция микроструктуры и функциональных характеристик сплава $\text{Ti}_{49.2}\text{Ni}_{50.8}$ при мартенситных превращениях.....	84
Ю.С. Нечаев, Н.А. Шурыгина, В.П. Филиппова О состоянии и диффузионном перераспределении углерода в сталях при реэчном мартенситном превращении.....	86
С.В. Яркова, М.А. Зорина, В.Ю. Ярков, М.Л. Лобанов Эволюция микроструктуры и кристаллографической текстуры IF-стали в полном цикле листового проката.....	87
А.Д. Федотов, П.А. Логинов, С. Муканов, А.А. Зайцев, Е.А. Левашов Влияние микродобавок бора и углерода на структуру и свойства высокоэнтропийного сплава CoCrCuFeNi	90
А.Д. Федотов, П.А. Логинов, А.А. Зайцев, С. Муканов, Е.А. Левашов Механические свойства высокоэнтропийных сплавов $\text{CoCrCu}_x\text{FeNi}$ и их адгезия к алмазу.....	91
Секция 3 «Физическая механика материалов»	93
В.Р. Балохонов, Р.Р. Балохонов, В.А. Романова, Е.С. Марченко Моделирование упругопластической деформации с учетом фазовых превращений и разрушения в поликристаллическом композите «никелид титана – двухслойное покрытие».....	93

<i>Д.Д. Гатиятуллина, А.В. Землянов, В.Р. Балохонов, И.Р. Бжицких, Е.Д. Мочалова</i> Исследование влияния объемной доли частиц на деформационное поведение и характер разрушения металлокерамических композитов.....	95
<i>Д.Д. Гатиятуллина, А.В. Землянов, Р.Р. Балохонов</i> Эволюция остаточных напряжений в металлокерамических композитах при термомеханическом нагружении.....	96
<i>Д.Д. Гатиятуллина, А.В. Землянов, Р.Р. Балохонов</i> Особенности деформирования и разрушения металлокерамических композиционных материалов.....	97
<i>А.Л. Колесникова, Nguyen Van Tuyen, М.Ю. Гуткин, А.Е. Романов</i> Поля напряжений, энергии и взаимодействие осесимметричных включений в нанопроволоках.....	98
<i>Е.М. Дымнич, Р.Р. Балохонов, В.С. Шахиджанов, В.Р.Балохонов, В.А. Романова</i> Влияние микроструктуры и термических остаточных напряжений на деформационный отклик в сплаве AlSi10Mg, полученном методом селективного лазерного сплавления.....	99
<i>Е.Д. Мочалова, И.Р. Бжицких, А.В. Землянов, Е.М. Дымнич, Д.Д. Гатиятуллина</i> Моделирование частиц кремния, наблюдаемых в эвтектике аддитивно изготовленного сплава Al-Si12.....	101
<i>В.С. Красников, Ф.Т. Латыпов, Д.С. Воронин, А.Е. Майер</i> Молекулярно-динамическое исследование влияния пористости на механическое поведение поликристаллического титана.....	103
<i>В.С. Красников, К.Д. Манухина, Ф.Т. Латыпов, Д.С. Воронин, А.Е. Майер</i> Активация пластической релаксации и разрушения на границах зерен в алюминии: атомистическое исследование, машинное обучение и континуальная механика.....	105
<i>Э.Б. Завойчинская, Г.Е. Лавриков</i> Применение метода измерений микротвердости в моделировании многомасштабного хрупкого разрушения при блочных режимах многоциклового нагружения конструкционных материалов.....	105
<i>А.Е. Майер</i> Динамическая пластичность алюминия 7075: поход обобщенных дефектов и нейросетевая модель.....	107
<i>П.Н. Майер, А.Е. Майер, Е.С. Родионов</i> Моделирование резания металлов на основе физически обоснованных моделей пластичности и разрушения.....	108
<i>А.В. Землянов, Д.Д. Гатиятуллина, В.Е. Мухин, И.Р. Бжицких, Е.Д. Мочалова</i> Особенности локализации деформации и разрушения в металлокерамических композитах	110
<i>В.Е. Мухин, М. Писарев, В.Р. Балохонов, В.А. Романова</i> Анизотропия упругих свойств ГЦК-металлов, изготовленных методом селективного лазерного сплавления.....	111
<i>Д.А. Петров, М.Ю. Гуткин, С.А. Красницкий, А.Л. Колесникова, А.Е. Романов</i> Оценка критических параметров релаксации напряжений несоответствия в наноструктурах.....	112
<i>М. Писарев, В.Е. Мухин, В.Р. Балохонов, В.А. Романова</i> Влияние иерархической структуры на формирование деформационного рельефа в образцах аддитивно изготовленной нержавеющей стали 316L.....	114
<i>И.Р. Бжицких, Е.Д. Мочалова, А.В. Землянов, Д.Д. Гатиятуллина, М. Писарев</i> Создание моделей дендритов алюминия, формирующихся при электронно-лучевой печати сплава Al-Si12.....	115
<i>Н.С. Селютина, Ю.В. Петров</i> От стабилизации петли гистерезиса к единой усталостной кривой: релаксационно-кинетический подход (на примере стали 45).....	117
<i>Г.В. Гаркушин, А.С. Савиных, И.А. Черепанов, В.Е. Брейкина, С.В. Разоренов, Е.В. Найденкин, И.П. Мишин</i> Влияние термообработки на динамический предел упругости и откольную прочность титанового сплава ВТ16.....	118

<i>Г.В. Гаркушин, А.С. Савиных, И.А. Черепанов, В.Е. Брейкина, С.В. Разоренов</i> Влияние температуры на динамический предел упругости и откольную прочность титановых сплавов системы Ti-Al-Mo-V.....	119
<i>А.А. Куклина, М.В. Майсурадзе, А.И. Гареев</i> Взаимосвязь микроструктуры и свойств в стали 20Х2Г2СНМА при непрерывном охлаждении.....	120
Секция 4 «Металлургия и химия материалов»	123
<i>Л.Б. Ведмидь, О.М. Федорова, Е.В. Стерхов, И.В. Евдокимов, Е.А. Костик</i> Сравнительный анализ влияния замещения в А и/или В-подрешетках на физико-химические свойства NdMnO ₃	123
<i>Л.Б. Ведмидь, О.М. Федорова, А.В. Фетисов, Е.В. Стерхов, И.В. Евдокимов, Е.А. Костик, С.Г. Титова</i> Влияние условий синтеза на физико-химические свойства двойного перовскита La ₂ MnCoO ₆	124
<i>В.М. Семенчук, Е.А. Сидоров, А.В. Еремин, И.А. Куренбин, А.Г. Петраков, А.В. Чумаевский</i> Влияние фрикционной перемешивающей обработки на механические свойства композиционных материалов БрАМц9-2 + 10% Ni И БрАМц9-2 + 10% 06Х19Н9Т	125
<i>В.М. Семенчук, Н.В. Семенчук, А.В. Чумаевский</i> Коррозионное поведение бронзы БрАМц9-2, полученной методами аддитивного производства при различном тепловложении.....	127
Секция 5 «Методы изучения структуры и свойств материалов, включая методы неразрушающего контроля»	129
<i>С.А. Баранникова, П.В. Лаврентьева</i> Влияние температуры на накопление повреждаемости деформируемых металлов по акустическим параметрам.....	129
<i>С.Н. Мозговых, П.О. Сырова, В.М. Кипяткова, Н.В. Селезнева</i> Анизотропное тепловое расширение в замещенных соединениях на основе Fe ₇ Se ₈	130
<i>Д.С. Рошка, О.О. Хамисов, И.В. Сергеичев</i> Калибровка измерительной системы на основе волоконных Брэгговских решеток (ВБР) для получения значений деформаций и температур в криогенных условиях.....	132
<i>П.Е. Сизин</i> Оценка концентрации трещин или пор в материалах или горных породах по их электрической проводимости.....	133
<i>А.И. Тюрин, В.В. Коренков, А.А. Самодуров, М.А. Юнак, В.А. Тюрин, В.В. Родаев</i> Методы наноиндентирования и скретч-теста для мультимасштабных исследований структуры и физико-механических свойств высокоупорядоченных природных биоматериалов на примере древесины хвойных и лиственных пород.....	134
<i>А.И. Фатхуллин, А.Е. Майер</i> Применение сверточных нейронных сетей для анализа микроструктуры алюминия.....	136
<i>Е.В. Черняева, А.Е. Волков, Н.А. Казаринов, Н.А. Волкова</i> Статистические характеристики сигналов акустической эмиссии при индентировании образцов FeMnSi...	137
<i>Б.А. Зимин, Ю.В. Судьенков, С.А. Чертищева</i> Оптоакустический спектральный анализ процесса повреждаемости конструкционных материалов.....	139
<i>Е.А. Путилова, К.Д. Малыгина</i> Магнитная структуроскопия как способ оценки изменения структуры и фазового состава многокомпонентного сплава системы CoCrFeNiAl(x).....	141
Секция 6 «Моделирование структуры и свойств конструкционных материалов»	143
<i>Л.Р. Ахметшин</i> Влияние внутреннего преобразования метаматериала на его свойства....	143

Д.Е. Бесчеров, А.В. Будников, М.Н. Ереев, В.В. Лебедев, А.С. Марков, В.А. Панов Методология численного моделирования термоусталости в конструкционных материалах оборудования РУ.....	145
А.Л. Медведский, М.И. Мартиросов, А.В. Хомченко, В.Е. Бутысин Численная гомогенизация зон ортогональной прошивки в слоистых композитах: от мезо- к макро моделированию в LS-DYNA.....	146
И.Н. Зебзеев, А.М. Фивейский Совершенствование технологии сварки трубных решёток на основе автоматизации и применении специальных сварочных процессов.....	148
Н.В. Казанцева, Н.А. Сахаров, М.А. Ильиных Демпферные свойства конструкционных метаматериалов.....	150
К.А. Лонин, М.Н. Ереев, А.В. Козин, С.А. Соловьев, В.Л. Патрушев Расчетно-экспериментальное обоснование прочности механического оборудования с использованием математических моделей деформирования материалов.....	151
Н.С. Новоскольец, О.В. Сыч, Э.А. Ушанова Повышение однородности структуры по сечению толстолистового проката из судостроительных сталей за счет управления процессами структурообразования аустенита во время черновой стадии горячей прокатки	152
М.В. Петрик, Д.О. Закирьянов, Е.О. Хазиева Вибрационный вклад в фазовую стабильность Ti ₃ Al: оценка методами DFT и MD с MLIP.....	154
Н.М. Савкина, К.Ю. Хромов Атомистические методы построения краевых и смешанных дислокаций в ОЦК-кристаллах с целью моделирования пластичности.....	155
В.Д. Сарычев, Д.И. Долгов, В.М. Котов, В.Ю. Чинов, Е.В. Арышенский, С.В. Коновалов Численные модели формирования осадков в алюминиевых сплавах.....	155
Д.Д. Сацкий, М.Л. Лобанов Моделирование механизмов роста частиц AlN в полосе технического сплава Fe-3%Si.....	157
В.А. Вестяк, Е.И. Смагин, М.И. Мартиросов Чувствительность ортотропных пластин с отверстиями к повышенной температуре.....	159
Урцев Н.В. Аппроксимация кинетических кривых распада аустенита высокопрочной малоуглеродистой низколегированной трубной стали уравнениями КДМА.....	161
В.А. Федоров, А.Д. Березнер, М.А. Рыбаков, М.Ю. Сидляр Анализ некоторых аморфных неорганических структур и явления бозонного пика с помощью вычислительного подхода на основе случайных графов.....	163
Д.Д. Федотов, С.Н. Балакиров, С.И. Ярьско Интерференционные процессы при лазерной ударной обработке и их влияние на точность определения остаточных напряжений при моделировании.....	164
В.П. Филиппова, Е.Н. Блинова Компьютерное моделирование кинетики образования поверхностных сегрегаций в твердом растворе на основе α -Fe с применением метода молекулярной динамики.....	166
В.Ю. Чинов, П.А. Сеченов, Е.В. Арышенский, С.В. Коновалов Математическое моделирование термодинамических параметров сплавов Al-Cu-Mn.....	168
Секция 7 «Строение и прочность горных пород и минералов»	170
А.В. Жабко, А.А. Жабко О склонности горных пород к динамическому разрушению.....	170
Н.Н. Ефремовцев Методические аспекты изучения структуры и свойств горных пород в результате динамических воздействий.....	175
И.Ж. Бунин, А.Н. Кочанов Микроструктурная диагностика предразрушения горных пород: микроскопия дефектов и RGB-анализ РЭМ-изображений.....	176

<i>Д.В. Лычагин, Л.Л. Лычагина, В.Р. Балохонов</i> Структурные характеристики и возможности селективного извлечения арсенопирита из золотоносных руд.....	178
<i>И.Е. Шиповский</i> Энергетико-кинетическое SPH-моделирование нарушения прочности горных пород при динамическом и взрывном воздействии.....	180
<i>В.И. Гроховский</i> Механические свойства и разрушение метеоритов.....	182
Секция 8 «Материаловедение биологических тканей и биоматериалов»	183
<i>М.Е. Меженев, А.А. Кукина, Д.В. Зайцев</i> Особенности физических механизмов аккомодации напряжений в горных породах и минералах различного генезиса.....	185
<i>А.А. Ольхов, Д.Н. Бемов, О.И. Хан и др.</i> Модификация структуры полимерных нетканых волокнистых материалов.....	186

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ДЛЯ КОРОТКОИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Р.С. Коньшин, Е.В. Харанжевский, А.Р. Газизянова, А.В. Тюкалов

Место работы ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»

Email: rodion.konsh@yandex.ru

Методы плазменно-электрохимической обработки материалов, такие как микродуговое (МДО) и плазменно-электролитическое оксидирование (ПЭО), применяются для формирования высокотвердых керамических покрытий на вентильных металлах (Al, Mg, Ti, Zr) [1]. Составы электролитов для этих методов базируются на слабощелочных растворах с pH 9–12, где в качестве основы используются КОН или NaOH. В качестве пленкообразователей применяют силикаты, обеспечивающие максимальную твердость, фосфаты, дающие коррозионную стойкость и биосовместимость. Важно отметить, что сталь нельзя оксидировать классическим МДО или ПЭО из-за отсутствия барьерного оксида, что приводит к анодному растворению вместо роста диэлектрика; образующиеся оксиды железа рыхлые, проводящие и обладают плохой адгезией, а циклические тепловые удары вызывают охрупчивание и трещины.

Перспективным направлением для обработки сталей является использование наносекундных импульсов. При этом подавляется анодное растворение, поскольку за наносекунды электрохимические реакции не успевают начаться, реализуется «холодный» макропроцесс с локальной плазмой без нагрева всей детали. Возникает имплантация, при которой ионы разгоняются до энергий, характерных для вакуумной имплантации, а ударные волны генерируют дислокации, приводящие к глубокой диффузии.

Предлагаемый метод основан на переходе от электрохимических процессов в жидком объеме к контролируемому электростатическому распылению с сопутствующей генерацией локальных микроплазменных каналов. Схема экспериментальной установки включает в себя:

1. Система для первичного механического распыления жидкости до фракции капель размером не более 100 мкм.
2. Источник высокого постоянного напряжения (DC 20–60 кВ), положительный полюс (анод) которого подключен к системе распыления капель, а отрицательный (катод) — к обрабатываемой детали из стали 40Х.
3. Устройство для нагрева подложки, поддерживающее стабильную температуру стали на уровне 200 °С для предотвращения образования водяной пленки.

Физика процесса в объеме межэлектродного пространства определяется явлением электрогидродинамического распыления (ЭГДР). При полете капли в мощном электрическом поле происходит интенсивное испарение растворителя, приводящее к критическому росту плотности поверхностного заряда. По достижении предела неустойчивости Рэлея первичная капля дробится на субмикронные капли [2]. Высокий потенциал на острых кромках форсунки и на микрокаплях инициирует локальный коронный разряд, частично ионизирующий окружающую среду.

При подлете заряженной микрокапли к нагретой до 200 °С стальной поверхности реализуется эффект Лейденфроста: нижняя часть капли мгновенно вскипает, образуя наноразмерную парогазовую подушку. Вследствие сжатия межэлектродного зазора до микронных значений напряженность электрического поля превышает порог пробоя газовой фазы. Вскипающий микрозазор пробивается искровым разрядом, формируя дискретные короткоживущие микроплазменные каналы, где микрокапля выступает в роли жидкого микроэлектрода.

В точке привязки микроплазменного канала к стали 40Х протекает комплекс взаимосвязанных процессов:

- **Локальный термический пик:** температура в наномасштабном пятне контакта мгновенно достигает 1000–3000 °С. Высокий температурный градиент обеспечивает скачкообразный рост коэффициента диффузии элементов без объемных термических деформаций.
- **Плазмохимический пиролиз:** компоненты микрокапли претерпевают мгновенную термическую диссоциацию с генерацией сверхактивных атомарных компонентов и радикалов, скорость поглощения которых металлом на порядки выше, чем у молекулярных газов.
- **Электроперенос:** сильное постоянное поле обеспечивает баллистическую направленность потока положительно заряженных ионов внедрения в разогретую плазмой подложку.

Выбор стали 40Х в качестве мишени обусловлен наличием легирующего хрома (~1%). Хром выступает мощным нитридо- и карбидообразующим элементом, фиксирующим внедряющийся азот и углерод в виде ультрадисперсных фаз (CrN, Cr₂N), что гарантирует резкое повышение микротвердости и износостойкости поверхностного слоя без необходимости проведения последующей закалки.

Использование классических силикатных или фосфатных электролитов в данной схеме невозможно из-за образования диэлектрической сухой корки солей при

температуре 200 °С. Сформулированы требования к электролиту: он должен быть полностью летучим и распадаться в плазме исключительно на целевые элементы (N, C) и газообразные продукты (H_2O , CO_2 , NH_3).

Предложенный аэрозольно-плазменный метод является эффективной и экономически доступной альтернативой вакуумным и импульсным технологиям упрочнения сталей. при этом глубокая диффузия достигается не за счёт энергии ускорения частиц в атмосфере, а за счёт микроплазменных каналов, возникающих при ударе капли. Контроль геометрии и фазового состава диффузионной зоны возможен с применением методов оптической спектроскопии плазмы, металлографии, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии и измерения микротвердости по Виккерсу на косых шлифах.

Список литературы:

1. Суминов И. В.. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / М.: ЭКОМЕТ, 2005.
1. Григорьев А.И., Ширяев А.А. Электрогидродинамическая неустойчивость и электродиспергирование жидкости (обзор) / КиберЛенинка, 2024