

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ»

ТРУДЫ

XXX МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА»

(Севастополь, 24-29 августа 2020 г.)

под редакцией заслуженного деятеля науки РФ,
д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г.

Москва – 2020

УДК 669.
ББК 22.38
Р15
ISBN 978-5-89671-025-7

Труды XXX Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела» (Севастополь, 24 – 29 августа 2020 г.), под редакцией заслуженного деятеля науки РФ, д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г., М.: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2020 г., 477с.

В рамках конференции проводилась XXIV Международная школа молодых учёных «Радиационная физика твёрдого тела».

Редакционная коллегия:

д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г. (ответственный редактор,
Председатель Оргкомитета),
к.ф.-м.н. Дьячкова И.Г. (ученый секретарь),
Смирнова Е.В. (секретарь-координатор),
к.т.н. доцент Мамонтов А.В. (Врио директора ФГБНУ «НИИ ПМТ»),
д.ф.-м.н., проф. Кристя В.И.,
к.ф.-м.н. Гайдар А.И.

УДК 669.
ББК 22.38
© Издательство ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2020

ISBN 978-5-89671-025-7

© Труды XXX Международной
конференции «Радиационная физика
твёрдого тела»

ПРОГРАММА-СОДЕРЖАНИЕ

Понедельник, 24 августа

10.00-13.00

Открытие конференции - Бондаренко Г.Г.

1. Овчинников В.В. «О критериях подобию и расчете повреждающих доз в натуральных и имитационных испытаниях реакторных материалов»	10
2. Рогожкин С.В., Никитин А.А., Искандаров Н.А., Хомич А.А., Хорошилов В.В., Богачев А.А., Лукьянчук А.А., Разницын О.А., Шутов А.С., Федин П.А., Кулевой Т.В., Леонтьева-Смирнова М.В., Можанов Е.М., Никитина А.А. «Исследование низкотемпературного радиационного упрочнения ферритно-мартенситных сталей»	33
3. Никитин А.А., Бобырь Н.П., Рогожкин С.В., Федин П.А., Каратеев И.А., Гладких Е.В., Захарова П.С. «Изменения микроструктуры сплава W-6RE под действием ионного облучения»	43
4. Достовалов А.В., Вольф А.В., Симонов В.А., Коробейников М.В., Брызгин А.А., Кашайкин П.Ф., Михайленко М.А., Бабин С.А. «Исследование радиационной стойкости волоконных брэгговских решёток»	52
5. Жарков М.Ю., Вертков А.В., Люблинский И.Е., Тажибаева И.Л., Понкратов Ю.В., Гордиенко Ю.Н. «Концепция модуля литиевого дивертора токамака КТМ с охлаждением газо-водяным диспергированным потоком»	61
6. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Косоголов А.В. «Исследования зависимости изменения морфологии стекла К-208 и параметров электростатических разрядов от дозы электронного облучения»	69

13.00-14.00 Перерыв.

14.00-16.00 Секция “Радиационная физика металлов” (заседание школы молодых ученых)

1. Долуденко И.М., Бондаренко Г.Г., Черкасов Д.А., Панов Д.В., Муслимов А.Э., Бедин С.А., Загорский Д.Л. «Особенности гальванического заполнения пор трековых мембран для получения нанопроволок различных типов»	78
---	----

2. Елифанов Н.А., Пименов В.Н., Боровицкая И.В., Грибков В.А., Демин А.С., Масляев С.А., Морозов Е.В., Сасиновская И.П., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И., Падух М. «Изменения в поверхностных слоях медных сплавов под действием импульсной пучково-плазменной обработки»	83
3. Панов Д.В., Бондаренко Г.Г., Бедин С.А., Долуденко И.М., Асваров А.Ш., Загорский Д.Л. «Трековые мембраны в синтезе нанопроволок различной геометрии для применения в катализе»	96
4. Черкасов Д.А., Хайбуллин Р.И., Долуденко И.М., Муслимов А.Э., Загорский Д.Л. «Исследование магнитных свойств гетероструктурных нанопроволок»	104
5. Гилимьянова А.Р., Черкасов Д.А., Савченко Е.С., Долуденко И.М., Артемов В.В., Каневский В.М., Менушенков В.П., Загорский Д.Л. «Влияние внешнего магнитного поля на гальванический процесс в порах трековых мембран»	112

16.00 – 17.00. Обсуждение докладов. Дискуссия.

Вторник, 25 августа

10.00-13.00 Секция “Радиационная физика неметаллических материалов”

1. Милёхин Ю.М., Коптелов А.А., Коптелов И.А., Садовнический Д.Н. «Термическая стабильность облученных полимеров»	121
2. Лебедев А.А., Козловский В.В., Калинина Е.В., Левинштейн М.Е., Стрельчук А.М. «Радиационная стойкость приборов на основе SiC и GaN»	131
3. Рысбаев А.С., Бекпулатов И.Р., Турапов И.Х., Саидахмедова З.Р., Ибрагимова Б.В., Абраева С.Т. «Электрические свойства пленок силицидов созданных имплантацией ионов Li, Na и Ba в Si (111)»	133
4. Гусаков В. Е., Гусакова Ю. В., Tay Beng Kang «Исследование из первых принципов формирования и диффузии собственных точечных дефектов в объемном и двумерном дисульфиде молибдена. II»	137
5. Толкачева Е.А., Мурин Л.И., Гуринович В.А. «Вакансионно-кислородные комплексы VnO (n = 1-3) в облученных кристаллах кремния: данные ИК измерений при комнатной температуре»	148

6. Асадчиков В.Е., Дьячкова И.Г., Золотов Д.А., Сорокин Л.М. «Сопоставление методов трехкристальной рентгеновской дифрактометрии и электронной микроскопии в исследовании структуры монокристаллов кремния при их протонном облучении и последующей термообработке»	158
7. Чуховский Ф.Н., Асадчиков В.Е., Золотов Д.А., Дьячкова И.Г., Бондаренко В.И. «Методы предобработки 2D-изображений дефектов в монокристаллах кремния для решения задач рентгеновской топо-томографии»	166
8. Лысенко Е.Н., Власов В.А., Суржиков А.П. «Кинетические закономерности синтеза литий-цинкового феррита в условиях нагрева пучком электронов»	176

13.00-14.00 Перерыв.

14.00-16.00 Секция “Радиационная физика неметаллических материалов” (заседание школы молодых ученых)

1. Ерицян Г. Н., Саакян А. А., Григорян Н. Э., Арутюнян В. В., Арзуманян В. В., Киракосян В. В. «Скорость введения радиационных дефектов в полупроводниках n-Si и поведение неравновесных носителей заряда измеренное в режиме “IN-SITU” при облучении электронами»	187
2. Жданович Д.Н., Огородников Д.А., Якушевич А.С., Ластовский С.Б., Мурин Л.И., Маркевич В.П., Шпаковский С.В. «Особенности формирования радиационных дефектов в SiGe, облученном быстрыми электронами с использованием защитных экранов»	195
3. Бондаренко Г.Г., Кристя В.И., Мьо Ти Ха, Фишер М.Р. «Влияние диэлектрической пленки на поверхности катода на характеристики тлеющего разряда»	205
4. Онанко Ю.А., Чарный Д.В., Онанко А.П. «Особенности изменения дефектной наноструктуры, адсорбционных свойств на указательную поверхность неупруго-упругого тела нанокомпозитов на основе многостенных нанотрубок и поливинилхлорида, полиэтилена, пенополистирола после облучения»	212

16.00 – 17.00. Обсуждение докладов. Дискуссия.

Среда, 26 августа

10.00 – 13.00 Секция “Радиационная физика металлов”

1. Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Крысина О.В., Тересов А.Д. «Структура высокохромистой стали, облученной импульсным электронным пучком»	223
2. Крысина О.В., Иванов Ю.Ф., Ахмадеев Ю.Х., Тересов А.Д., Москвин П.В., Петрикова Е.А., Толкачев О.С. «Модификация поверхностного слоя металлических материалов импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности»	229
3. Петрикова Е.А., Иванов Ю.Ф., Рыгина М.Е., Тересов А.Д. «Термическая стабильность структуры заэвтектического силумина, облученного импульсным электронным пучком»	234
4. Михайлов Б.П., Михайлова А.Б., Никулин В.Я., Боровицкая И.В., Силин П.В. «Исследование влияния защитных экранов с различными теплофизическими характеристиками на критические токи MGB_2 лент при ударно-волновой обработке с использованием плазмы»	242
5. Потекаев А.И., Клопотов А.А., Кислицин С.Б., Клопотов В.Д. «Влияние облучения низкоэнергетическими альфа-частицами на структурно-фазовое состояние покрытий тройных нитридных систем на основе титана и ванадия на стали»	247
6. Черенда Н.Н., Бибик Н.В., Углов В.В., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. «Многоэлементное легирование поверхностного слоя эвтектического силумина под действием компрессионных плазменных потоков»	258
7. Шиманский В.И., Медин А.А., Углов В.В., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. «Влияние плазменной обработки на кинетику окисления сплавов на основе циркония»	267

13.00-14.00 Перерыв.

14.00-16.00 Секция «Физические основы радиационных технологий» (заседание школы молодых ученых)

1. Жарков М.Ю., Вертков А.В., Люблинский И.Е., Вершков В.А., Ноткин Г.Е. «Макет приемного элемента литиевого дивертора токамака Т-15МД для стендовых испытаний»	274
2. Долуденко И.М., Черкасов Д.А., Каневский В.М., Ерохина Н.С., Загорский Д.Л. «Матричный синтез и исследование нанопроволок из сплава FeNi»	278

3. Бондаренко Г.Г., Кристя В.И., Мьо Ти Ха, Фишер М.Р. «Влияние температуры на эмиссию электронов из катода с тонкой диэлектрической пленкой в тлеющем разряде»	285
4. Бадалян А., Арутюнян В., Алексанян Э., Григорян Н., Арестакян А., Петросян Л., Баграмян В., Саргсян А. «Исследование радиационно-термостимулированных свойств в модифицированных композитных терморегулирующих покрытиях»	291

16.00 – 17.00. Обсуждение докладов. Дискуссия.

Четверг, 27 августа

10.00-13.00 Секция “Физические основы радиационных технологий”

1. Соловьев Я.А., Пилипенко В.А., Понарядов В.В. «Влияние режимов быстрой термообработки некогерентным световым потоком на сопротивление пленок хрома на кремнии»	300
2. Пискарев М.С., Скрылева Е.А., Сенатулин Б.Р., Гильман А. Б., Кузнецов А.А. «Глубина модифицирования пленки полиэтилентерефталата, обработанной в разряде постоянного тока»	305
3. Кривоносов Ю.С., Асадчиков В.Е., Бузмаков А.В. «Рентгеновский фазовый контраст с использованием лабораторного полихроматического источника»	310
4. Курбанов А.М. «Влияние условий синтеза и термообработки на образование фототропных центров в кристаллах со структурой граната»	313
5. Курбанов А.М., Нуритдинов И. «Автолокализация электронных возбуждений в кристаллах молибдата стронция»	319
6. Ашрапов У.Т., Садиков И.И., Ташметов М.Ю., Махкамов Ш., Нормуродов А.Б. «Влияние гамма облучения на внутреннее трение дислокационного кремния»	324
7. Нормуродов М.Т., Турсунметова З.А., Хужаниёзов Ж.Б., Игамов Б.Дж., Холмухаммедова В.Х., Иргашев С.У. «Разработка нового способа низкотемпературной вакуумной очистки поверхности полупроводниковых кристаллов»	331

13.00-14.00 Перерыв.

14.00-16.00 Секция “Радиационная физика неметаллических материалов»

1. Амонов М.З., Ибрагимова Э.М., Сандалов В.Н. «Зависимость коэффициента теплопроводности керамики на основе MgF_2 »	339
2. Скородумов В.Ф., Мотавкин А.В., Бондаренко Е.В. «Особенности использования поворотно-изомерной модели при учете различных конформаций полимерной цепи»	348
3. Нуритдинов И., Саидахмедов К.Х., Исмоилов Ш.Х. «Воздействие γ -облучения на оптические и спектрометрические свойства кристаллов $Bi_4Ge_3O_{12}$ (BGO)»	352
4. Нуритдинов И., Эсанов З.У., Саидахмедов К.Х. «Влияние ионизирующего излучения на центры свечения в кристаллах Gd_2SiO_5 -Ce»	354

16.00 – 17.00. Обсуждение докладов. Дискуссия.

Пятница, 28 августа

10.00-13.00 Секция «Физические основы радиационных технологий»

1. Асадчиков В.Е., Бузмаков А.В., Волков В.В., Дьячкова И.Г., Золотов Д.А., Конарев П.В., Чуховский Ф.Н. «Новые подходы к решению проблемы фильтрации шумов 2D изображений дефектов кристаллической решетки в кремнии в методе рентгеновской дифракционной томографии»	364
2. Андреев Д.В., Ахмелкин Д.М., Бондаренко Г.Г., Андреев В.В., Столяров А.А. «МОП сенсоры радиационных излучений, работающие в условиях сильных электрических полей»	368
3. Ташметов М.Ю., Махкамов Ш., Саттиев А.Р., Эрдонов М.Н., Умарова Ф.Т., Холмедов Х.М. «Влияние примеси цинка на накопление радиационных дефектов в кремниевых n^+-p – структурах при электронном облучении»	374
4. Сказочкин А.В., Кислов С.В., Бондаренко Г.Г. «Оценка работы каретки бесштокового цилиндра с минеральным покрытием в водной среде»	380
5. Ястребинский Р.Н., Бондаренко Г.Г., Карнаухов А.А. «Термостойкие металлгидридные радиационно-защитные композиты на основе стеклокристаллических матриц»	386
6. Конусов Ф.В., Павлов С.К., Лаук А.Л., Кабышев А.В., Гадиров Р.М. «Особенности оптических свойств радиационно-стойких пленок нитридов алюминия, кремния и Al-Si-N, осажденных реактивным магнетронным распылением»	391

13.00-14.00 Перерыв.

14.00-16.00 Секция «Радиационная физика металлов»

1. Гущина Н.В., Махинько Ф.Ф., Овчинников В.В., Катаева Н.В., Сагарадзе В.В. «Иницилируемые ионным облучением (Ar^+ , $E=15$ кэВ) структурно-фазовые превращения в сталях ЧС68»	402
2. Селищев П.А., Малибе К.Д. «Кинетика термического отжига кластеров точечных дефектов»	410
3. Ерофеев В.Т., Урбанович А.И. «Нелинейная модель краевой задачи экранирования импульсных полей плоским экраном из пермаллоя»	416
4. Рахадиллов Б.К., Миниязов А.Ж., Сагдолдина Ж.Б., Буйткенов Д.Б. «Особенности взаимодействия вольфрама и молибдена с водородной плазмой»	431

16.00 – 17.00. Обсуждение докладов. Дискуссия.

Суббота, 29 августа

10.00

1. Боровицкая И.В., Коршунов С.Н., Мансурова А.Н., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И., Казилин Е.Е. «Синергетические эффекты в поверхностных слоях сплава V-10Ti-6Cr-0,05Zr-0,1Si в условиях раздельного и последовательного воздействия ионов аргона и импульсного лазерного излучения»	440
2. Гынгазов С.А., Костенко В.А. «Модификация циркониевой керамики под действием ионной обработки»	448
3. Оксенгендлер Б.Л., Сулейманов С.Х., Аширметов А.Х., Тураева Н.Н., Зацепин А.Ф. «Селективное радиационное воздействие на полимеры и его применение к деградации актуальных вирусов»	457
4. Романов Н.М., Мокрушина С.А. «Сопоставление отклика МОП-транзистора на воздействие рентгеновского и гамма-облучения»	467
Обсуждение докладов	
Общая дискуссия	
Закрытие конференции	

ИЗМЕНЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ МЕДНЫХ СПЛАВОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОЙ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Епифанов Н.А.¹, Пименов В.Н.², Боровицкая И.В.², Грибков В.А.²,
Демин А.С.², Масляев С.А.², Морозов Е.В.², Сасиновская И.П.²,
Бондаренко Г.Г.^{1,3}, Гайдар А.И.³, Падух М.⁴

¹Национальный исследовательский университет “Высшая школа
экономики” (101000 Москва, ул. Мясницкая, 20, Россия,
E-mail: bondarenko_gg@rambler.ru)

²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
(119334 Москва, Ленинский просп., 49, Россия,
E-mail: pimval@mail.ru)

³Научно-исследовательский институт перспективных материалов и
технологий (105187 Москва, ул.Щербаковская, 53, Россия,
E-mail: a_i_g@bk.ru)

⁴Институт физики плазмы и лазерного микросинтеза (01-497 Варшава,
ул. Геры 23, Польша)

Введение

Медь и сплавы на ее основе широко применяются в различных областях науки и техники, что определяет необходимость исследовать их поведение в различных условиях, в частности, под действием импульсных радиационно-термических, ударно-волновых нагрузок и импульсных излучений. Мощные импульсные ударные нагрузки испытывают, в частности, материалы внутренних поверхностей камер в установках термоядерного синтеза с инерциальным удержанием плазмы [1]. В связи с этим, поведение пластичных медных сплавов в подобных условиях вызывает несомненный интерес. Одной из установок, позволяющей проводить обработку материалов мощными импульсными потоками энергии, является Плазменный фокус (ПФ), где на образец-мишень совместно воздействуют радиационные, термические и ударно-волновые нагрузки [2 – 5]. Такая комплексная обработка, с одной стороны, позволяет оценить стойкость материала в экстремальных условиях, а с другой - открывает путь к созданию модифицированных поверхностных слоев с новыми свойствами. Исследование аналогичного воздействия с использованием установки ПФ на медь и медно-галлиевый сплав выполнено в работе [6].

Настоящая работа продолжает исследования, проведенные в работе [6], и посвящена изучению повреждаемости и деформационных эффек-

тов в поверхностных слоях сплавов систем Cu-Ni и Cu-Ni-Ga при воздействии на них мощных импульсных потоков дейтериевой плазмы и ионов дейтерия, генерируемых в установке ПФ.

Методика экспериментов и исследований

Схема облучения образцов в установке Плазменный фокус (ПФ) приведена на рис. 1.

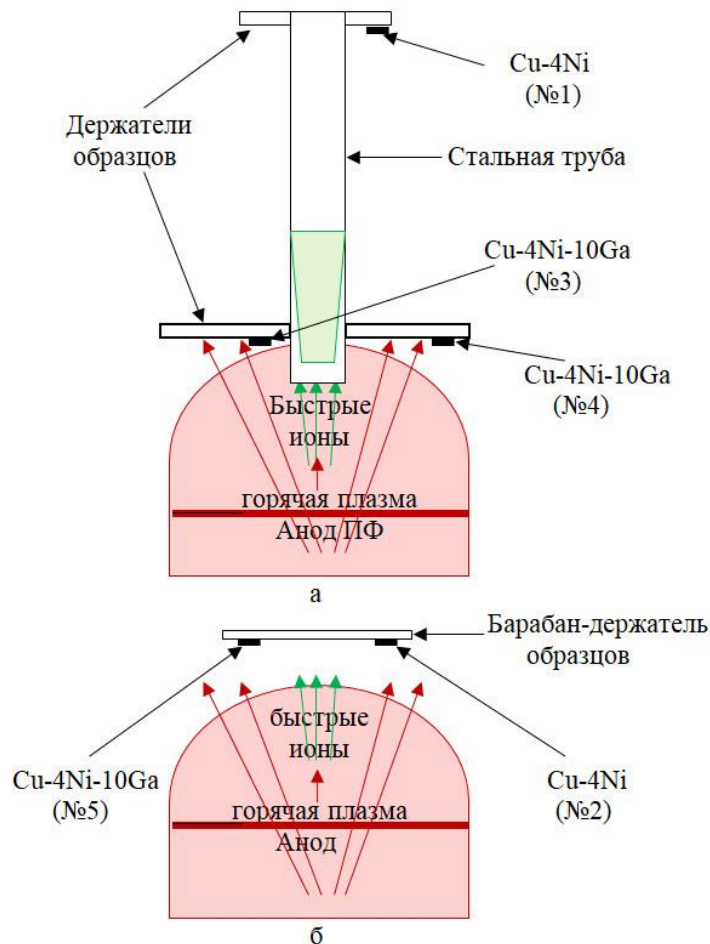


Рис.1. Схема облучения образцов сплавов Cu – 4Ni и Cu-4Ni-10Ga в установке PF-1000 с использованием шестигранной трубы (а) и барабана (б) для крепления держателей образцов

В качестве исследуемых материалов использовались сплавы Cu – 4%Ni и Cu-4%Ni-10%Ga (здесь и далее – масс%), которые были выплавлены в вакуумной печи СШВЛ - 16 в графитовых тиглях в виде цилиндрических образцов диаметром $\Phi = 9$ мм. Сплавы после выплавки имели дендритную структуру (см. рис. 2) и представляли собой твердые растворы никеля в меди и совместно никеля с галлием в меди, которые

оставались стабильными в широком интервале температур от комнатной до температуры плавления. Сплавы были нарезаны на образцы в форме таблеток толщиной 2 мм. Эксперименты по облучению проведены в установке ПФ марки «PF-1000» с энергетическим запасом 600 кДж. Рабочим газом в экспериментах был дейтерий при начальном давлении в камере $P = 470$ Па. Использовались две методики облучения (см. рис. 1), которые были опробованы в работе [6] и позволяли варьировать режим обработки образцов потоками дейтериевой плазмы (ДП) и ионов дейтерия (ИД) с энергией $E_i \geq 100$ кэВ. Сплав Cu – 4%Ni был облучен в двух режимах. В случае, когда образец этого сплава был закреплен на заднем торце шестигранной трубы, изготовленной из стали марки 10X12Г20В (рис. 1а), на него воздействовала только ДП, так как стенка трубы экранировала образец от потока быстрых ИД. При этом расстояние от образца до анода установки составляло $L=40$ см. В случае же размещения образцов этого сплава и сплава Cu–4%Ni–10%Ga на стенке барабана-держателя, изготовленного из стали X18Н9Т (см. рис. 1б), на каждый из них действовали совместно оба потока – ИД и ДП. Образцы отстояли от анода ПФ на расстоянии $L=12$ см и были смещены от оси камеры ~ на 5 см (рис. 1б). Так как в этом случае угол конуса разлета генерируемых в ПФ быстрых ионов составлял $\sim 40^\circ$, то на образцы действовала не самая мощная компонента ионного пучка, телесный угол расходимости которой $\sim 7\text{--}10^\circ$. Это уменьшало энергетическое воздействие на сплавы, снижало примерно на порядок величины плотность мощности потока, и образования УВ в объеме облучаемых сплавов не происходило. Совместное пучково-плазменное воздействие на материал Cu–4%Ni–10%Ga осуществлялось также в экспериментах, когда образцы этого сплава были закреплены вблизи переднего торца трубы и находились от анода установки на расстоянии $L=15$ см. (рис. 1а). Во всех экспериментах облучаемые образцы-мишени располагались в катодной области камеры ПФ.

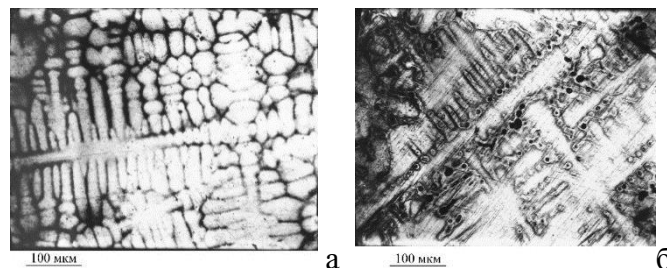


Рис. 2. Микроструктура участков сплавов Cu-4%Ni (а) и Cu-4%Ni-10%Ga (б) в исходном состоянии после выплавки (оптическая микроскопия)

Параметры облучения образцов представлены в Таблице 1. В ней эксперименты с использованием шестигранной трубы названы «Эксперимент №1», а с применением барабана-держателя – «Эксперимент №2».

Таблица 1

Параметры облучения образцов сплавов Cu-4%Ni и Cu-4%Ni-10%Ga
в установке PF-1000

Образец	Эксперимент №1					
	Рас- стоян. от анода L , см	Плот- ность потока $ДП$, $Вт/см^2$	Дли- тельн. имп. $ДП$, τ , с	Плотность по- тока $ИД$, $Вт/см^2$	Дли- тельн. имп. $ИД$, τ , с	Числ о имп. возд., N
Cu-4Ni (№1)	40	$2 \cdot 10^7$	10^{-7}	–	–	4
Cu-4Ni-10Ga (№3)	15	10^8	10^{-7}	$10^8 - 10^9$	$5 \cdot 10^{-8}$	4
Cu-4Ni-10Ga (№4)	15	$5 \cdot 10^7$	10^{-7}	10^8	$5 \cdot 10^{-8}$	4
Эксперимент №2						
Cu-4Ni(№2) Cu-4Ni-10Ga (№5)	12	$10^8 - 10^9$	10^{-7}	$10^9 - 10^{10}$	$5 \cdot 10^{-8}$	5

После облучения образцы исследовались методами оптической микроскопии (ОМ) с применением микроскопа Neophot и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием сканирующего электронного микроскопа EVO 40 фирмы Zeiss с приставкой для локального рентгеноспектрального анализа (РСА).

Результаты и обсуждение

1. Повреждаемость медных сплавов

На рис.3 и 4 представлена микроструктура облученной поверхности образцов сплава Cu-4%Ni после воздействия на них импульсных потоков $ДП$ (в эксп. №1) и совместного воздействия потоков $ДП$ и $ИД$ (в эксп. №2). В обоих случаях наблюдается типичный характер повреждаемости $ПС$, реализуемый в металлических материалах в подобных условиях пучково-плазменного воздействия [7–9]: на облученной поверхности видны волнообразный рельеф, кратеры, микропоры, каплеобразные фрагменты, но отсутствуют микротрещины. В наиболее жестком режиме облучения (в эксп. №2) усиливается процесс эрозии и удаления части $ПС$ вследствие испарения материала.

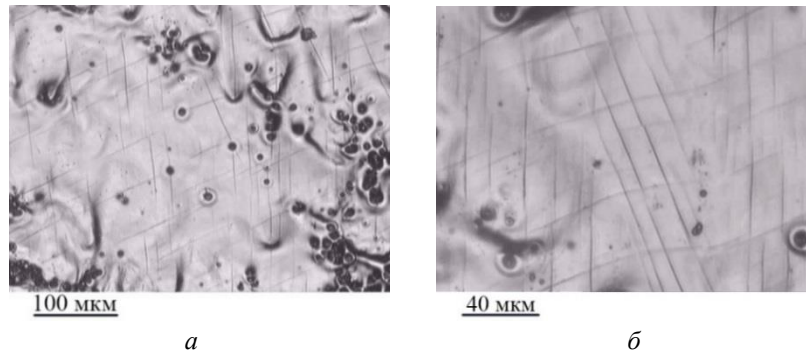


Рис. 3. Микроструктура участков поверхности образца сплава Cu-4%Ni после облучения в установке ПФ в эксп. №1: расстояние от анода $L = 40$ см, $q_{pl} = 2 \cdot 10^7$ Вт/см², $\tau = 100$ нс, число имп. $N=4$ (ОМ) Видна блочная структура

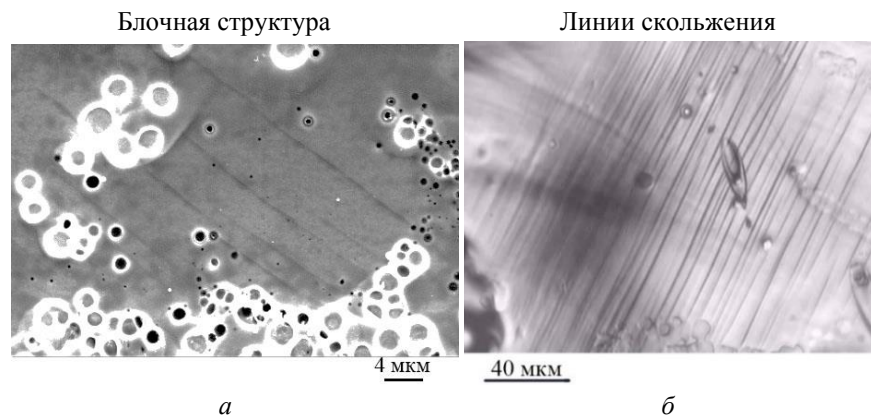


Рис.4. Микроструктура участков поверхности образца сплава Cu-4%Ni после облучения в установке ПФ в эксп. №2: $q_{pl} = 10^8 - 10^9$ Вт/см², $\tau = 100$ нс, $q_i = 10^9 - 10^{10}$ Вт/см², $\tau = 50$ нс, число имп. $N=5$: а – СЭМ, б - ОМ

Специфика повреждаемости сплава Cu-4%Ni-10%Ga при различных режимах облучения представлена на рис. 5. Как видно из схемы на рис. 1а, образец №3 сплава мог подвергаться воздействию потоков ДП, а также частично - быстрых ИД и испытывал заметную повреждаемость ПС. Облученная поверхность сплава (рис. 5а) имеет волнообразный характер, содержит множество вздутий, пор, каплеобразных наплывов и кратеров с большим разбросом характерных размеров – от единиц и десятков до нескольких сотен мкм. Такой вид поверхности указывает на то, что в ПС при каждом импульсном воздействии потоков энергии происходило взрывное кипение, сопровождавшееся процессами испарения, эрозии, образования жидкой фазы и быстрой кристаллизации.

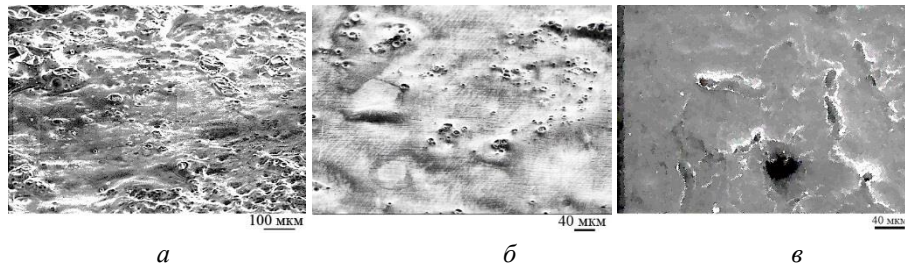


Рис. 5. Микроструктура участков поверхности сплава Cu-4%Ni-10%Ga после облучения в установке ПФ: а – эксп. №1 обр. №3 ($q_{pl} = 10^8$ Вт/см², $\tau = 100$ нс, $q_i = 10^8 - 10^9$ Вт/см², $\tau = 50$ нс, число имп. $N=4$); б- эксп. №1 обр. №4 ($q_{pl} = 5 \cdot 10^7$ Вт/см², $\tau = 100$ нс, $q_i = 10^8$ Вт/см², $\tau = 50$ нс, число имп. $N=4$); в – эксп. №2 обр. №5 ($q_{pl} = 10^8 - 10^9$ Вт/см², $\tau = 100$ нс, $q_i = 10^9 - 10^{10}$ Вт/см², $\tau = 50$ нс, число имп. $N=5$ (СЭМ))

Снижение в образце №4 сплава по сравнению с обр. №3 плотности потока энергии, воздействующей на ПС, привело к уменьшению его повреждаемости (рис.5б). Это выражается в более сглаженном рельефе поверхности, а также в уменьшении количества наблюдаемых кратеров и их максимальных размеров (от нескольких сотен в обр. №3 до нескольких десятков в обр. №4). Другими словами, интенсивность выхода газовой фазы из расплава с образованием кратеров на его поверхности в обр. №4 была ниже, чем в обр. №3, что способствовало снижению их размеров и количества. Наличие же газовой фазы в расплавленном ПС связано с присутствием в исходном состоянии сплава кислорода примеси, а также с имплантацией в материал ионов дейтерия. Их захват порами и вакансионными комплексами [10] с последующей коагуляцией в микропузыри и удалением из жидкой фазы, а также возможность образования паровой фазы при взаимодействии ионов дейтерия с присутствующим в сплаве кислородом примеси способствовали наблюдаемому на поверхности кратерообразованию.

Облучение образца сплава Cu-4%Ni-10%Ga, закрепленного на барабане-держателе, происходило в наиболее жестком режиме облучения (см. табл. 1). Повреждаемость рассматриваемого сплава (рис. 5в) определялась высокой интенсивностью процесса эрозии материала, в результате которой заметная часть ПС удалялась со стороны облучаемой поверхности. Поэтому на волнообразной поверхности сплава после облучения содержится заметно меньше фрагментов каплеобразного вида, кратеров и пор, чем в аналогичном сплаве после экспериментов №1.

Следует особо подчеркнуть, что при всех реализованных режимах радиационно-термической обработки на облученной поверхности сплава Cu-4%Ni-10%Ga, как и в сплаве Cu-4%Ni, отсутствуют микротрещины.

В то же время аналогичные или близкие к ним условия пучково-плазменного воздействия на тугоплавкие материалы – W, Mo, V и др. – приводят к образованию микротрещин в облученных ПС (см., например, [11 – 13]).

2. Ячеистая микроструктура в сплаве Cu-4%Ni-10%Ga

Исследования показали, что на облученной поверхности сплава Cu-4%Ni-10%Ga, пространство между кратерами представляет собой ячеистую микроструктуру, ячейки имеют каплеобразный вид, а их средний размер лежит в пределах $\sim 0,5 - 1$ мкм. Пример подобной структуры для образца №3 сплава представлен на рис.6а. Интересно, что в отдельных участках облученного ПС некоторая часть ячеек расположена вдоль линий скольжения (рис. 6б, в), возникших вследствие пластической деформации материала. В других участках ячейки равномерно распределены по занимаемой площади. В наиболее жестком режиме воздействия потоков ДП и ИД на сплав Cu-4%Ni-10%Ga, реализованном в эксперименте №2, на его облученной поверхности, помимо ячеек, наблюдается присутствие дендритов (рис.7).



Рис. 6. Микроструктура участков поверхности образца №3 сплава Cu-4%Ni-10%Ga после облучения в установке ПФ в эксперименте №1: $q_{pl} = 10^8$ Вт/см², $\tau = 100$ нс, $q_i = 10^8 - 10^9$ Вт/см², $\tau = 50$ нс, число имп. $N=4$ (СЭМ)

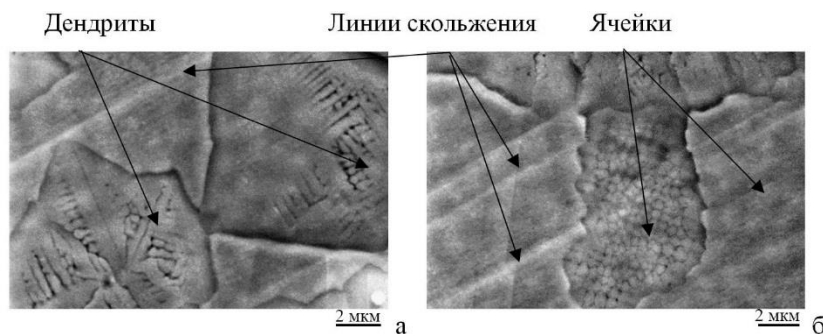


Рис. 7. Микроструктура участков поверхности образца №5 сплава Cu-4%Ni-10%Ga после облучения в установке ПФ в эксперименте №2: $q_{pl} = 10^8 - 10^9$ Вт/см², $\tau = 100$ нс, $q_i = 10^9 - 10^{10}$ Вт/см², $\tau = 50$ нс, число имп. $N=5$. (СЭМ)

Наличие ячеистой структуры указывает на потерю устойчивости плоским фронтом кристаллизации расплава, что обычно имеет место при возникновении в нем концентрационного переохлаждения перед поверхностью раздела твердой и жидкой фаз [14 - 16]. Ячейки, имеющие на облученной поверхности сплава каплеобразную форму, представляют собой вершины столбчатых кристаллов, которые сформировались и выросли в процессе направленной кристаллизации расплава *ПС* в условиях концентрационного переохлаждения. Можно полагать, что ветви дендритов, входивших в структуру исходного сплава (рис. 2), который в приповерхностном слое под расплавом оставался в твердом состоянии, контактировали с жидкой фазой и становились центрами зарождения и последующего быстрого роста столбчатых кристаллов в направлении градиента температуры.

Отметим, что образование столбчатой структуры наблюдалось в модифицированных *ПС* различных сталей и никелевых сплавов после воздействия на них высокотемпературной импульсной плазмы при $q_{pl} \geq 2 \cdot 10^6$ Вт/см², $\tau = 3 - 50$ мкс [2], а также в вольфраме при воздействии дейтериевой плазмы с тепловой нагрузкой 0,2—5 МДж/м² и длительности импульса 0,1—1,2 мс [17].

Обращает на себя внимание тот факт, что в бинарном сплаве Cu-4%Ni после облучения его потоками *ДП* и *ИД* ячеистой структуры в *ПС* не возникало. Аналогичная ситуация имела место и в ранее исследованном сплаве Cu – 10%Ga [6] после пучково-плазменного воздействия на него примерно в том же режиме. В трехкомпонентном же сплаве Cu-4%Ni-10%Ga при облучении его в тех же условиях, что и сплав Cu-4%Ni (табл. 1, эксп. №2), наблюдается ячеистая и ячеисто-дендритная (рис.6, 7) структуры. Исходя из полученных результатов, можно заключить, что увеличение степени легирования бинарных медных сплавов систем Cu – Ni и Cu – Ga путем добавления в состав третьего компонента способствовало в процессе кристаллизации *ПС*, расплавленного импульсным излучением, потере устойчивости плоским фронтом затвердевания. Это, по-видимому, происходило из-за возникновения эффекта концентрационного переохлаждения в жидком растворе, что стало причиной образования обнаруженных ячеистой и дендритной структур (рис.6, 7).

Влияние концентрации легирующих элементов на морфологическую устойчивость фронта кристаллизации и структурное совершенство монокристаллов никелевых сплавов наблюдалось также в работах [18, 19].

3. Пластическая деформация в поверхностном слое

После проведенных экспериментов на облученной поверхности исследуемых сплавов присутствуют признаки пластической деформации

(ПД) – линии скольжения. В различных участках ПС сплава Cu-4%Ni наблюдаются два вида линий скольжения: с образованием блочной (рис. 3 и 4а) и полосчатой (рис. 4б, в) микроструктуры. Характер ПД для сплава Cu-4%Ni-10%Ga (эксп. №1 обр. №4) представлен на рис. 8 в зоне границы двух зерен. В одном случае (рис. 8а) наблюдается одна система линий скольжения, которые в соседних зернах расположены под углом друг к другу, в другом случае (рис. 8б) в пределах каждого зерна наблюдаются две системы линий скольжения. В целом, как показал анализ, основная площадь облучения сплава содержит «сетку», состоящую из двух систем линий скольжения.

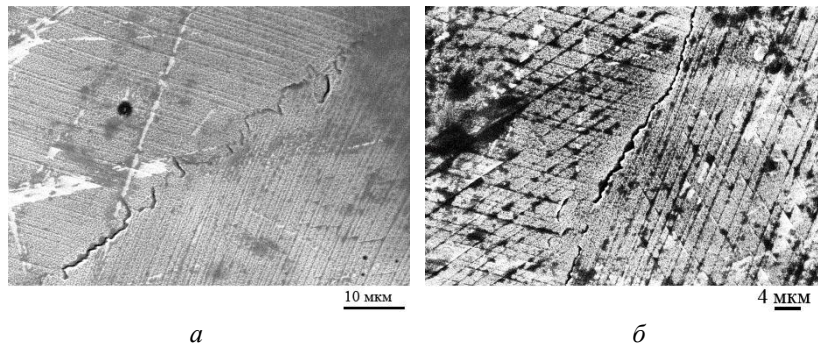


Рис. 8. Микроструктура участков поверхности образца №4 сплава Cu-4%Ni-10%Ga после облучения в установке ПФ в эксперименте №1: $q_{pl} = 5 \cdot 10^7$ Вт/см², $\tau = 100$ нс, $q_i = 10^8$ Вт/см², $\tau = 50$ нс, число имп. $N=4$ (СЭМ)

Представленные результаты позволяют заключить, что процесс ПД в ПС облученных образцов сплавов Cu-4%Ni и Cu-4%Ni-10%Ga протекал механизмом скольжения по плоскостям наиболее плотной упаковки {111}, типичным для материалов с ГЦК решеткой [10, 20]. Этот механизм действовал как при облучении медно-никелевого сплава только потоками ДП (рис. 3), так и при совместном облучении каждого из сплавов потоками ДП и ИД (рис. 4, 6 - 8). Наличие блочной и полосчатой микроструктур указывает на то, что ПД в различных локальных участках ПС сплавов протекала с использованием различных систем скольжения, допустимых в металлах с ГЦК решеткой, в зависимости от ориентировки кристаллитов в этих участках относительно оси приложенного напряжения. Термические напряжения в облученных ПС возникали на стадии охлаждения образцов сплавов после воздействия на них импульсных потоков ДП и ИД. Вследствие возможного неоднородного распределения плотности энергии по сечению ионного пучка при импульсных разрядах в ПФ и, соответственно, флуктуаций температуры в облучаемых образцах сплавов, термические напряжения могли быть

различными в разных микрообъемах *ПС*. В сочетании с различной ориентировкой микрокристаллитов, *ПД* в локальных участках *ПС* сплавов протекала механизмом скольжения по плоскостям {111} с использованием тех систем скольжения, которые для данного участка облучаемых сплавов были предпочтительны.

Заключение

Проведена серия экспериментов по облучению в установке Плазменный фокус (ПФ) медных сплавов Cu-4%Ni и Cu-4%Ni-10%Ga (масс. %) мощными импульсными потоками дейтериевой плазмы (*ДП*) и ионов дейтерия (*ИД*). Сплавы облучались в двух режимах: *жестком режиме* совместного воздействия потоков *ДП* при $q_{pl} = 10^8 - 10^9$ Вт/см², $\tau_{pl} = 100$ нс и *ИД* при $q_i = 10^9 - 10^{10}$ Вт/см², $\tau_i = 50$ нс, а также в более мягких режимах – сплав Cu-4%Ni потоками *ДП* при плотности мощности $q_{pl} = 10^7$ Вт/см² и длительности импульса $\tau_{pl} = 100$ нс, а сплав Cu-4%Ni-10%Ga - при $q_{pl} = 5 \cdot 10^7 - 10^8$ Вт/см², $q_i = 10^8 - 10^9$ Вт/см² и тех же значениях длительности импульса.

Показано, что характер повреждаемости сплавов Cu-4%Ni и Cu-4%Ni-10%Ga в испытанных режимах облучения примерно одинаков и определяется волнообразным рельефом поверхности, наличием на ней кратеров, микропор, фрагментов каплеобразного вида и отсутствием микротрещин. При каждом импульсном воздействии потоков энергии на обрабатываемый сплав происходило расплавление его *ПС*, взрывное кипение с образованием кратеров и пор на облученной поверхности, а также испарение материала (процесс эрозии). В более жестком режиме облучения указанные процессы усиливались и сопровождалась удалением части *ПС* вследствие эрозии материала.

В отличие от сплава Cu-4%Ni, структура *ПС* сплава Cu-4%Ni-10%Ga в реализованных режимах облучения после расплавления пучково-плазменными воздействиями и кристаллизации жидкой фазы имеет ячеистый или ячеисто-дендритный характер. Параметры образования такой структуры зависят от режима импульсного облучения образца-мишени и условий последующей направленной кристаллизации расплавленного *ПС*. Кроме того, на формирование рассматриваемой структуры заметное влияние оказывает легирование бинарного медно-никелевого сплава третьим элементом – галлием и, вероятно, дендритная структура сплава в исходном состоянии.

В ПС каждого из исследованных сплавов при облучении потоками ДП и ИД под действием термических напряжений протекала пластическая деформация типичным для материалов с ГЦК решеткой механизмом скольжения по плоскостям наиболее плотной упаковки $\{111\}$.

Полученные результаты показывают, что пластичные медные сплавы систем Cu – Ni и Cu – Ni – Ga, а также исследованный ранее сплав Cu – 10%Ga [6], проявляют весьма высокую трещиностойкость к воздействию мощных импульсных радиационно-термических нагрузок наносекундного диапазона длительности импульса, генерируемых в установке ПФ, в сравнении с тугоплавкими металлами – W, Mo, V.

Работа выполнена по государственному заданию № 075-00947-20-00.

Литература

1. Betti R., Hurricane O. A. Inertial-confinement fusion with lasers. NATURE PHYSICS, May 2016, v.12, p. 435 – 448. DOI: 10.1038/NPHYS3736.
2. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин Б.А., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. М.: Круглый год, 2001, 528 с.
3. Garkusha I.E., Burdakov A.V., Ivanov I.A., Kruglyakov E.P. et al. Plasma surface interaction during ITER transient events simulation with QSPA Kh – 50 and Gold – 3Facilities. Problems of atomic science and technology, 2008, № 6, Series: Plasma Physics, V. 14, pp. 58–60.
4. V.A. Gribkov, V.N. Pimenov, L.I. Ivanov, E.V. Dyomina, S.A. Maslyaev, R. Miklaszewski, M. Scholz, U.E. Ugaste, A.V. Doubrovsky, F. Mezzetti, V.C. Kulikauskas, V.V. Zatekin. Interaction of High Temperature Deuterium Plasma Streams and Fast Ion Beams with Condensed Materials in Dense Plasma Focus Device. Journal of Physics D: Applied Physics 2003, 36, 1817-1825.
5. Майер П. Н., Майер А. Е. Численное моделирование разрушения металлических мишеней при воздействии сильнооточных электронных пучков. Вестник Челябинского государственного университета, 2011, № 38 (253). Физика. Вып. 11, с. 41–49.
6. Боровицкая И.В., Грибков В.А., Демин А.С., Епифанов Н.А., Латышев С.В., Масляев С.А., Морозов Е.В., Пименов В.Н., Сасиновская И.П., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И., Шольц М. Повреждаемость и деформационные эффекты в поверхностных слоях меди и сплава системы медь-галлий при импульсном облучении в установке плазменный

- фокус. Перспективные материалы, 2020, №5, с. 23-37. DOI: 10.30791/1028-978X-2020-5-23-37.
7. Волков Н.Б., Майер А.Е., Яловец А.П. О механизме кратерообразования на поверхности твердых тел при воздействии интенсивных пучков заряженных частиц. ЖТФ, 2002, т.72, вып.8, с. 34-43.
 8. Zhu X.P., Lei M.K., Dong Z.H., et al. Crater formation on the surface of titanium irradiated by a high-intensity pulsed ion beam. Surf.Coat.Technol., 2003, v.173, pp.105-110.
 9. Ковивчак В.С., Панова Т.В., Михайлов К.А. Формирование периодических структур на поверхности магния и алюминия при воздействии мощного ионного пучка наносекундной длительности. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2012, №1, с. 73 – 76.
 10. Бондаренко Г.Г. Радиационная физика, структура и прочность твердых тел. Москва, Лаборатория знаний. 2016, 462с.
 11. Gribkov V.A., Paduch M., Zielinska E., Demin A.S., Demina E.V., Kazilin E.E., Latyshev S.V., Maslyayev S.A., Morozov E.V., Pimenov V.N. Comparative analysis of damageability produced by powerful pulsed ion/plasma streams and laser radiation on the plasma-facing W samples, Radiation Physics and Chemistry, Volume 150, September 2018, Pages 20-29.
 12. Боровицкая И.В., Пименов В.Н., Грибков В.А., Падух М., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И., Парамонова В.В., Морозов Е.В. Структурные изменения поверхности ванадия под воздействием импульсных потоков высокотемпературной дейтериевой плазмы и ионов дейтерия. Металлы. 2017. №6. с. 30-37.
 13. Демин А.С., Масляев С.А., Пименов В.Н., Грибков В.А., Демина Е.В., Латышев С.В., Ляховицкий М.М., Сасиновская И.П., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И., Падух М. Воздействие мощных импульсных потоков ионов дейтерия и дейтериевой плазмы на молибденовую пластину. Физика и химия обработки материалов, 2017, №6, с.5-17.
 14. Физическое металловедение (под ред. Р.У. Кана и П. Хаазена). Т.2 Фазовые превращения в металлах и сплавах и сплавы с особыми физическими свойствами. Пер. с англ. М., Металлургия, 1987, 624 с.
 15. Няшина Н.Д., Трусов П.В. Анализ устойчивости ячеистого фронта кристаллизации и формирование структуры затвердевающего расплава. Математическое моделирование систем и процессов, 1998, №6, с. 66 – 74.

16. Мочалов И.В. Выращивание оптических кристаллов. Часть 2. Конспект лекций. СПб, НИУ ИТМО, 2012, 122 с.
17. Посакалов А.Г., Климов Н.С., Гаспарян Ю.М., Огородникова О.В., Ефимов В.С. Изменение структуры приповерхностного слоя вольфрама и накопление дейтерия при импульсных плазменных нагрузках. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 1, с. 23-28.
18. Ладыгин А.Н., Свердлов В.Я. Влияние состава никель-вольфрамового сплава вблизи точки конгруэнтного плавления на рост монокристаллов с ячеистой структурой. ВАНТ, 2004, №3. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (85), с. 132-136.
19. Ажажа В.М., Свердлов В.Я., Кондратов А.А., Богуслаев А.В., Ключихин В.В. Влияние условий кристаллизации на макроскопический фронт кристаллизации и структурное совершенство монокристаллов Ni – сплавов. Вестник Харьковского университета, 2007, №781, с. 73 – 80.
20. Николаева Е.А. Сдвиговые механизмы пластической деформации монокристаллов. Учебное пособие, 2011, Издательство Пермского государственного технического университета, 50 с.

**Труды XXX Международной конференции
«Радиационная физика твёрдого тела»
(Севастополь, 24 – 29 августа 2020 г.)**

Научный редактор:
заслуженный деятель науки РФ,
д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Геннадий Германович

Подписано в печать 27. 07. 2020г.
Бумага типографская. Печать - ризография.
Формат 70х108/16.
Тираж 100 экз. Заказ 385.

Издательство ФГБНУ «НИИ ПМТ»
115054, Москва, ул. М.Пионерская, д. 12
Тел/факс (499) 283-90-63, 959-37-05 e-mail: niipmt@mail.ru

Отпечатано в ООО «Телер»
125130, Москва, ул. Клары Цеткин, д. 28
Тел/факс (495) 937-86-64, e-mail: piskarev@teler.ru

ISBN 978-5-89671-025-7

