

УДК 536.42:539.25:538.331

**МОДИФИКАЦИЯ ДИФфуЗИОННЫХ БОР-
И АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩИХ СЛОЕВ
ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ****Н.С. Улаханов¹, П.В. Москвин^{2,1}, У.Л. Мишигдоржийн¹,
А.П. Семенов¹, Н.Н. Коваль², М.С. Воробьев²**¹*Институт физического материаловедения СО РАН*²*Институт сильноточной электроники СО РАН*

В статье представлены результаты электронно-пучковой обработки диффузионных слоев на основе бора и алюминия на примере стали 20, на базе модернизированного источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления. Введенный контур обратной связи по ионному току в ускоряющем промежутке плазменного источника электронов позволяет повысить управляемость генерации пучка и электрическую прочность ускоряющего промежутка и тем самым обеспечить обработку поверхности образцов стали до заданной температуры. Для обеспечения стабильности процесса электронно-пучковой обработки предлагается предварительный прогрев поверхности до температуры 400–700 °С импульсами воздействия с контролируемым током разряда. На основном этапе электронно-пучковой обработки температура поверхности диффузионных составляет ~1900 °С. Для обеспечения данного диапазона температуры ток разряда регулируется в пределах 20–150 А в течение импульса длительностью 950 мкс, количество импульсов – три (интервал между импульсами 3 с). Обработка электронным пучком при данных режимах приводит к структурной трансформации диффузионного слоя на глубину более 150 мкм и к существенному повышению значений микротвердости. Отработанный режим электронно-пучковой обработки может быть рекомендован как дополнительный метод в технологиях комбинированной модификации диффузионных слоев на основе бора и алюминия.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, бороалитирование, импульсная электронно-пучковая обработка, микротвердость, источник электронов, плазменный катод, регулировка мощности электронного пучка.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-62-75

Введение

Развитие технологий, направленных на повышение эксплуатационных свойств поверхности деталей машин и инструмента, предпочтительно в комбинировании различных подходов модификации поверхности методами термической, химико-термической, электрохимической и электронно-пучковой обработки, ультразвукового деформирования, плазменного и лазерного воздействия.

Повышенный интерес представляет обработка импульсным электронным пучком поверхности стали, модифицированной диффузионными слоями, с применением источника электронов с сеточным плазменным катодом на основе дуги низкого давления, обеспечивающим управление плотностью мощности импульсного пучка электронов диаметром ~30 мм в диапазоне от десятков до сотен кВт/см² непосредственно в течение импульса миллисекундной и субмиллисекундной длительности. Плазменные источники электронов обладают малой инерционностью

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-79-10163-П).

© 2024 Улаханов Н.С., Москвин П.В., Мишигдоржийн У.Л., Семенов А.П.,
Коваль Н.Н., Воробьев М.С.

и устойчиво работают в условиях газовой выделения и испарения с обрабатываемой поверхности.

Уникальное оборудование на основе плазменных источников электронов разработано в Институте сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН), в лаборатории плазменной эмиссионной электроники [1–4]. Перспективность применения таких источников неоднократно продемонстрирована для модификации поверхности, в частности титановых сплавов [5–8] и инструментальных сталей [9–13], свойства которых в ряде случаев улучшаются кратно, подтверждая перспективность развития технологии электронно-пучковой обработки.

Цель данной работы – отработка режимов электронно-пучковой обработки диффузионных слоев на основе бора и алюминия на примере стали 20.

1. Методика эксперимента

Электронно-пучковую обработку (ЭПО) проводили на образцах из стали 20 после химико-термической обработки (ХТО), проведенной в насыщающей пасте следующего состава: 80 % B_4C + 16 % Al + 4 % NaF (вес) [14] при температуре 1050 °С в течение двух часов. В работе [14] описаны свойства диффузионных слоев, получаемых на поверхности углеродистых и штамповых сталей. Несмотря на преимущества диффузионных слоев на основе бора и алюминия, полученных ХТО, данный тип покрытий имеет ряд серьезных недостатков, таких как высокая хрупкость, недостаточное качество морфологии поверхности, зачастую нуждающееся в последующей механической обработке, малая толщина модифицированного слоя. В связи с чем прогнозируется перспективность комбинирования диффузионного бороалитирования с последующим высокоэнергетическим воздействием на диффузионный слой ускоренным пучком электронов.

Электронно-пучковую обработку диффузионного слоя проводили в экспериментальной установке «СОЛЮ» (рис. 1, а) на базе источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления [15]. Особенностью плазменных источников электронов с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы является возможность независимо и в широких пределах изменять ток пучка, его длительность и энергию электронов. Ток пучка определяется током разряда плазменного катода и вторичными процессами на эмиттерном электроде [16]. В нашем случае около половины тока разряда I_d извлекается через ячейки сетки в укоряющий промежуток, где в зазоре между катодной 1 и анодной плазмой 5 электроны приобретают энергию, соответствующую ускоряющему напряжению U_g (рис. 1, б).

Эмиссионная сетка 2 и периферийная часть эмиттерного электрода 3 источника подвержены бомбардировке ускоренными ионами, поступающими с границы анодной плазмы. Коэффициент вторичной эмиссии в течение импульса тока пучка не изменяется. Концентрация анодной плазмы и как следствие, величина ионного тока и тока вторичных электронов не постоянны. Изменения в основном вызваны десорбцией газа, испарением насыщающего состава с поверхности металлического образца в результате термического воздействия пучка электронов. Таким образом, доля вторичных электронов в токе пучка находилась в зависимости от плотности мощности пучка, времени воздействия и состояния обрабатываемой поверхности. Установка «СОЛЮ» входит в комплекс уникальных электрофизических установок России «УНИКУУМ» [17] и дооснащена специализированным блоком питания, который позволяет изменять ток разряда плазменного катода в течение импульса субмилли- и миллисекундной длительности [18,19].

Изменяя ток разряда, регулировали плотность мощности термического воздействия при ЭПО. Дуговой разряд позволяет изменять ток малоинерционно, ско-

рость его изменения была ограничена системами электропитания на уровне ~ 20 А/мкс (фронт импульса) и ~ 100 А/мкс (срез импульса). Однако ионизованные пары материала образцов распространялись к эмиттерному электроду со скоростью до $(10^5\text{--}10^6)$ см/с и затрудняли управление током пучка. Тем не менее в таких условиях удалось подобрать форму тока разряда $I_d(t)$, при которой ток в ускоряющем промежутке $I_g(t)$ в разные моменты будет содержать разное количество ионного тока и тока вторичных электронов, но при этом сгенерируется необходимая для поддержания постоянной температуры поверхности образца плотность мощности.

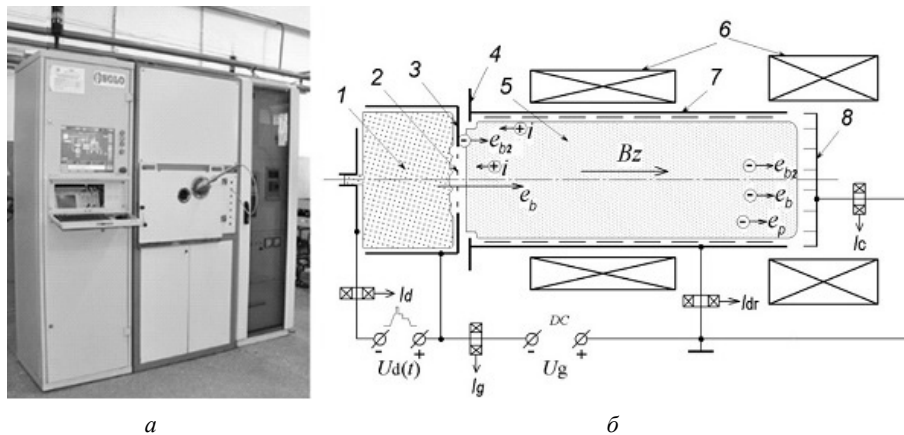


Рис. 1 – Установка «СОЛО» [17]: а – внешний вид; б – схема источника электронов:

1 – катодная плазма; 2 – стабилизирующая сетка; 3 – эмиттерный электрод; 4 – ускоряющий электрод; 5 – анодная плазма; 6 – соленоиды; 7 – труба дрейфа; 8 – калориметр

Fig. 1 – SOLO installation [17]: a is its appearance; b is a diagram of the electron source:

1 – is cathode plasma; 2 – is a stabilizing grid; 3 – is an emitter electrode; 4 – is an accelerating electrode; 5 – is anode plasma; 6 – is solenoids; 7 – is a drift pipe; 8 – is a calorimeter

Исследования по управлению температурой поверхности металлического образца после ХТО при ее облучении модулированным электронным пучком выполняли в среде аргона при давлении в вакуумной камере 25 мПа в ведущем магнитном поле величиной до 100 мТл. Энергия электронов в процессе обработки достигала 25 кэВ, диаметр пучка электронов составлял ~ 3 см.

Температуру поверхности образцов при ЭПО измеряли яркостным инфракрасным пирометром Kleiber KGA 740-LO с временем отклика 6 мкс. Коэффициент излучения поверхности определяли на контрольном образце до и после облучения. Для этого теплоизолированный образец объемно нагревали пучком электронов до температуры 500–600 °С, сравнивали показания пирометра и термопары К типа. Коэффициент излучения ϵ составил $\sim 0,7$.

Для измерения распределения плотности энергии электронного пучка по сечению у поверхности образца использовался секционированный калориметр (рис. 2), состоящий из девяти линейно расположенных датчиков, соединенных с терморезисторами и системой автоматического считывания их показаний непосредственно после импульса электронного воздействия.

Управляемое изменение температуры и повторяемость результата обеспечили тремя подходами.

1. Десорбция газа с поверхности образца перед ЭПО. На этом этапе электронно-пучковой обработки воздействие на образец оказывал пучок с «щающимися»

параметрами ($T \approx 700^\circ\text{C}$), не приводящими к модификации материала и существенному (рис. 3), нагреву поверхности в течение 10–15 импульсов. Затем перед основным этапом ЭПО происходило остывание образцов в среде аргона. Такой подход позволил уменьшить газовыделение с поверхности при первом «рабочем» импульсе и контролировать начальную температуру образцов. Осциллограмма предварительного прогрева образцов представлена на рис. 3.

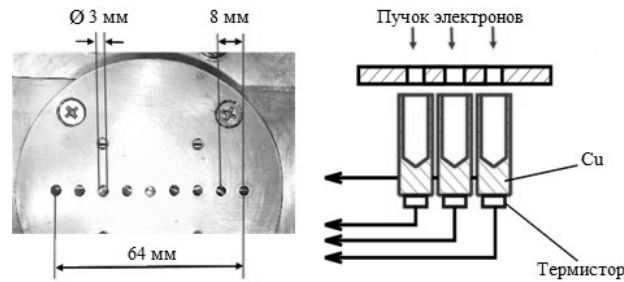


Рис. 2 – Калориметр

Fig. 2 – Calorimeter

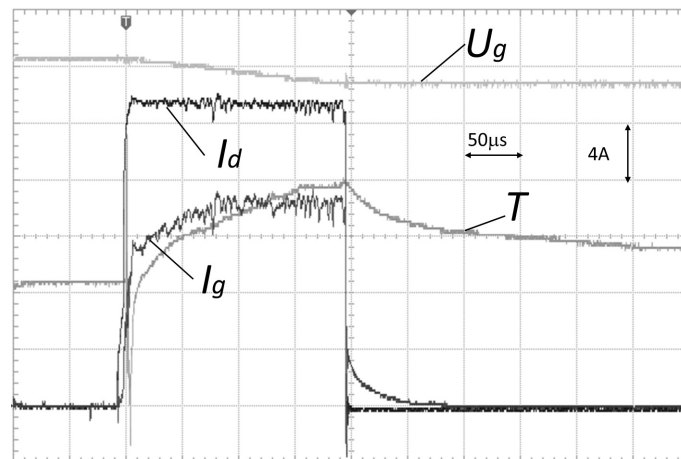


Рис. 3 – Осциллограмма предварительного прогрева образцов:

1 – I_d , 4 А/деление; 2 – I_g , 4 А/деление; 3 – $T [^\circ\text{C}] = 300 + 100 \times N_{\text{кл}}$;
масштаб U_g – 1 кВ/деление, развертка – 50 мкс/деление

Fig. 3 – Oscillogram of sample preheating:

1 – is I_d , 4 A/division; 2 – is I_g , 4 A/division; 3 – is $T [^\circ\text{C}] = 300 + 100 \times N_{\text{cells}}$;
 U_g scale is 1 kV/division, sweep is 50 μs /division

2. Искусственно увеличили фронт температуры в ходе основного этапа ЭПО до 200 мкс. Такой подход позволил уменьшить вероятность электрического пробоя ускоряющего промежутка.

3. Необходимую зависимость тока разряда от времени для поддержания температуры в заданных пределах подбирали заранее на тестовом образце. Требуется упреждающее уменьшение плотности мощности пучка для предотвращения переупреждения на 250-й микросекунде импульса. Хорошая повторяемость режимов воздействия от импульса к импульсу после предварительного нагрева позволила применять подобранный режим для обработки однотипных образцов без каких-либо изменений.

Ток разряда изменяли в течение импульса длительностью 1 мс, в пределах 40–90 А таким образом, чтобы температура на поверхности образца через 200 мкс после начала воздействия удерживалась около 1700–1900 °С. Данная температура выбрана экспериментальным путем из диапазона 1300–2200 °С, при которой облучаемая поверхность диффузионного слоя подвергается переплаву без дефектов (кратерообразование, высокая шероховатость и др.). Исследуемую область образцов подвергали трем финишным импульсам воздействия (общее число импульсов – 12), интервал времени между импульсами составлял 3 с. Осциллограмма обработки образцов представлена на рис. 4.

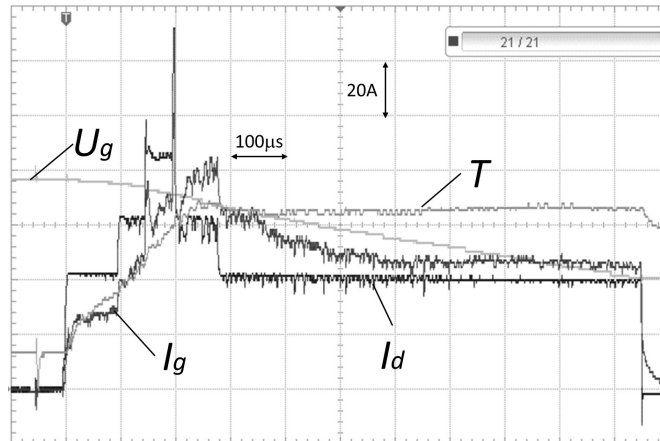


Рис. 4 – Осциллограмма обработки образцов:

I_d , 20 А/деление, I_g , 20 А/деление, $T [^{\circ}\text{C}] = 333 + 410 \times N_{\text{кл}}$; масштаб U_g – 5 кВ/деление, развертка – 100 мкс/деление

Fig. 4 – Sample processing oscillogram:

I_d , 20 A/division, I_g , 20 A/division, $T [^{\circ}\text{C}] = 333 + 410 \times N_{\text{cells}}$, U_g scale is 5 kV/division, sweep is 100 μs /division

После завершения импульса тока разряда в течение 100–200 мкс может наблюдаться спадающий ток в ускоряющем промежутке, обусловленный эмиссией ионов из распадающейся анодной плазмы и соответствующим током вторичных электронов. Остывание поверхности от 1900 до 300 °С происходит более 500 мкс.

Распределение плотности вводимой энергии в образцы при данных параметрах тока пучка и ускоряющего напряжения для обеспечения на облучаемой поверхности температуры 1900 °С показано на рис. 5 и составляет около 50 Дж/см² в центральной области.

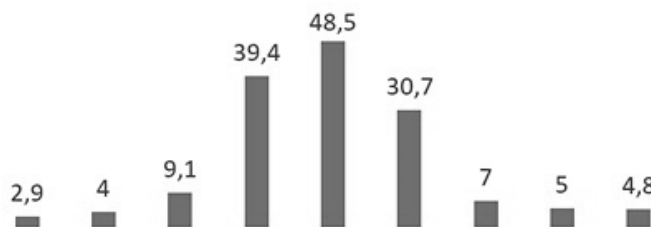


Рис. 5 – Гистограмма распределения плотности энергии по сечению электронного пучка

Fig. 5 – Histogram of energy density distribution over an electron beam cross section

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 6 представлен общий вид образцов в рабочей камере установки «СОЛО» после ЭПО диффузионного слоя.

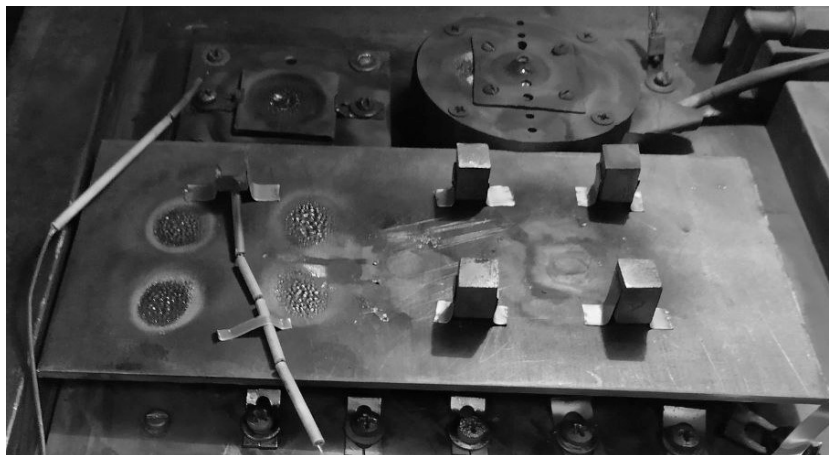


Рис. 6 – Образцы после ЭПО

Fig. 6 – Samples after EBP

Воздействие на поверхность диффузионного слоя (рис. 7) высокой плотности энергии до $0,5 \text{ МВт/см}^2$ вызывает высокоскоростное плавление поверхностного слоя и кристаллизацию после прекращения воздействия за счет теплопроводности вглубь слоя.

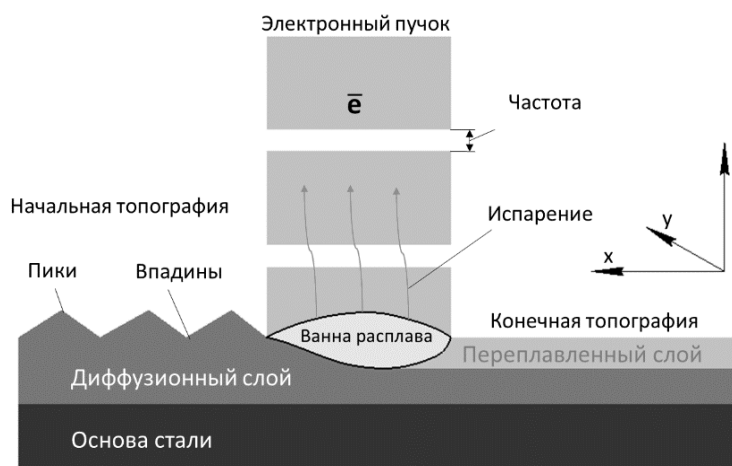


Рис. 7 – Схема импульсной электронно-лучевой обработки диффузионного слоя

Fig. 7 – Scheme of pulsed electron beam diffusion layer processing

Глубина диффузионного слоя после ХТО составляет $\sim 620 \text{ мкм}$ (рис. 8). Подробно свойства таких слоев рассмотрены в работах [20, 21]. Видно, что поверхность диффузионного слоя имеет пористую структуру, топография поверхности имеет нерегулярный профиль с высокими параметрами шероховатости (рис. 9).

ЭПО приводит к переплаву поверхности диффузионного слоя на глубину приблизительно до 170 мкм. Характерной особенностью переплавленного слоя является измельченная структура ячеистой формы. Действие электронного пучка составляет несколько микросекунд, что оказывает тепловое воздействие на небольшую глубину.

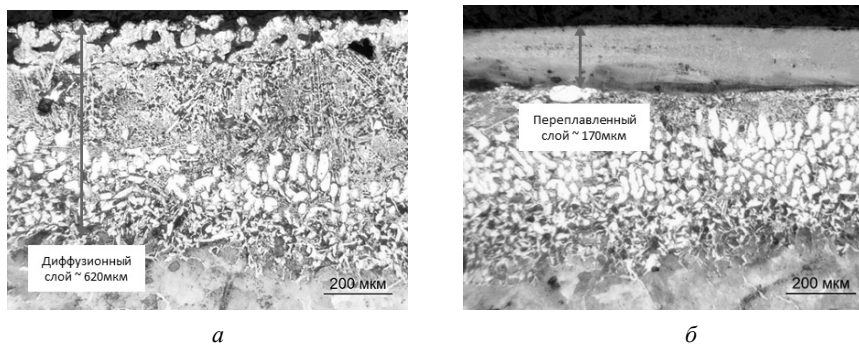


Рис. 8 – Микроструктура слоя:

a – после ХТО; *б* – после ЭПО

Fig. 8 – Layer microstructure:

a – is after TCT; *б* – is after EBP

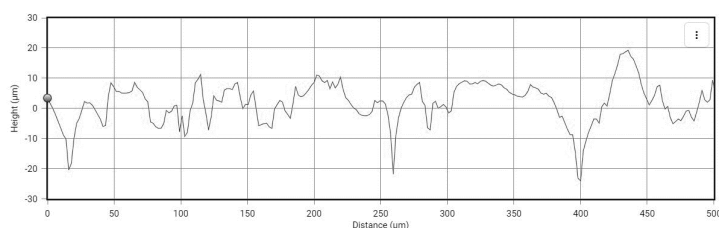


Рис. 9 – Топография поверхности стали после ХТО

Fig. 9 – Topography of the steel surface after TCT

Так, после ХТО значение R_a составляет 3,398 мкм, максимальное значение выступов R_{max} составляет 29,33 мкм. ЭПО диффузионного слоя сопровождается плавлением и испарением высот микронеровностей. Процесс сопровождается движением расплава под действием сил поверхностного натяжения и заполнением пор. Шероховатость снижется до $R_a = 0,110$ мкм, максимальное значение R_{max} не превышает 0,613 мкм (рис. 10, таблица). Топография поверхности после ЭПО имеет более однородную структуру с регулярным профилем.

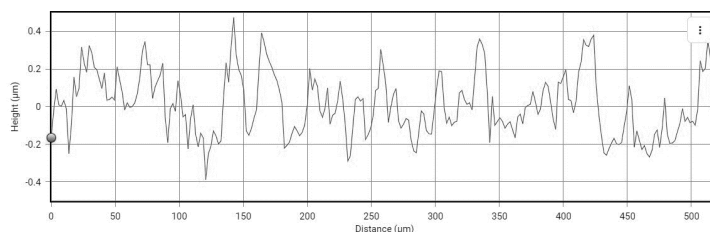


Рис. 10 – Топография поверхности стали после ЭПО

Fig. 10 – Topography of steel surface after EBP

Параметры шероховатости поверхностей опытных образцов
Surface roughness parameters of prototypes

ХТО / ТСТ			ЭПО / ЕВР		
Ra , мкм, μm	Rz , мкм, μm	R_{max} , мкм, μm	Ra , мкм, μm	Rz , мкм, μm	R_{max} , мкм, μm
3,398	20,05	29,33	0,110	0,586	0,613

Измерение микротвердости показало (рис. 11), что ЭПО приводит к увеличению микротвердости на поверхности в зоне переплава. Так, максимальное значение микротвердости после ХТО составляет 620 HV на поверхности, после ЭПО твердость повышается приблизительно до 940 HV на всей глубине модифицированного диффузионного слоя.

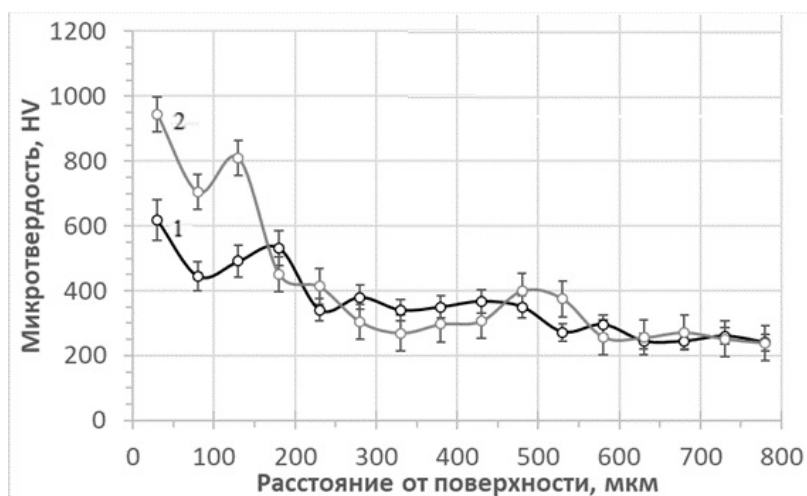


Рис. 11 – Распределение микротвердости по глубине слоя:
1 – химико-термическая обработка; 2 – электронно-пучковая обработка

Fig. 11 – Microhardness distribution over the layer depth:
1 is chemical-thermal treatment; 2 is electron beam treatment

Заключение

Диффузионный слой после химико-термической обработки имеет склонность к образованию паров металла в результате высокотемпературного испарения, повышающих риск электрического пробоя высоковольтного ускоряющего промежутка в плазменном источнике электронов. Однако введенный контур обратной связи по ионному току в ускоряющем промежутке в модернизированном источнике позволяет повысить управляемость генерации пучка и электрическую прочность ускоряющего промежутка и тем самым обеспечить обработку поверхности образцов до заданной температуры. Для обеспечения стабильности процесса электронно-пучковой обработки предлагается предварительный прогрев поверхности до температуры $\sim 700^\circ\text{C}$ импульсами воздействия с контролируемым током. Обработка электронным пучком диффузионного слоя приводит к его структурной трансформации и к существенному повышению значений микротвердости. Отработанный режим электронно-пучковой обработки, заключающийся в удержании на поверхности диффузионного слоя температуры $\sim 1900^\circ\text{C}$ может быть рекомендован как способ комбинированной модификации, приводящий к улучшению

эксплуатационных свойств (снижение шероховатости поверхности, увеличение микротвердости, износостойкости) за счет структурно-фазовой трансформации. В дальнейшем планируется исследовать перечисленные свойства с применением тонких методов исследования поверхности для объяснения механизмов структурно-фазовой трансформации диффузионных слоев в результате электронно-пучкового воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Generation and propagation of high-current low-energy electron beams / V.N. Devyatkov, N.N. Koval, P.M. Schanin, V.P. Grigoryev, T.V. Koval // *Laser and Particle Beams*. – 2003. – Vol. 21 (2). – P. 243–248. – DOI: 10.1017/S026303460321212X.
2. Электронно-пучковая установка «СОЛЮ-М» для модификации поверхности металлических и металлокерамических материалов // С.В. Григорьев, В.Н. Девятков, А.В. Мишков, П.В. Москвин, А.Д. Тересов // *Известия вузов. Физика*. – 2014. – Т. 57, № 11-3. – С. 58–62.
3. Equipment and processes of vacuum electron-ion plasma surface engineering / V.N. Devyatkov, Yu.F. Ivanov, O.V. Krysina, N.N. Koval, E.A. Petrikova, V.V. Shugurov // *Vacuum*. – 2017. – Vol. 143. – P. 464–472. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.04.016.
4. Широтная и амплитудная модуляция тока пучка для управления его мощностью в течение импульса субмиллисекундной длительности / В.И. Шин, М.С. Воробьев, П.В. Москвин, В.Н. Девятков, В.В. Яковлев, Н.Н. Коваль, М.С. Торба, Р.А. Картавцов, С.А. Воробьев // *Известия вузов. Физика*. – 2022. – Т. 65, № 11. – С. 176–184. – DOI: 10.17223/00213411/65/11/176.
5. Структура, фазовый состав и свойства титана после комплексных упрочняющих технологий / под ред. В.Е. Громова, Ю.Ф. Иванова. – Новокузнецк: СибГИУ, 2015. – 306 с. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения). – ISBN 978-5-7806-0428-0.
6. Модификация поверхности технически чистого титана BT1-0 после различных видов обработки / А.В. Ионина, Е.А. Будовских, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, И.А. Панченко, В.Е. Громов // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 21–31. – DOI: 10.21869/2223-1528-2023-13-1-21-31.
7. Влияние электронно-пучковой обработки на структуру технически чистого титана, подвергнутого усталостному разрушению / С.В. Коновалов, И.А. Комиссарова, А.М. Глезер, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, С. Чэнь // *Деформация и разрушение материалов*. – 2019. – № 9. – С. 42–48. – DOI: 10.31044/1814-4632-2019-9-42-48.
8. Формирование и эволюция структуры и фазового состава титана BT1-0 при электронно-пучковой обработке, токовом импульсном воздействии и многоциклового усталости / И.А. Комиссарова, С.В. Коновалов, Д.А. Косинов, А.В. Феоктистов, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов // *Антология прочности и пластичности металлов и сплавов при внешних энергетических воздействиях* / под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: СибГИУ, 2018. – С. 62–81.
9. Структура и свойства твердых тел, подвергнутых высокоинтенсивному воздействию (к 65-летию профессора Ю.Ф. Иванова) / под общ. ред. Н.Н. Ковалья и В.Е. Громова. – Новокузнецк: Полиграфист, 2020. – 337 с. – ISBN 978-5-91797-285-5.
10. Усталостная долговечность стали мартенситного класса, модифицированной высокоинтенсивными электронными пучками / Ю.Ф. Иванов, Д.А. Бессонов, С.В. Воробьев, В.Е. Громов, С.В. Коновалов, Н.Н. Коваль. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2011. – 259 с. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения). – ISBN 978-5-905647-01-7.
11. Усталость сталей, модифицированных высокоинтенсивными электронными пучками / В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, С.В. Воробьев, С.В. Горбунов, Д.А. Бессонов, В.В. Сизов, С.В. Коновалов. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2012. – 403 с. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения). – ISBN 978-5-905647-02-4.
12. Повышение усталостной выносливости рельсовой стали электронно-пучковой обработкой / К.В. Волков, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, В.А. Гришунин. – Новокузнецк:

- Интер-Кузбасс, 2013. – 225 с. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения). – ISBN 978-5-905647-06-2.
13. Fatigue of steels modified by high intensity electron beams / V.E. Gromov, Y.F. Ivanov, S.V. Vorobiev, S.V. Kononov. – Cambridge: Cambridge International Science Publ., 2015. – 272 p. – ISBN 978-1-907343-53-7.
 14. Модификация поверхностного слоя штамповых сталей созданием В-Al-слоев химико-термической обработкой / Н.С. Улаханов, У.Л. Мишигдоржийн, А.Г. Тихонов, А.И. Шустов, А.С. Пятых // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 17, № 12 (204). – С. 557–564. – DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-12-557-564.
 15. Koval N.N., Devyatkov V.N., Vorobyev M.S. Electron sources with plasma grid emitters: progress and prospects // Russian Physics Journal. – 2021. – Vol. 63 (10). – P. 1651–1660. – DOI: 10.1007/s11182-021-02219-3.
 16. Effect of intensified emission during the generation of a submillisecond low-energy electron beam in a plasma-cathode diode / N.N. Koval, S.V. Grigoryev, V.N. Devyatkov, A.D. Teresov, P.M. Schanin // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2009. – Vol. 37 (10). – P. 1890–1896. – DOI: 10.1109/TPS.2009.2023412.
 17. Комплекс уникальных электрофизических установок для эффективной электронно-ионно-плазменной модификации поверхности материалов и изделий «УНИКУУМ» // Портал НТИРФ: сайт. – URL: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/434216/> (дата обращения: 06.03.2024).
 18. Negative current feedback in the accelerating gap in electron sources with a plasma cathode / M.S. Vorobyov, P.V. Moskvina, V.I. Shin, T.V. Koval, V.N. Devyatkov, S.Y. Doroshkevich, N.N. Koval, M.S. Torba, K.T. Ashurova // Technical Physics. – 2022. – Vol. 67 (6). – P. 747–752. – DOI: 10.21883/TP.2022.06.54422.14-22.
 19. Патент № 2746265 С1 Российская Федерация, МПК H05H 15/00, H01J 37/00, H01J 37/06. Способ генерации электронного пучка для электронно-пучковой обработки поверхности металлических материалов: № 2020137779: заявл. 18.11.2020; опубл. 12.04.2021 / М.С. Воробьев, Т.В. Коваль, Н.Н. Коваль [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук.
 20. Microstructure and wear behavior of tungsten hot-work steel after boriding and boroaluminizing / U. Mishigdorzhiiyn, Y. Chen, N. Ulakhanov, H. Liang // Lubricants. – 2020. – Vol. 8 (3). – DOI: 10.3390/lubricants8030026.
 21. Mishigdorzhiiyn U., Sizov I. The influence of boroaluminizing temperature on microstructure and wear resistance in low-carbon steels // Materials Performance and Characterization. – 2018. – Vol. 7 (3). – P. 252–265. – DOI: 10.1520/MPC20170074.

MODIFICATION OF DIFFUSION BORON AND ALUMINUM CONTAINING LAYERS BY ELECTRON BEAM PROCESSING

Ulakhanov N.S.¹, Moskvina P.V.^{2,1}, Mishigdorzhiiyn U.L.¹,
Semenov A.P.¹, Koval N.N.², Vorobyov M.S.²

¹*Institute of Physical Materials Science SB RAS*

²*Institute of High Current Electronics SB RAS*

The article presents testing results of electron beam processing (EBP) modes applied on the diffusion layers based on boron and aluminum produced on the surface of steel 20. An ion current feedback loop in the accelerating gap in a modernized plasma electron source allows increasing the beam generation control and the electrical strength of the accelerating gap. This ensures sample surface processing at a specified temperature. In order to ensure the EBP process stability, it is proposed to preheat the surface to a temperature range of 400-700°C by pulses with a controlled current. Further modification of the diffusion layers is conducted on the surface at a temperature of around 1900°C. Ensuring this temperature range demands the discharge current within the range of 20 - 150 A during a single pulse with a duration of 950 μs. The total number of pulses is three and the interval between them is 3 seconds. These processing modes lead to a structural

transformation of the diffusion layer to a depth of more than 150 μm and to a significant microhardness increase. The approved EBP modes can be recommended as a promising alternate approach of the combined modification technologies of diffusion layers based on boron and aluminum.

Keywords: thermal-chemical treatment, boroaluminizing, pulsed electron beam processing, microhardness, electron source, plasma cathode, electron beam power adjustment.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-62-75

REFERENCES

1. Devyatkov V.N., Koval N.N., Schanin P.M., Grigoryev V.P., Koval T.V. Generation and propagation of high-current low-energy electron beams. *Laser and Particle Beams*, 2003, vol. 21 (2), pp. 243–248. DOI: 10.1017/S026303460321212X.
2. Grigoriev S.V., Devyatkov V.N., Mikov A.V., Moskvin P.V., Teresov A.D. Elektronno-puchkovaya ustanovka «SOLO-M» dlya modifikatsii poverkhnosti metallicheskih i metal-lokeramicheskikh materialov [E-beam installation "SOLO-M" for surface modification metallic and cermet materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika = Russian Physics Journal*, 2014, vol. 57, no. 11-3, pp. 58–62.
3. Devyatkov V.N., Ivanov Yu.F., Krysin O.V., Koval N.N., Petrikova E.A., Shugurov V.V. Equipment and processes of vacuum electron-ion plasma surface engineering. *Vacuum*, 2017, vol. 143, pp. 464–472. DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.04.016.
4. Shin V.I., Vorob'ev M.S., Moskvin P.V., Devyatkov V.N., Yakovlev V.V., Koval' N.N., Torba M.S., Kartavtsov R.A., Vorob'ev S.A. Shirot'naya i amplitudnaya modulyatsiya toka puchka dlya upravleniya ego moshchnost'yu v techenie impul'sa submillisekundnoi dlitel'nosti [Latitude and amplitude modulation of the beam current for controlling its power during a submillisecond pulse]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika = Russian Physics Journal*, 2022, vol. 65, no. 11, pp. 176–184. DOI: 10.17223/00213411/65/11/176.
5. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., eds. *Struktura, fazovyi sostav i svoystva titana posle kompleksnykh uprochnyayushchikh tekhnologii* [Structure, phase composition and properties of titanium after complex hardening technologies]. Novokuznetsk, SibSIU Publ., 2015. 306 p. ISBN 978-5-7806-0428-0.
6. Ionina A.V., Budovskikh E.A., Konovalov S.V., Ivanov Y.F., Panchenko I.A., Gromov V.E. Modifikatsiya poverkhnosti tekhnicheskii chistogo titana VT1-0 posle razlichnykh vidov obrabotki [Modification of the surface of technically pure titanium VT1-0 after various types of processing]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2023, vol. 13 (1), pp. 21–31. DOI: 10.21869/2223-1528-2023-13-1-21-31.
7. Konovalov S.V., Chen X., Gromov V.E., Komissarova I.A., Gleser A.M., Ivanov Y.F. Vliyanie elektronno-puchkovoi obrabotki na strukturu tekhnicheskii chistogo titana, podvergnutogo ustalostnomu razrusheniyu [Effect of electron-beam treatment on the structure of commercial-purity titanium subjected to fatigue failure]. *Deformatsiya i razrushenie materialov = Russian Metallurgy (Metally)*, 2019, no. 9, pp. 42–48. DOI: 10.31044/1814-4632-2019-9-42-48. (In Russian).
8. Komissarova I.A., Konovalov S.V., Kosinov D.A., Feoktistov A.V., Ivanov Y.F., Gromov V.E. Formirovanie i evolyutsiya struktury i fazovogo sostava titana VT1-0 pri elektronno-puchkovoi obrabotke, tokovom impul'snom vozdeistvii i mnogotsiklovoi ustalosti [Formation and evolution of the structure and phase composition of titanium VT1-0 during electron beam processing, current pulse exposure and high-cycle fatigue]. *Antologiya prochnosti i plastichnosti metallov i splavov pri vneshnikh energeticheskikh vozdeistviyakh* [Anthology of strength and ductility of metals and alloys under external energy influences]. Novokuznetsk, SibSIU Publ., 2018, pp. 62–81.
9. Koval N.N., Gromov V.E., eds. *Struktura i svoystva tverdykh tel, podvergnutykh vysokointensivnomu vozdeistviyu (k 65-letiyu professora Yu.F. Ivanova)* [Structure and properties of solids subjected to highly intense impact (to the 65th anniversary of Professor Yu.F. Ivanov)]. Novokuznetsk, Polygraphist Publ., 2020. 337 p. ISBN 978-5-91797-285-5.
10. Ivanov Y.F., Bessonov D.A., Vorob'ev S.V., Gromov V.E., Konovalov S.V., Koval N.N. *Ustalostnaya dolgovechnost' stali martensitnogo klassa, modifitsirovannoi vysokointensivnymi elektronnyimi puchkami* [Fatigue durability of martensitic steel modified with high-intensity electron beams]. Novokuznetsk, Inter-Kuzbass Publ., 2011. 259 p. ISBN 978-5-905647-01-7.

11. Gromov V.E., Ivanov Y.F., Vorob'ev S.V., Gorbunov S.V., Bessonov D.A., Sizov V.V., Konovalov S.V. *Uсталост' stalei, modifitsirovannykh vysokointensivnymi elektronnyimi puchkami* [Fatigue of steels modified with high-intensity electron beams]. / V. E. Gromov, Yu. F. Ivanov, S. V. Vorobyov [etc.]. Novokuznetsk, Inter-Kuzbass Publ., 2012. 403 p. ISBN 978-5-905647-02-4.
12. Volkov K.V., Gromov V.E., Ivanov Y.F., Grishunin V.A. *Povyshenie ustalostnoi vyнослиvosti rel'sovoi stali elektronno-puchkovoі obrabotkoi* [Increasing the fatigue endurance of rail steel by electron beam processing]. Novokuznetsk, Inter-Kuzbass Publ., 2013. 225 p. ISBN 978-5-905647-06-2.
13. Gromov V.E., Ivanov Y.F., Borobiev S.V., Konovalov S.V. *Fatigue of steels modified by high intensity electron beams*. Cambridge, Cambridge International Science Publ., 2015. 272 p. ISBN 978-1-907343-53-7.
14. Ulahanov N.S., Mishigdorziyn U.L., Tihonov A.G., Shustov A.I., Pyatyih A.S. Modifikatsiya poverkhnostnogo sloya shtampovykh stalei sozdaniem B-Al-sloev khimiko-termicheskoi obrabotkoi [Surface modification of die steels with B–Al-layers by thermal-chemical treatment]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening technologies and coatings*, 2021, vol. 17, no. 12 (204), pp. 557–564. DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-12-557-564.
15. Koval N.N., Devyatkov V.N., Vorobyev M.S. Electron sources with plasma grid emitters: progress and prospects. *Russian Physics Journal*, 2021, vol. 63 (10), pp. 1651–1660. DOI: 10.1007/s11182-021-02219-3.
16. Koval N.N., Grigoryev S.V., Devyatkov V.N., Teresov A.D., Schanin P.M. Effect of intensified emission during the generation of a submillisecond low-energy electron beam in a plasma-cathode diode. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, vol. 37 (10), pp. 1890–1896. DOI: 10.1109/TPS.2009.2023412.
17. Kompleks unikal'nykh elektrofizicheskikh ustanovok dlya effektivnoi elektronno-ionno-plazmennoi modifikatsii poverkhnosti materialov i izdelii «UNIKUUM» [Complex of unique electrophysical installations for effective electron-ion-plasma modification of the surface of materials and products “UNICUUM”]. *NTIRF Portal*. (In Russian). Available at: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/434216/> (accessed 06.03.2024).
18. Vorobyov M.S., Moskvina P.V., Shin V.I., Koval T.V., Devyatkov V.N., Doroshkevich S.Y., Koval N.N., Torba M.S., Ashurova K.T. Negative current feedback in the accelerating gap in electron sources with a plasma cathode. *Technical Physics*, 2022, vol. 67 (6), pp. 747–752. DOI: 10.21883/TP.2022.06.54422.14-22.
19. Vorobev M.S., Koval T.V., Koval N.N., et al. *Sposob generatsii elektronnoy puchki dlya elektronno-puchkovoі obrabotki poverkhnosti metallicheskh materialov* [Electron beam generation method for electron beam treatment of metal materials surface]. Patent RF, no. 2746265 C1, 2021.
20. Mishigdorziyn U., Chen Y., Ulakhanov N., Liang H. Microstructure and wear behavior of tungsten hot-work steel after boriding and boronizing. *Lubricants*, 2020, vol. 8 (3). DOI: 10.3390/lubricants8030026.
21. Mishigdorziyn U., Sizov I. The influence of boronizing temperature on microstructure and wear resistance in low-carbon steels. *Materials Performance and Characterization*, 2018, vol. 7 (3), pp. 252–265. DOI: 10.1520/MPC20170074.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Улаханов Николай Сергеевич – родился в 1990 году, мл. науч. сотр. лаборатории физического материаловедения ИФМ СО РАН. Область научных интересов: технология машиностроения, упрочняющие технологии, химико-термическая обработка, обработка концентрированными потоками энергии. Опубликовано 55 научных работ. (Адрес: 670047, Россия, Бурятия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: nulahanov@mail.ru).

Ulakhanov Nikolay Sergeevich – (b. in 1990), junior researcher, at the laboratory of Physical Materials Science of the Institute of Physics and Mathematics SB RAS. His scientific interests include mechanical engineering technology, hardening technologies, chemical-thermal treatment, and treatment with concentrated energy flows. He has published 55 scientific papers. (Address: 6, Sakhyanova St., Ulan-Ude, 670047, Buryatia, Russia. E-mail: nulakhanov@mail.ru).



Москвин Павел Владимирович – родился в 1986 году, мл. науч. сотр. лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН. Область научных интересов: генерация и применение плазмы, пучков электронов. Опубликовано 74 научные работы. (634050, Россия, Томск, пр. Академический, 2/3. E-mail: pavelsmoskvin@mail.ru).

Moskvin Pavel Vladimirovich (b. 1986) – junior researcher at the plasma emission electronics laboratory of HCEI SB RAS. His research interests are currently focused on generation and application of plasma and electron beams. He is the author of 74 scientific papers. (Address: 2/3, Academicheskyy Av., Tomsk, 634050, Russia. E-mail: pavelsmoskvin@mail.ru).



Мишигдоржийн Ундрах Лхагвасуренович – родился в 1984 году, канд. техн. наук, зав. лабораторией физического материаловедения ИФМ СО РАН. Область научных интересов: металловедение, химико-термическая обработка; композиционные материалы; покрытия; диффузионные слои; термоциклическая обработка; бороалитирование; углеродистые стали; жаростойкость; износостойкость; металлография; термодинамика; электронно-лучевая обработка; лазерная обработка; электронная микроскопия. Опубликовано 91 научная работа. (Адрес: 670047, Россия, Бурятия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: druh@mail.ru).

Mishigdorzhiiyn Undrakh Lkhagvasurenovich – (b. in 1984), Candidate of Sciences (Eng.), Head of the Physical Materials Science Laboratory of the Institute of Physics and Mathematics SB RAS. His scientific interests cover metallurgy, thermal-chemical treatment; composite materials; coatings; diffusion layers; thermal cycling treatment; boroalitation; carbon steels; heat resistance; wear resistance; metallography; thermodynamics; electron beam processing; laser processing; and electron microscopy. He is the author of 91 scientific papers published. (Address: 6, Sakhyanova Street, Ulan-Ude, 670047, Buryatia, Russia. E-mail: druh@mail.ru).



Семенов Александр Петрович – родился в 1951 году, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории физического материаловедения ИФМ СО РАН. Область научных интересов: физика газовых разрядов, эмиссия и формирование пучков электронов и ионов из газоразрядной плазмы, физическое материаловедение, получение покрытий полифункционального назначения пучками заряженных частиц и газоразрядной плазмой. Опубликовано 497 научных работ. (Адрес: 670047, Россия, Бурятия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: alexandersemenov2018@mail.ru).

Semenov Alexander Petrovich – (b. in 1951), Doctor of Sciences (Eng.), professor, chief researcher at the Laboratory of Physical Materials Science at the Institute of Physics and Mathematics SB RAS. His scientific interests include physics of gas discharges, emission and formation of beams of electrons and ions from gas-discharge plasma, physical materials science, production of coatings for multifunctional purposes using beams of charged particles and gas-discharge plasma. He has 497 scientific papers published. (Address: 6, Sakhyanova Street, Ulan-Ude, 670047, Buryatia, Russia. E-mail: alexandersemenov2018@mail.ru).



Коваль Николай Николаевич – родился в 1948 году, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН. Область научных интересов: Физика вакуумного разряда, плазменная эмиссионная электроника, генерация низкотемпературной плазмы, электронные, ионные, плазменные источники, электронно-ионно-плазменная модификация поверхности, физика сильноточных электронных пучков, физика плазмы, физика поверхности, микро- и наноструктура, фазовый состав, эксплуатационные свойства. Опубликовано более 400 научных работ. (634050, Россия, Томск, пр. Академический, 2/3. E-mail: koval@opee.hcei.tsc.ru).

Koval Nikolai Nikolaevich – (b. in 1948), Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Chief Researcher of plasma emission electronics laboratory of HCEI SB RAS. Area of scientific interests: Vacuum discharge physics, plasma emission electronics, low-temperature plasma generation, electron, ion, plasma sources, electron-ion-plasma surface modification, physics of high-current electron beams, plasma physics, surface physics, micro- and nanostructure, phase composition, performance properties. More than 400 scientific papers have been published. (Address: 2/3, Akademicheskoy Av., Tomsk, 634050, Russia. E-mail: koval@opee.hcei.tsc.ru)



Воробьев Максим Сергеевич – родился в 1986 году, д-р техн. наук. ст. науч. сотр. лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН. Область научных интересов: генерация и применение плазмы, пучков электронов. Опубликовано более 100 научных работ. (Адрес: 634050, Россия, Томск, пр. Академический, 2/3. E-mail: vorobyovms@yandex.ru).

Vorobyov Maxim Sergeevich (b. in 1986). He received the M.S. degree from Tomsk Polytechnic University in 2009 and his Doctor of Sciences (Eng.), degree from the Institute of High Current Electronics, Tomsk, in 2022. Now he works as a senior researcher and supervisor of several scientific projects there. His research interests include arc discharge and other low pressure gaseous discharges, plasma-cathode electron sources and accelerators, and applications of electron beams. He is the author or coauthor of more than 40 papers in basic phenomena in low-pressure gaseous discharges and vacuum arc plasmas, charged particle emission from low temperature plasma, ion sources and plasma electron guns, and a range of plasma applications. (Address: 2/3, Akademicheskoy Av., Tomsk, 634050, Russia. E-mail: vorobyovms@yandex.ru).

*Статья поступила 15 января 2024 г.
Received January 15, 2024*

To Reference:

Ulakhanov N.S., Moskvina P.V., Mishigdorzhin U.L., Semenov A.P., Koval N.N., Vorobyov M.S. Modifikatsiya diffuzionnykh bor- i alyuminiy soderzhashchikh sloev elektron-no-puchkovoi obrabotkoi [Modification of diffusion boron and aluminum containing layers by electron beam processing]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 1 (62), pp. 62–75. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-62-75.