

Сибирский государственный индустриальный университет, Россия
Международная высшая школа Цинхуа в Шэньчжэне, Китай
Институт физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук, Россия
Алтайский государственный технический университет
имени И.И. Ползунова, Россия
Национальный исследовательский Томский
государственный университет, Россия
Научно-образовательный центр мирового уровня "Кузбасс", Россия
Университет науки и технологий Пекина, Китай
Хуачжунский университет науки и технологий, Китай
Университет Вэньчжоу, Китай
TGL Technology LTD, Великобритания

**МАТЕРИАЛЫ ВО ВНЕШНИХ ПОЛЯХ
(МВП–2023)**

13 – 14 марта 2023

*Труды
XII МЕЖДУНАРОДНОГО ОНЛАЙН СИМПОЗИУМА*

Новокузнецк, 2023

УДК 669.017:539.2 (06)

ББК 22.9

М 39

Редакционная коллегия:

д-р физ.-мат. наук, профессор В.Е. Громов,

д-р. техн. наук, доцент Д.В. Загуляев,

д-р. техн. наук, доцент С.А. Невский,

аспирант кафедры ЕНД им. проф. В.М. Финкеля А.Н. Гостевская,

аспирант кафедры ЕНД им. проф. В.М. Финкеля А.А. Серебрякова

М 39 Материалы во внешних полях : труды XII Международного онлайн-симпозиума / под ред. В.Е. Громова, Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2023. – 151 с.

Сборник трудов конференции содержит научные доклады в области физики конденсированных сред, основанные на научных достижениях, сгруппированные по разделам: перспективные технологии поверхностной упрочняющей обработки, проблемы прочности, пластичности материалов при внешнем энергетическом воздействии, проблемы эксплуатации материалов в экстремальных условиях, исследования высокоэнтропийных сплавов, методы получения и обработки материалов. В докладах представлены результаты, полученные экспериментальными методами и теоретическим моделированием. Актуальность выбранных направлений обосновывается ежегодно проводимыми международными конференциями, специализированными изданиями, международными проектами, посвященными поднимаемым темам.

Сборник трудов предназначен для специалистов по прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий и может быть использован научно-техническими работниками, аспирантами и студентами старших курсов.

УДК 669.017:539.2 (06)

ББК 22.9

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2023

Содержание

Секция 1. Передовые технологии упрочняющей поверхностной обработки.....	7
Структурно-фазовые состояния поверхности титана после электровзрывного науглероживания совместно с оксидом циркония и электронно-пучковой обработки А.В. Ионина, Е.С. Вашук, Е.А. Будовских, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов.....	9
Электронно-ионно-плазменный комплексный многоцикловый метод модификации поверхностного слоя высоколегированной стали аустенитного класса Ю.Ф. Иванов, В.В. Шугуров, Е.А. Петрикова, А.Д. Тересов, И.В. Лопатин.....	11
Макроскопическая локализация пластической деформации трехслойного композита С.А. Баранникова, Ю.В. Ли.....	13
Упрочнение и выглаживание аддитивных поверхностей титанового сплава ВТ6 электроискровой обработкой многокомпонентными электродами С.К. Муқанов, П.А. Логинов, М.И. Петржик, А.Е. Кудряшов, Е.А. Левашов.....	15
Изменение механических свойств аморфно-нанокристаллического металлического сплава воздействием лазерного излучения И.С. Сафронов, А.А. Неплюева.....	17
Crystal filling geometry of coordination spheres in the d0 ₃ superstructure M.D. Starostenkov, Z. Yang, G. Dong.....	19
Анализ влияния режимов комбинированного упрочнения титановых сплавов на усталостную долговечность и износостойкость М.Д. Романенко, В.В. Баринов, К.А. Бадиков, К.И. Сенцов.....	21
Исследование развития точечных дефектов в кристалле гранцентрированной кубической решётке М.Д. Старостенков, А.С. Кочкин, К.А. Теников, А.Ю. Варавина ³ , Р.Е. Сальникова.....	23
Моделирование локального проплавления в поверхностном слое металлического сплава А.И. Ушаков, И.С. Сафронов.....	25
Микроструктурные и трибологические исследования новых износостойких покрытий для горношахтного оборудования В.К. Дробышев, А.Р. Михно, А. Н. Гостевская.....	26
Секция 2. Проблемы прочности, пластичности материалов при внешних энергетических воздействиях.....	29
Ostwald ripening accelerated by electropulsing Sh. Xia, W. Jie, Q. Li.....	31
Структура и свойства заэвтектического силумина, подвергнутого комплексной обработке Ю.А. Шлярова, В.В. Шляров, Д.В. Загуляев, А.А. Серебрякова, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов.....	35
Modelling of processes during heat treatment of rails V.D. Sarychev, A.D. Filyakov, I.I. Chumachkov, S.V. Kononov.....	36
Молекулярно-динамическое моделирование влияния лазерной абляции на строение металла А.Н. Гостевская, А.В. Маркидонов, В.К. Дробышев, И.А. Панченко.....	40
Влияние параметров получения электронно-лучевой аддитивной технологией образцов интерметаллидов титан-алюминий на микротвердость Л. Юаньсюнь, Ж.Г. Ковалевская.....	42
Анализ причин ускорения насыщения поверхности металлов при электролитно-плазменной и иных видах электро-химико-термической обработки Д.Е. Капуткин, В.Н. Дураджи, Н.А. Капуткина.....	44
Критерий коробления при термической обработке при симметричном распределении температур Д.Е. Капуткин.....	46
Высокопрочные криогенные аустенитные cr-ni-mn стали, легированные азотом Л.М. Капуткина, И.В. Смарыгина.....	48
Mechanical characteristics and fracture surface of lead grade 2 destructed in a constant magnetic field A.A. Serebryakova, V.V. Shlyarov, D.V. Zaguliaev.....	50
Влияние вибрации на процессы усталости конструкционных материалов и элементов О.Б. Скворцов.....	51

Управление свойствами полупроводниковых гетероструктур и мдп-наноструктур с помощью внешних полей Н. Е. Капуткина.....	53
Влияние внешних и собственных электромагнитных полей на пластические свойства металлических проводников В.И. Стащенко, О.Б. Скворцов.....	55
Создание макетных образцов композиционной балки. подготовка образцов к серии предварительных механических испытаний Д.А. Дурасова.....	56
Features of the fracture surface of the AK5M2 alloy modified with Ti and irradiated by an electron beam A. A. Serebryakova, Yu. A. Shliarova, D.V. Zaguliaev, Yu.F. Ivanov.....	58
Влияние температуры на неоднородность пластической деформации Fe-Cr-Ni сплава С.А. Баранникова, П.В. Исакова.....	59
Моделирование консервативного движения дислокационных порогов для оценки интенсивности генерации точечных дефектов Д.Н. Черепанов.....	61
Влияние свойств элемента деформационной среды на формирование различных типов полос суперлокализации пластической деформации Я.Д. Липатникова, Ю.В. Соловьева, И.Г. Вовнова, Л.А. Валуйская, Н.Н.Белов.....	63
Изменение элементного и фазового состава, дефектной субструктуры образцов системы «пленка (титан) / (AK5M2) подложка», подвергнутых облучению электронным пучком В.В. Шляров, Д. В. Загуляев, Ю.А. Шлярова, А.А. Серебрякова, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов.....	65
Ориентационная зависимость характеристик поверхностных упрочненных слоев в монокристаллах аустенитной нержавеющей стали после ионно-плазменного насыщения Е.А. Загибалова, А.С. Нифонтов, Е.Г. Астафурова.....	67
Многоцикловая усталость технически чистого титана в условиях магнито-полевых воздействий В.В. Шляров, К.В. Аксенова, А.А. Серебрякова, Д.В. Загуляев.....	74
Исследование микроструктуры и микротвердости Al-Zn-Mg-Cu сплава, полученного аддитивным способом В.К. Дробышев, Д.Н. Лабунский, И.А. Панченко, С.В. Коновалов.....	76
Секция 3. Проблемы эксплуатации материалов в экстремальных условиях.....	79
Собственные акустические колебания как возможный фактор стресс-коррозии на магистральном газопроводе А.Б. Арабей, И.В. Ряховских, Т.Ю. Истомина, Д.Е. Капуткин, Д.И. Преферансов, С.И. Погуляев, В.А. Степанова.....	83
Механизмы упрочнения рельсовой стали при сжатии К.В. Аксёнова, Е.С. Ващук, В.Е. Громов, Ю.Ф.Иванов.....	85
Взаимное влияние грунтового электролита и углеродистой стали в процессе биологической коррозии при воздействии ультразвуковых колебаний Д. Е. Капуткин, Т. Ю. Истомина, В.А. Степанова, Д.И. Преферансов.....	88
Внутренние напряжения и их источники в рельсовых сталях Н.А. Попова, В.Е. Громов, М.А. Порфирьев, Р.Е. Крюков, В.В. Шляров, А.А. Юрьев.....	89
Динамические механические нагрузки на проводящие элементы электромеханического оборудования, связанные с воздействием электрических и магнитных полей О.Б. Скворцов, В.И. Стащенко.....	90
Сопrotивление ползучести модифицированного сплава TNM-B1 с глобулярной и ламеллярной структурой, полученного методом порошковой металлургии Г.М. Марков, П.А. Логинов, Е.А. Левашов.....	92
Структурно-фазовое состояние и свойства тонких пленок на основе in-sn-o, напыленных на кварцевые стекла методом магнетронного распыления металлической мишени из сплава индия и олова Р.Б. Турсунханова, В.П. Сергеев, М.П. Калашников, О.В. Сергеев, В.В. Нейфельд.....	93
Deformation of different ribbon amorphous alloys under cyclic loading and uniform heating A.D. Berezner, V.A. Fedorov.....	97
Прочностные, трибологические свойства и структурно-фазовые состояния рельсовых сталей М.А. Порфирьев, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Ю.А. Шлярова, Р.Е. Крюков,	

Г.И. Черепанова.....	103
Эволюция структурно-фазового состояния и качеств рельсов из заэвтектидной стали при долговременной эксплуатации М.А. Порфирьев, В.Е. Громов*, Р.Е. Крюков, А.А. Юрьев, Г.И. Черепанова.....	105
Секция 4. Материалы на основе высоко- и среднеэнтропийных сплавов, высоколегированные сплавы, методы их получения, структура, механические и функциональные свойства, механизмы деформации.....	107
Температурная зависимость механических свойств и деформационное поведение образцов, полученных методом электронно-лучевого аддитивного производства с использованием проволоки из аустенитной нержавеющей стали Е.Г. Астафурова, Е.В. Мельников, С.В. Астафуров, М.Ю. Панченко, К.А. Реунова, А.В. Лучин, Е.А. Колубаев.....	109
The mechanical properties of WAAM-CMT Al-5Si alloy C. Su, S. Konvalov.....	110
Структурно-фазовое состояние высокоэнтропийного сплава кантора после испытаний на разрушение А.Н. Гостевская, В.К. Дробышев, И.А. Панченко, С.В. Коновалов.....	112
Температурная зависимость механических свойств многокомпонентных сплавов системы FeMnCrNiCo(N) Д.О. Астапов, К.А. Реунова, Д.Ю. Гуртова, Е.Г. Астафурова.....	114
Изменение микротвердости покрытий из высокоэнтропийных сплавов В.Е. Громов, М.О. Ефимов, Ю.А. Шлярова, И.А. Панченко, С.В. Коновалов.....	115
Теплостойкие сплавы повышенной твердости, сформированные плазмой в азоте Н.Н. Малущин, В.Е. Громов, Л.П. Бащенко.....	116
Влияние легирования водородом на механизмы деформации аустенитной стали при холодной прокатке Е.В. Мельников, Е.Г. Астафурова.....	118
Механизмы формирования структур в материалах при воздействии плазменных потоков электрического взрыва проводника С.А. Невский, В.Д. Сарычев, А.Ю. Грановский, Л.П. Бащенко, В.Е. Громов, Д.В. Шамситдинов.....	120
Испытания на разрыв композиционных материалов на основе аморфных металлических сплавов марки 82К3ХСР и полимеров А.Д. Ошоров, И.В. Ушаков.....	122
Влияние старения на водородное охрупчивание высокоэнтропийных сплавов Fe ₂₀ Cr ₂₀ Ni ₂₀ Mn ₂₀ Co _{20-x} N _x Д.Ю. Гуртова, М.Ю. Панченко, Д.О. Астапов, Е.Г. Астафурова...	124
Эволюция дислокационных субструктур от деформации в медно-марганцевых сплавах Л.И. Тришкина, А. А. Клопотов, Т.В. Черкасова, В.И. Бородин, А.И. Потехаев, Д.А. Иванова.....	126
Структурные исследования влияния легирования переходными металлами Cr, V и смесью на основе тугоплавких металлов на структурно-фазовое состояние в стали гадфильда Н.А. Попова, А. А. Клопотов, Е.Л. Никоненко, В.И. Бородин, А.И. Потехаев.....	128
Влияние пластической деформации на структурно-фазовое состояние длительно эксплуатируемой стали 12Х1МФ Н.А. Попова, Е.Л. Никоненко, Н.В. Абабков, А.Н. Смирнов, В.И. Данилов.....	130
Структура и свойства покрытий из высокоэнтропийных сплавов FeCoCrNiMn и FeCoCrNiAl В.Е. Громов, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, М.О. Ефимов, Ю.А. Шлярова, И.А. Панченко, Г.И. Черепанова.....	132
Секция 5 Методы получения и обработки металлических и неметаллических материалов конструкционного и функционального применения.....	135
Research of argon arc surfacing parameters influence on the babbitt intermediate layer structure in the manufacture of functionally organized layered compositions V.Y. Plyukhina, R.S. Mikheev..	137
Получение двухкомпонентных металлических покрытий различной морфологии методом электроосаждения А.Г. Денисова, В.А. Данилов.....	139
Модификация структуры и механических свойств оксидной керамики ионной обработкой С.А. Гынгазов, В.А. Болтуева.....	141
Получение композиционных материалов на основе Ti-Al «Гидридной технологией» Н.И. Каракчиева, В.И. Сачков, И.А. Курзина.....	143

Влияние дозы имплантации ионами Al на упрочнение сплава ВТ1-0 в мелкозернистом состоянии А.В. Никоненко, Н.А. Попова, Е.Л. Никоненко.....	144
Ultrasonic welding of peek plates with cf fabric reinforcement. the process optimization by the neural network simulation S.V. Panin, V. O. Alexenko, D. Yu. Stepanov, A. V. Byakov, A.A. Bogdanov, D. G. Buslovich, D. Tian.....	146
Исследование процесса уплотнения порошков на основе диоксида циркония при спекании в присутствии малых добавок в виде легкоплавких оксидов в условиях термического нагрева и при нагреве пучком электронов С.А. Гынгазов, И.П.Васильев.....	148

Секция 1.

*Передовые технологии упрочняющей
поверхностной обработки*

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ СОВМЕСТНО С ОКСИДОМ ЦИРКОНИЯ И ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ

А.В. Ионина¹, Е.С. Ващук¹, Е.А. Будовских², В.Е. Громов², Ю.Ф. Иванов³

¹Филиал Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева
г. Новокузнецк, г. Прокопьевск, Россия, e-mail: ani-vo@yandex.ru

²Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

³Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Аннотация. Методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа исследована поверхность технически чистого титана после электровзрывного науглероживания совместно с оксидом циркония и электронно-пучковой обработки. Определены режимы последующей электронно-пучковой обработки, выравнивающей рельеф и элементный состав поверхности легирования. Выявлено формирование субмикроструктурной структуры поверхности комбинированной обработки и увеличение ее износостойкости в 1,3 раза.

Ключевые слова: электронно-пучковая обработка, электровзрывное легирование, науглероживание, оксид циркония, титан, сканирующая электронная микроскопия.

В последние годы получил развитие подход к упрочнению металлов и сплавов, при котором механическая прочность деталей обеспечивается применением экономичных низколегированных сплавов, а специальные свойства поверхности – локальным формированием на ней легированных слоев или нанесением покрытий, свойства которых соответствуют эксплуатационным требованиям. Легирование поверхностных слоев и нанесение покрытий с использованием концентрированных потоков энергии проводят, как правило, с целью повышения таких поверхностно чувствительно свойств как твердость, износо- и жаростойкость. Большой интерес вызывают методы упрочнения поверхности с использованием импульсных плазменных источников, поскольку они относительно дешевы, позволяют упрочнять сравнительно большие площади поверхности, сочетают термическое воздействие с легированием оплавляемых слоев. Примером такой обработки является электровзрывное легирование (ЭВЛ) металлов и сплавов.

Повышение свойств поверхности металлов и сплавов после ЭВЛ осуществляют с помощью электронно-пучковой обработки (ЭПО) [1-2]. Импульсные плазменные струи, используемые при ЭВЛ, и низкоэнергетические сильноточные электронные пучки имеют сопоставимые значения времени воздействия на поверхность, диаметра зоны обработки (~ 1 см) и поглощаемой плотности мощности (~1 ГВт/м²), что дает возможность их эффективного совместного применения. *Цель настоящей работы* – анализ структуры и свойств поверхности титана ВТ1-0, подвергнутого электровзрывному науглероживанию совместно с оксидом циркония и последующей ЭПО.

Электровзрывное легирование осуществляли на установке ЭВУ 60/10 при поглощаемой плотности мощности плазменной струи $q_p = 5,5$ ГВт/м². Взрываемым проводником служила углеродная лента массой 70 мг, в область взрыва вносили порошок оксида циркония массой 50 мг. Для ЭПО использовали установку «СОЛО», разработанную и созданную в Институте сильноточной электроники СО РАН. Плотность энергии пучка электронов E_s варьировали в пределах 45...60 Дж/см² при длительности импульсов электронной обработки τ , равной 100 и 200 мкс, и количестве импульсов N , равном 10 и 20 имп. Частота следования импульсов составляла 0,3 с⁻¹.

Исследования поверхности облучения осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа. Трибологические характеристики упрочненного слоя изучали, анализируя износостойкость и коэффициент трения.

Поверхность титана после ЭВЛ характеризуется формированием неоднородного покрытия. Анализ его структуры, выполненный методами сканирующей электронной микроскопии в обратно отраженных электронах, выявил резко различающиеся по контрасту участки. Основная часть поверхности окрашена в серый цвет; в белый цвет окрашены области глобулярной формы размерами от 5 до 30 мкм; в темный цвет – стержни длиной от 10 до 50 мкм и толщиной от 2 до 4 мкм. При съемке в обратно отраженных электронах более светлыми выявляются участки материала, обогащенные атомами циркония. Относительно малым атомным весом обладает углерод, следовательно, стержни являются частицами, образовавшимися при разрушении углеграфитовой ленты.

Исследования поверхности ЭВЛ после ЭПО показали, что в центральной части зоны воздействия пучка электронов, размеры которой увеличиваются от 10 мм при $E_s = 45$ Дж/см² до 18 мм при $E_s = 60$ Дж/см², рельеф поверхности выглаживается. Формируется поликристаллическая структура, средний размер зерен которой увеличивается с ростом E_s от 10 мкм при 45 Дж/см² до 22 мкм при 50 Дж/см². Увеличение E_s до 60 Дж/см² при $\tau = 100$ мкс сопровождается формированием поликристаллической структуры с высоким уровнем разнотерности. Размер зерен изменяется в пределах от 3 до 40 мкм. Мелкие зерна группируются в отдельные области. Следовательно, при данном режиме облучения в поверхностном слое титана реализуются условия, способствующие протеканию процесса динамической рекристаллизации [3-6]. За пределами центральной зоны образца наблюдается структура, характеризующаяся различной степенью легирования поверхностного слоя. Поверхность легирования сглаживается, однако присутствуют микротрещины и микрократеры.

После ЭПО изменяется и элементный состав поверхностного слоя. В центральной зоне фиксируется однородный твердый раствор циркония в титане, содержащий сравнительно небольшое количество углерода. На границе центральной зоны и на периферии зоны ЭПО области, обогащенные цирконием и углеродом, сохраняются.

Износостойкость титана, определяемая по изменению площади поперечного сечения канавки износа, после ЭПО максимальна при $E_s = 45$ Дж/см², $\tau = 100$ мкс, $N = 10$ имп. и в $\sim 1,3$ раза выше износостойкости титана в исходном состоянии. С увеличением E_s износостойкость облученных образцов снижается. При $E_s = 60$ Дж/см² износостойкость несколько повышается при увеличении длительности и количества импульсов воздействия пучка электронов. Выявлено, что износостойкость облученной поверхности титана после ЭВЛ и ЭПО увеличивается при снижении коэффициента трения в режимах ЭПО, когда E_s равна 45...60 Дж/см², $\tau = 100$ мкс, $N = 10$ имп.

Показано, что электровзрывное легирование технически чистого титана сопровождается формированием упроченного слоя с субмикроструктурной структурой и неоднородным распределением по поверхности легирующих элементов. Выявлены участки, обогащенные либо атомами циркония, либо атомами углерода. Определены режимы последующей электронно-пучковой обработки, выравнивающей рельеф и элементный состав поверхности легирования. Показано, что износостойкость легированного слоя титана после электронно-пучковой обработки увеличивается в 1,3 по сравнению с основой при снижении коэффициента трения.

Работа выполнена в рамках государственного задания (шифр темы 0809-2021-0013)

Библиографический список

1. Комаров Д.В., Коновалов С.В., Жуков Д.В. [и др.] Анализ современной ситуации в области применения электронно-пучковой обработки различных сплавов. Часть 2. Ползуновский вестник. 2022. № 3. С. 204-215.
2. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Рубанникова Ю.А. Повышение функциональных свойств сплавов электронно-пучковой обработкой. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 2. С. 129-134.
3. Телегин С.В., Лясникова А.В., Дударева О.А., Гришина И.П. [и др.] Лазерная модификация поверхности титана: технология, свойства, перспективы применения. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2019. № 3. С. 70-73.

4. Токмачева-Колобова А.Ю., Прокошкин С.Д., Одинцова Г.В. [и др.] Сравнительное исследование изменения структурно-фазового состояния титана и никелида титана при импульсном лазерном облучении. В книге: Физика конденсированных состояний. Тезисы II Международной конференции ФКС-2021, посвященной 90-летию со дня рождения академика Ю.А. Осипьяна (1931-2008). Черноголовка, 2021. 316 с.

5. Жевтун И.Г., Гордиенко П.С., Субботин Е.П. [и др.] Получение пористых материалов на основе титана с использованием лазерной обработки поверхности. Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15. № 10 (178). С. 456-460.

6. Токмачева-Колобова А.Ю. Исследование механизма наноструктурирования приповерхностных слоев титана при воздействии лазерными импульсами наносекундной длительности. Письма в Журнал технической физики. 2021. Т. 47. № 3. С. 40-43.

УДК 621.785.53; 539.25

ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЙ КОМПЛЕКСНЫЙ МНОГОЦИКЛОВЫЙ МЕТОД МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА

Ю.Ф. Иванов, В.В. Шугуров, Е.А. Петрикова, А.Д. Тересов, И.В. Лопатин

*Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук
г. Томск, Россия, e-mail: yufi55@mail.ru*

Аннотация. В результате выполненных исследований, целью которых являлось установление закономерностей эволюции структуры, механических и трибологических свойств стали 20X23H18, подвергнутой комплексной обработке, сочетающей напыление на поверхность образцов стали 20X23H18 тонкой (0,5 мкм) металлической пленки (Ti), облучение импульсным электронным пучком системы «пленка/подложка» и последующее азотирование в плазме газовом разряде низкого давления, выявление, по результатам исследования структуры и свойств, оптимальных режимов модифицирования стали, выявлен режим обработки, позволяющий многократно повысить твердость и износостойкость стали.

Ключевые слова: многоцикловый режим, импульсный электронный пучок, азотирование, высоколегированная сталь, плазма газового разряда низкого давления, структура, свойства.

Осуществлена многоцикловая (5 циклов) комплексная обработка стали 20X23H18, сочетающая в каждом цикле напыление на поверхность образцов тонкой (0,5 мкм) металлической пленки (Ti) и облучение импульсным электронным пучком системы «пленка/подложка» (18 кэВ, 30 Дж/см², 200 мкс, 0,3 с⁻¹, 3 имп.). Выполнено азотирование в плазме газовом разряде низкого давления стали (793 К, 1, 3, 5 час.), поверхностно легированной титаном. Формирование системы «пленка (Ti) / (сталь 20X23H18) подложка», облучение импульсным электронным пучком и последующее азотирование проводилось в едином вакуумном пространстве на установке «КОМПЛЕКС».

Методами микрорентгеноспектрального анализа установлено, что при многоцикловом легировании облучение системы «пленка (Ti, 0,5 мкм)/(сталь 20X23H18) подложка» импульсным электронным пучком приводит к формированию поверхностного сплава, концентрация металлических элементов которого (ат. %): 30,4Ti-18,2Cr-32,7Fe-18,7Ni.

Методами рентгенофазового анализа выявлено, что в поверхностном слое стали в результате облучения системы «пленка/подложка» формируется многофазная структура, представленная α -фазой (твердый раствор на основе ОЦК кристаллической решетки железа, 13,9 масс. %), γ -фазой (твердый раствор на основе ГЦК кристаллической решетки железа, 31,2 масс. %), TiFe₂ (38,2 масс. %), NiTi (16,7 масс. %).

Микротвердость стали после 5-ти цикловой обработки HV = 5,3 ГПа, что выше твердости исходной стали в 2,3 раза и твердости исходной стали, облученной импульсным электронным пучком в указанном выше режиме, в 2,2 раза. Параметр износа k (величина, обратная