



Обработка металлов

(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Структура и свойства покрытий на основе тугоплавких элементов, полученных методом вакуумной электронно-лучевой наплавки

Евдокия Бушуева^{1, a, *}, Артем Наставшев^{1, b}, Ксения Скороход^{2, c},
 Евгений Домаров^{3, d}, Иван Мишин^{4, e}

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

² Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия

³ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, проспект Академика М.А. Лаврентьева, 11, г.Новосибирск, 630090, Россия

⁴ Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, пр. Академический, 2/4, г. Томск, 634055, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0001-7608-734X>, bushueva@corp.nstu.ru; ^b <https://orcid.org/0009-0002-1082-2086>, artem.nastavshev@yandex.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0003-0210-8405>, k.skorokhod@itam.nsc.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0003-2422-1513>, domarov88@mail.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0001-8294-7238>, mip@ispms.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.9

История статьи:

Поступила: 29 июля 2025

Рецензирование: 02 сентября 2025

Принята к печати: 15 ноября 2025

Доступно онлайн: 15 декабря 2025

Ключевые слова:

Структура

Электронно-лучевая наплавка

Жаростойкость

Твердость

Финансирование

Исследование выполнено в соответствии с государственным заданием Минобрнауки России (проект FSUN-2023-0009).

АННОТАЦИЯ

Введение. Для развития областей современной промышленности требуются материалы, способные работать в условиях высоких температур и нагрузок и при этом сохранять свою функциональность и работоспособность. Традиционные материалы, такие как конструкционная сталь 40Х, широко применяются в машиностроении и обладают низкой стоимостью. Однако обыкновенные и низколегированные стали подвергаются интенсивному окислению под воздействием температур выше 400 °C. Для повышения эксплуатационных характеристик конструкционных сталей в высокотемпературных условиях актуальной задачей является разработка эффективных методов модификации их поверхности. **Цель работы.** Разработка технологии создания жаростойких поверхностных слоев на конструкционной стали марки 40Х. Для этого применялся метод вакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых материалов на основе тугоплавких элементов: ниобия, молибдена и бора. **Методика исследования.** В рамках исследования проводилось формирование модифицированных слоев на сталь 40Х методом вакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых композиций системы Nb-Mo-B. Методами исследования являются оптическая микроскопия, растровая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, оценка микротвердости, испытание на высокотемпературное окисление и расчет кинетики реакции окисления. **Результаты и обсуждение.** Строение модифицированных слоев с толщиной 2,0...2,3 мм имеет градиентную структуру, состоящую из легированного молибденом карбида ниобия в виде дендритов и кристаллов неправильной формы, а также эвтектических колоний на основе этого же карбида и твердых растворов α-Fe и α-(Mo, Fe). Рентгенофазовый анализ позволил установить в модифицированных слоях фазы карбида (Nb, Mo)C и твердые растворы на основе α-Fe и α-(Mo, Fe). Наплавка Nb, Mo и В позволила сформировать на поверхности углеродистой стали 40Х слои, имеющие твердость выше в 2,9 раза и жаростойкость выше в 3,9 раза относительно неупрочненной стали.

Для цитирования: Структура и свойства покрытий на основе тугоплавких элементов, полученных методом вакуумной электронно-лучевой наплавки / Е.Г. Бушуева, А.Е. Наставшев, К.А. Скороход, Е.В. Домаров, И.П. Мишин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 325–338. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-325-338.

Введение

В таких областях промышленности, как энергетика, химическая промышленность, авиастроение и машиностроение, требуются из-

делия, способные работать под воздействием высоких нагрузок, высоких температур и агрессивных коррозионных сред. Для обеспечения указанных эксплуатационных характеристик детали производят из конструкционных материалов с повышенными прочностными и коррозионностойкими свойствами. Однако широкое применение таких материалов лимитируется их высокой себестоимостью. В качестве экономически целесообразных альтернатив рассматриваются

*Адрес для переписки

Бушуева Евдокия Геннадьевна, к.т.н., доцент

Новосибирский государственный технический университет
пр. К. Маркса, 20,
630073, г. Новосибирск, Россия

Тел.: +7 383 346-06-12, e-mail: bushueva@corp.nstu.ru

методы поверхностного модифицирования и нанесения защитных покрытий [1, 2]. К методам поверхностной обработки относятся плазменные, лазерные, электронно-лучевые и другие технологии [3, 4], которые позволяют сформировать защитные слои на поверхности деталей, изготовленных из недорогих и широко применяемых материалов. Используя эти способы, можно также восстановить поврежденную поверхность детали вместо того, чтобы ее заменять. Следовательно, появляется возможность снизить расходы на дорогостоящие материалы и сократить время ремонтных работ.

Перспективным направлением в материаловедении является создание покрытий на основе тугоплавких элементов (ниобий, молибден, ванадий, вольфрам и др.) [5–7], поскольку они в зависимости от химического состава и технологии получения способны обеспечить прочность при повышенных температурах, обладают высокими значениями твердости и износостойкости [8], а также повышают коррозионную стойкость при температурах выше 500 °C и нормальных условиях [9]. Последнее время предлагается применять соединения тугоплавких элементов с неметаллами, например бориды и карбиды [10–12]. В частности, в работах [11, 12] рассматривается перспектива использования соединений ниobia и молибдена с бором и углеродом [13–15]. Присутствие в структуре материала указанных соединений повышает жаростойкость, твердость и износостойкость покрытия [16]. Следует отметить, что ниобий, молибден и бор применяются в качестве легирующих компонентов по отдельности или иногда в сочетании только двух компонентов, например бор-ниобий [17–19]. Однако получение покрытий методом наплавки на конструкционную среднеуглеродистую сталь при одновременном легировании ниобием, молибденом и бором в литературе не рассматривалось.

Важным моментом является то, что создание покрытий на основе тугоплавких элементов требует высоких затрат энергии [20]. Использование пучка релятивистских электронов, выведенного в воздушную атмосферу за счёт высокого КПД, позволяет легко переплавлять порошковые смеси тугоплавких элементов и их соединений. Таким образом, возможно сформировать модифицированный слой толщиной до 3 мм на основе тугоплавких соединений, обладающий

комплексом свойств: износостойкостью, коррозионной стойкостью, жаростойкостью и высокой твердостью [21]. Покрытия, полученные по такой технологии, обладают высокой адгезией со сталью и низкой дефектностью. Часть энергии электронного пучка рассеивается в порошковом слое, вызывая его нагрев и плавление, а часть энергии идет на нагрев подложки. Особенность метода позволяет расплавлять даже тугоплавкие элементы и соединения, при этом оказывая минимальное термическое воздействие на подложку [22].

В настоящей работе впервые исследованы модифицированные слои на основе Nb, Mo и В, их микротвердость и стойкость к высокотемпературному окислению. Слои получены методом вакуумной электронно-лучевой наплавки порошков Nb-Mo-V при одновременном введении этих трех компонентов в ванну расплава.

Целью данного исследования являлась модификация поверхностных слоев конструкционной стали 40Х методом вакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых композиций, состоящих из ниобия, молибдена и бора, для формирования слоев с повышенным уровнем жаростойкости и твердости. Для достижения цели исследования решались следующие *задачи*:

- сформировать на заготовках из стали 40Х модифицированные слои, содержащие тугоплавкие элементы, такие как ниобий, молибден и бор;
- проанализировать структуру и фазовый состав модифицированных слоев;
- оценить уровень микротвердости полученных материалов;
- проанализировать жаростойкость слоев.

Методика исследований

В качестве модельного материала для формирования жаростойкого покрытия была выбрана конструкционная сталь марки 40Х [23]. Эта сталь широко применяется в создании изделий и механизмов, однако она не обладает стойкостью к окислению при высоких температурах. Поэтому в работе рассматривается перспектива создания защитных покрытий на основе тугоплавких элементов на дешевых конструкционных материалах. В связи с этим на поверхность стали наплавляли порошковые смеси ниobia, молибдена и бора (табл. 1). В целях минимиза-

Состав порошковых смесей
Powder mixtures compositions

Наименование порошковой смеси / Composition designation	Состав порошковой смеси, масс. % / Powder mixtures compositions, wt.-%			
	Nb	Mo	B	MgF ₂
Состав 1 (Nb20-Mo10) / Composition 1 (Nb20-Mo10)	20	10	10	60
Состав 2 (Nb10-Mo20) / Composition 2 (Nb10-Mo20)	10	20	10	60

ции окислительных процессов при электронно-лучевой обработке в шихтовую смесь добавляли флюсующую добавку – фторид магния (MgF₂), обеспечивающий создание защитной среды. В качестве источника концентрированной энер-

гии при наплавке использовался промышленный ускоритель электронов ЭЛВ-6. Работы выполнялись на экспериментальном стенде Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск). Режимы наплавки указаны в табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Режимы вневакуумной электронно-лучевой обработки
Non-vacuum electron beam surfacing modes

Параметр / Parameter	Значение / Value
Ток электронного пучка, <i>I</i> / Electron beam current, <i>I</i>	23 мА / 23 mA
Энергия электронного пучка, <i>E</i> / Electron beam energy, <i>E</i>	1,4 МэВ / 1.4 MeV
Масса насыпки порошка на единицу площади образца, <i>m</i> / Powder mass per unit area, <i>m</i>	0,45 г/см ² / 0.45 g/cm ²
Скорость перемещения образца, <i>V</i> / Sample movement speed, <i>V</i>	10 мм/с / 10 mm/s

Анализ структуры наплавленных слоев выполнялся на металлографическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer Alm и растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO50 XVP в режиме вторичных электронов. Оценку размеров частиц и их объемной доли в наплавленном слое выполняли с использованием программного комплекса ImageJ по пяти снимкам структуры с разных участков покрытия. Для определения элементного состава микроструктуры проводилась энергодисперсионная спектроскопия. Измерение микротвердости выполняли по методу Виккерса согласно ГОСТ 6507-1–2007 на микротвердомере Wolpert Group 402MVD при нагрузке 0,98 Н по направлению от поверхности наплавленного слоя к стальной подложке [24], для каждого режима наплавки твердость оценивалась по пяти образцам. Рентгенофазовый анализ материалов

проводили на дифрактометре Thermo Scientific ARL X'TRA. Оценка жаростойкости стали 40Х и сформированных слоев осуществлялась в соответствии с ГОСТ 6130–71 [25]. Параметры проведения испытания на жаростойкость были следующие: образцы выдерживались при 850 °С в течение 48 часов в воздушной среде. Через каждые 4 часа образцы взвешивали на аналитических весах «Госметр-124» с точностью измерения 0,1 мг. В качестве эталона для всех измерений использовали материал-основу сталь 40Х.

Расчет константы скорости реакции окисления выполняли по формуле

$$(\Delta W)^n = k_p t, \quad (1)$$

где ΔW – прирост массы на единицу площади; n – показатель степени; t – время окисления; k_p – константа скорости реакции окисления.

Уравнение (1) с помощью логарифмирования можно привести к линейному уравнению:

$$n \ln \Delta W = \ln k_p + \ln t. \quad (2)$$

Далее проводилась линейная регрессионная аппроксимация графика в координатах $\ln \Delta W - \ln t$.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены изображения микроструктуры и схема строения сформированных слоев. Для материалов состава 1 (Nb20-Mo10) и состава 2 (Nb10-Mo20) при наплавке формируется схожая структура. Микроструктура состоит из мелкодисперсных частиц (имеющих средний размер 8 ± 2 мкм и 18 ± 5 мкм для модифицированных слоев, полученных наплавкой составов 1 и 2 соответственно), предположительно легированных молибденом карбидов ниобия, распределенных равномерно по объему наплавленного слоя. Морфология частиц карбида варьируется

от кристаллов с неправильной геометрией до лепестковидной формы. Согласно данным из научной литературы, сначала образуются кристаллы карбида ниобия неправильной формы. Первичное образование карбидов ниобия обусловлено их температурой кристаллизации и более сильным сродством к углероду у ниобия, чем у молибдена и железа [26]. Далее происходит рост кристаллов карбида ниобия, и они приобретают лепестковидную форму. Одновременно с предыдущим процессом идет частичное замещение атомов ниобия в карбиде на атомы молибдена. Так формируются легированные молибденом карбиды ниобия. Кроме того, следует отметить, что снижение концентрации ниобия в расплаве является ключевым фактором, влияющим на морфологию формирующихся фаз. Дефицит ниобия ограничивает возможность роста лепестковидных кристаллов карбидов, что приводит к образованию мелкодисперсных частиц

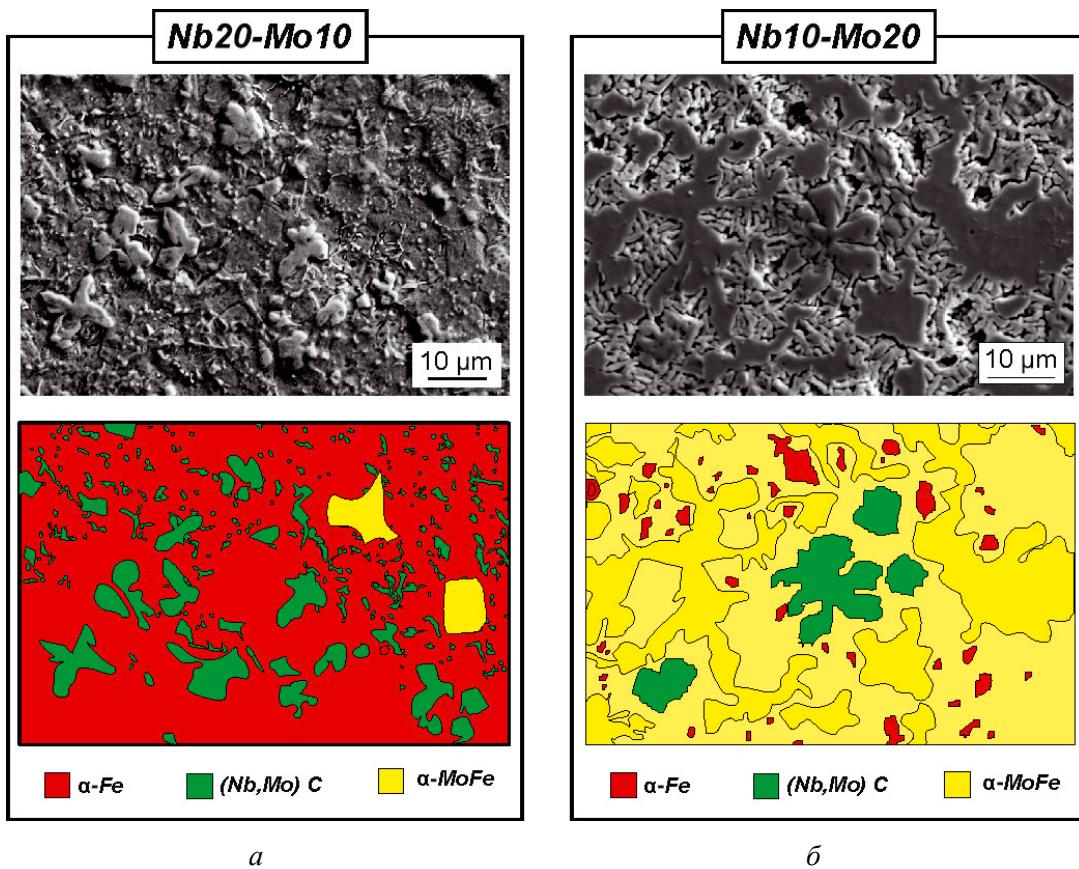


Рис. 1. Микроструктура и схема модифицированных слоев, сформированных при наплавке порошковых смесей:

a – Nb20-Mo10; б – Nb10-Mo20

Fig. 1. Microstructure of modified layers formed during surfacing of powder mixtures:

a – Nb20-Mo10; б – Nb10-Mo20

неправильной формы. Завершающей стадией процесса кристаллизации является выделение железомолибденовой матрицы, которая заполняет пространство между легированными молибденом карбидами ниобия.

Объемная доля упрочняющих частиц (карбидов) в покрытии состава 1 (Nb20-Mo10) составляет ~17,5 %. Для второго состава Nb10-Mo20 зафиксировано снижение объемной доли упрочняющих частиц до 12,5 % (рис. 1).

Результаты элементного картирования, представленные на рис. 2 (а, б) для покрытий, полу-

ченных наплавкой порошковых составов 1 и 2 соответственно, позволяют провести качественный анализ распределения элементов по структурным составляющим. Карты демонстрируют, что лепестковидные и неправильные кристаллы обогащены ниобием, молибденом и углеродом, что является основанием для их идентификации как карбидной фазы (Nb, Mo)C. Межкристаллитное пространство, в свою очередь, характеризуется преимущественным содержанием железа и молибдена, что свидетельствует о формировании пластичной матрицы на основе α -твердого

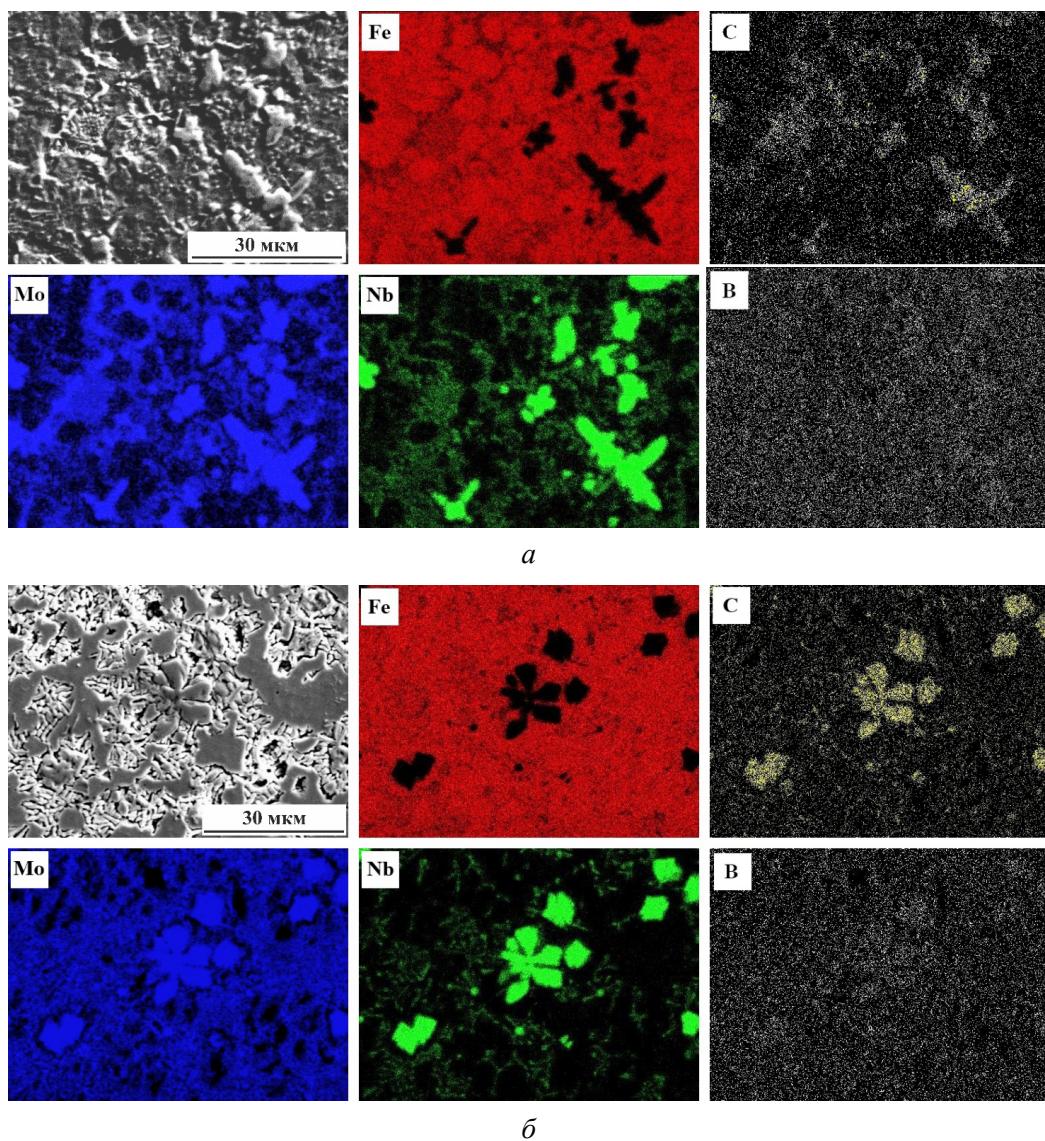


Рис. 2. Микрорентгеноспектральный анализ модифицированных слоев. Состав порошковой смеси:

а – Nb20-Mo10; б – Nb10-Mo20

Fig. 2. Energy-dispersive spectroscopy of modified layers. Composition of the powder mixture:

а – Nb20-Mo10; б – Nb10-Mo20

раствора железа (α -Fe) и раствора на основе молибдена (α -(Mo, Fe)).

Проведенный анализ дифракционных картин (рис. 3) показал, что фазовый состав наплавленного слоя включает в себя карбидную фазу типа (Nb, Mo)C и две основные металлические фазы – твердые растворы на основе α -Fe и α -(Mo, Fe).

Согласно данным из научной литературы, бор имеет невысокую растворимость в данных материалах: в Nb ~0,15 масс. %, в Mo ~0,1 масс. %, в α -Fe ~0,002 масс. %. Однако он легко образует бориды ниобия [26]. Несмотря на это, химических соединений с бором зафиксировано не было. Это объясняется окислением большей части бора в процессе наплавки с образованием ангидрида бора B_2O_3 . Этот оксид плавится при 450 °C и смешивается со шлаком [27]. Оставшаяся небольшая часть бора растворилась в пластичной матрице на основе альфа-растворов молибдена и железа и не успела выделиться в виде отдельных соединений из-за подавления диффузационных процессов вследствие высоких скоростей охлаждения. Результаты энергодисперсионной спектроскопии подтверждают распределение бора по всему объему материала (рис. 2).

Из результатов структурно-фазовых исследований также следует, что слои, наплавленные порошковыми смесями состава 1 и состава 2, имеют разную долю твердого раствора на ос-

нове железа и молибдена. В материалах Nb10-Mo20 количества фазы α -(Mo, Fe) больше, чем в Nb20-Mo10, что подтверждают изображения растровой электронной микроскопии (рис. 1 и 2) и рентгенофазового анализа по увеличению интенсивности рефлексов от этой фазы (рис. 3). Данная особенность связана с увеличением содержания молибдена в порошковой насыпке.

Результаты дюрометрических испытаний (рис. 4) демонстрируют образование модифицированных слоев с существенно более высокими показателями твердости по сравнению с исходной стальной матрицей. В слоях, образованных наплавкой смеси состава 1, наблюдается наибольшее повышение значений микротвердости – в 2,9 раза. Это объясняется тем, что в структуре данных слоев присутствует большое количество карбидов (Nb, Mo)C, которые обладают высокой твердостью около 20 ГПа [28].

В настоящей работе акцент делается на повышении жаростойкости конструкционной стали. Для этого проводили испытания образцов на высокотемпературное окисление и далее анализировали кинетику реакций и морфологию продуктов окисления.

На рис. 5 отображены зависимости изменения массы образцов от времени выдержки в печи, полученные по результатам испытаний на жаростойкость. По построенному графику видно, что для стали 40Х характерна линейная

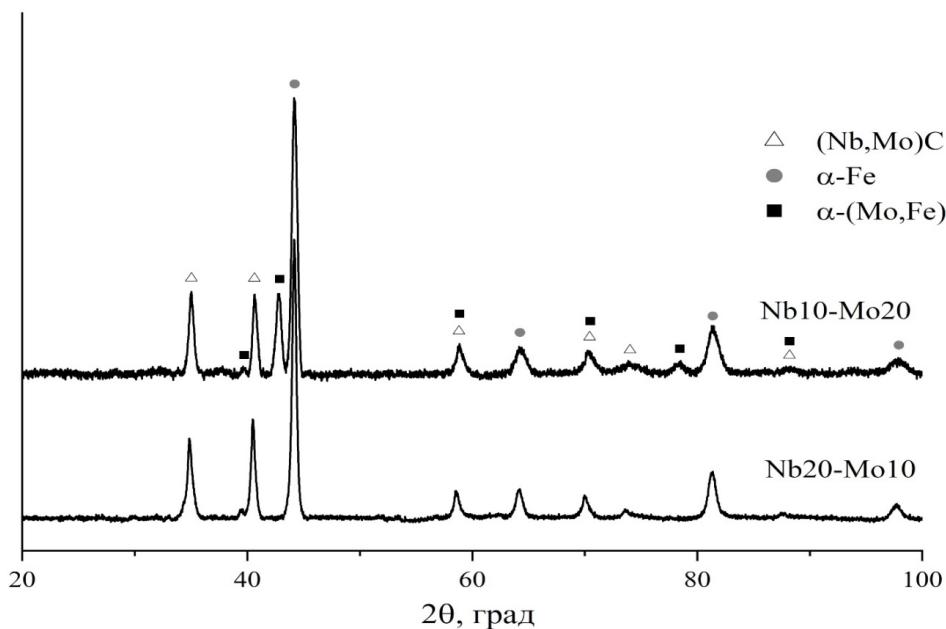


Рис. 3. Рентгенограммы модифицированных слоев

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of modified layers

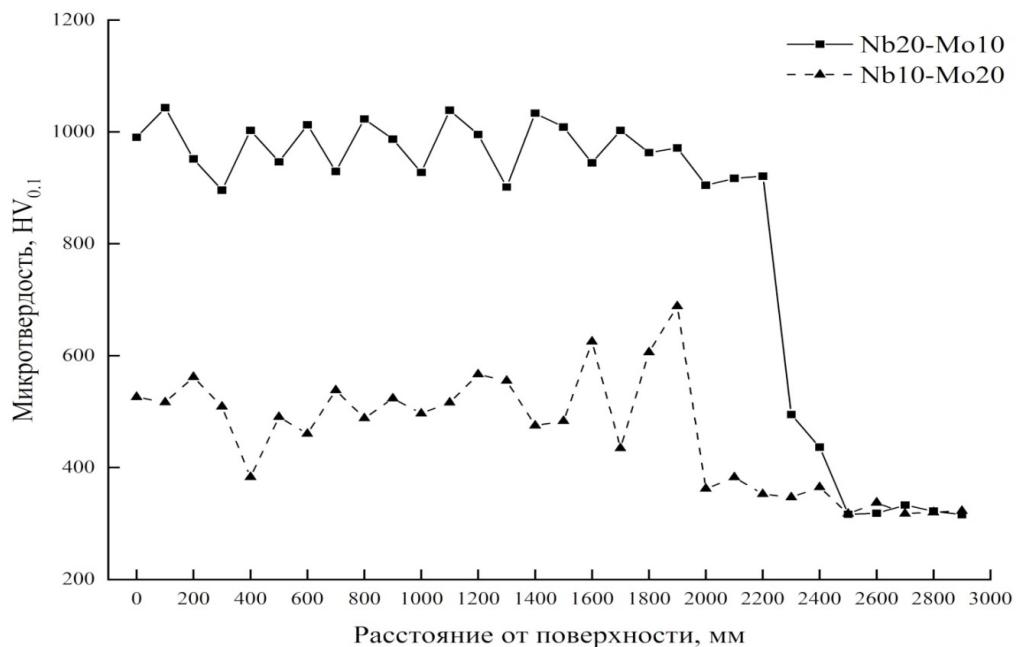


Рис. 4. Результаты измерения микротвердости

Fig. 4. Microhardness testing results

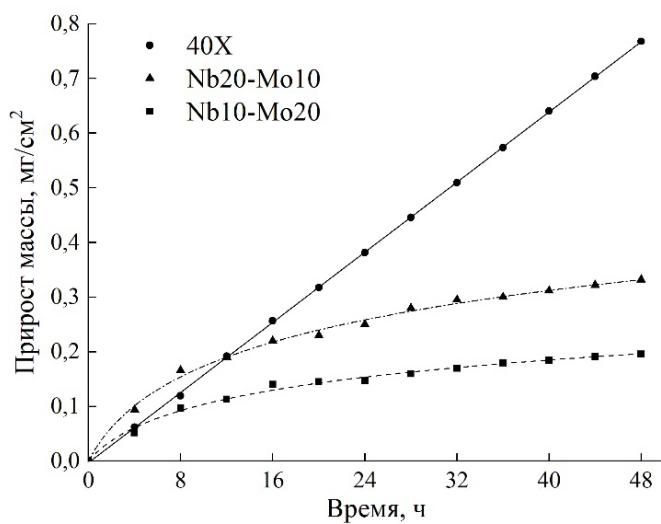


Рис. 5. Зависимость изменения массы от времени испытания

Fig. 5. Dependence of the mass change on the test time

зависимость между увеличением массы и временем выдержки. Это означает, что скорость окисления со временем не меняется и сталь не обладает сопротивлением к высокотемпературному окислению. Для модифицированных слоев Nb20-Mo10 и Nb10-Mo20 характерна нелинейная зависимость. Из зависимостей также видно, что прирост массы после окисления не выходит на уровень насыщения, характерного для остановки процесса окисления и пассивации поверхности.

Вероятно, это связано с интенсивными окислительными процессами по границам раздела карбидных фаз и твердого раствора [29]. На рис. 6 приведена диаграмма относительной жаростойкости исследуемых материалов.

В результате расчета константа скорости реакции окисления k_p для покрытия Nb20-Mo10 составила $2,3 \cdot 10^{-3} \text{ мг}^2/(\text{см}^4 \cdot \text{ч})$, для покрытия Nb10-Mo20 – $0,84 \cdot 10^{-3} \text{ мг}^2/(\text{см}^4 \cdot \text{ч})$. В случае стали 40Х константа скорости реакции была равна

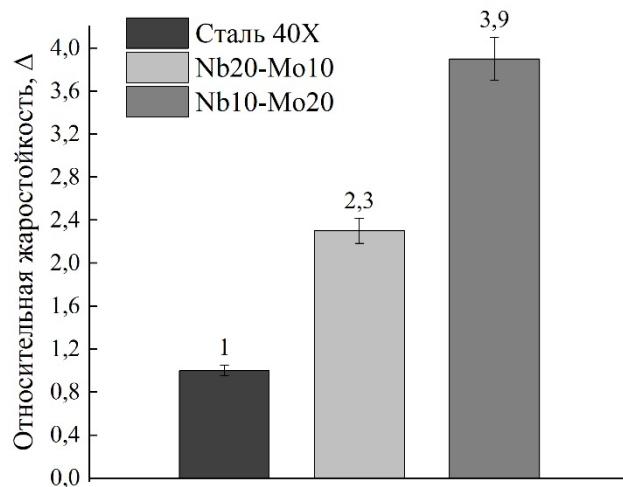


Рис. 6. Относительная жаростойкость наплавленных слоев

Fig. 6. Relative high-temperature oxidation resistance of surfaced layers

$16,1 \cdot 10^{-3}$ мг²/(см⁴·ч). Меньшее значение константы свидетельствует о лучшем сопротивлении окислению. Показатель степени для наплавленных составов оказался приблизительно равным двум, что говорит о параболическом законе роста оксидных пленок. Показатель степени для стали 40Х равен единице, это подтверждает линейный закон роста пленки. Линейный закон соответствует стационарному режиму окисления, в данном случае процесс окисления определяется скоростью диффузии кислорода через образовавшийся оксидный слой.

На рис. 7 представлена морфология оксидных пленок, образовавшихся на образцах после испытания на высокотемпературное окисление.

Структура пленок у образцов Nb20-Mo10 сформировалась в виде столбчатых построений (рис. 7, а, б). Они состоят из пластинчатых кристаллов со скругленными краями, довольно плотно связанных друг с другом. Оксидный слой на поверхности образцов Nb10-Mo20 плотный, без трещин и пор (рис. 7, в, г). Продукты окисления представляют собой равномерно распределенные полиэдрические кристаллы оксидов с размерами 1...5 мкм.

Согласно экспериментальным данным, покрытие, полученное наплавкой порошковой смеси состава 2, обладает лучшим сопротивлением высокотемпературному окислению по сравнению с покрытием Nb10-Mo20. Это различие

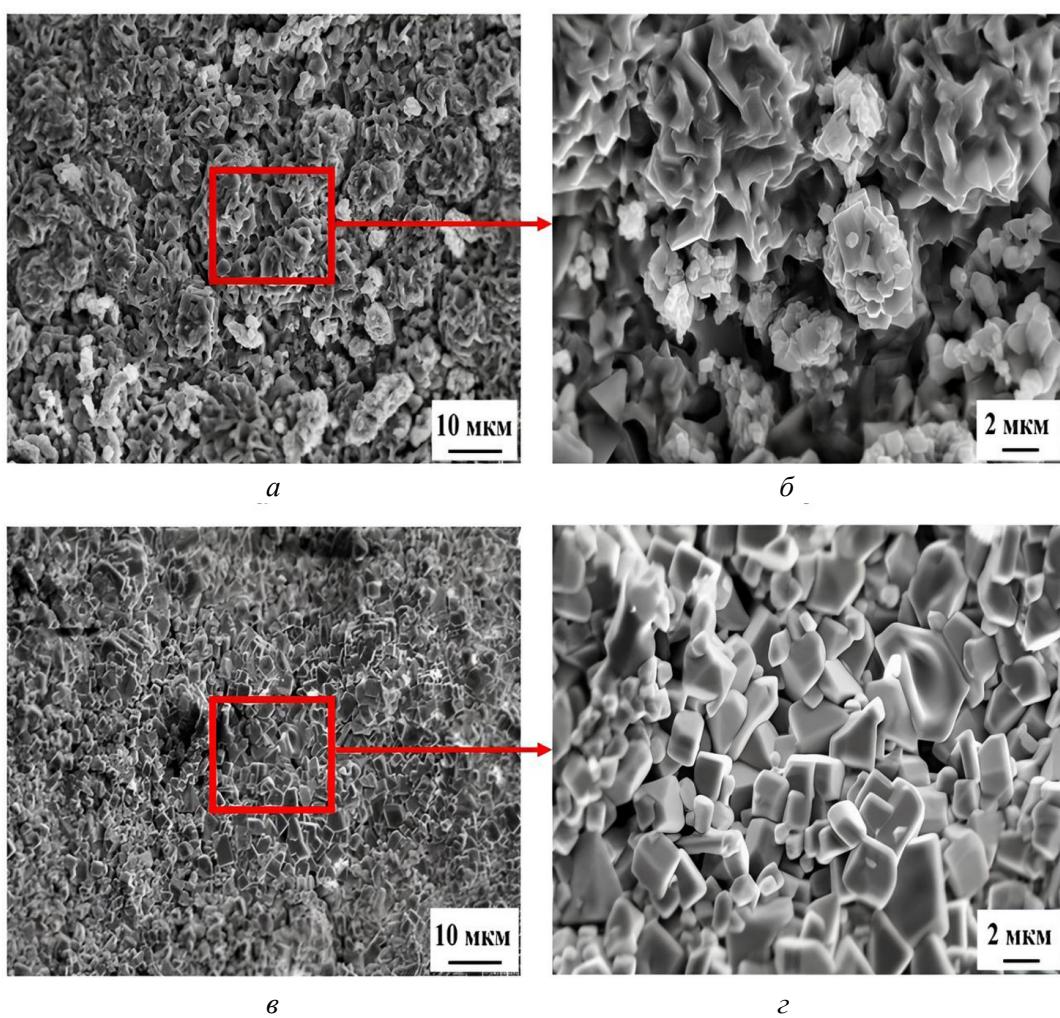


Рис. 7. Оксидные слои, сформировавшиеся на поверхности образцов после высокотемпературного воздействия:

а, б – Nb20-Mo10; в, г – Nb10-Mo20. Красным квадратом и стрелкой выделены области, показанные при большем разрешении справа

Fig. 7. Oxide layers formed on the surface of samples after high-temperature exposure:
a, b – Nb20-Mo10; v, g – Nb10-Mo20. The red square and arrow highlight the areas shown at a higher resolution on the right

связано с тем, что покрытия Nb10-Mo20 образуют более плотную, сплошную и равномерную оксидную пленку, предположительно состава MoO₂ [30]. Доля вводимого молибдена в порошковую смесь состава 2 (Nb10 + Mo20) больше, чем в составе 1 (Nb20 + Mo10). Это привело к большему обогащению молибденом модифицированного слоя и увеличило его жаростойкость, что согласуется с данными из научной литературы [31].

Выводы

1. Проведенное исследование показало, что вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошковых смесей на основе ниобия (Nb), молибдена (Mo) и бора (B) позволяет создавать модифицированные слои на поверхности конструкционной среднеуглеродистой стали 40Х толщиной до 2400 мкм. Структура указанных слоев представлена легированными молибденом карбидами ниобия, которые распределены в пластичной матрице, состоящей из твердых растворов железа и молибдена.

2. Проведенный анализ выявил, что при любом из исследуемых соотношений ниобия и молибдена (20 % Nb + 10 % Mo или 10 % Nb + + 20 % Mo) в структуре наплавленного слоя формируются следующие фазы: легированный карбид ниобия (Nb, Mo)C, α -твердый раствор железа и α -твердый раствор молибдена, легированный железом. Несмотря на введение 10 % бора, признаки образования боридов Nb или Mo отсутствуют, что свидетельствует в пользу его перехода в твердый раствор на основе железа и молибдена. Кроме того, установлено, что в модифицированном слое при использовании порошковой наплавочной смеси Nb20 + Mo10 образуются легированные карбиды ниобия размером 8 ± 2 мкм в количестве 17,5 %, а при использовании порошковой наплавочной смеси Nb10 + Mo20 образуются легированные карбиды ниобия размером 18 ± 5 мкм в количестве 12,5 %.

3. Формирование модифицированных слоев, легированных ниобием, молибденом и бором, позволяет существенно повысить микротвердость поверхностного слоя стали 40Х (микротвердость немодифицированной стали – 330 HV). Среднее значение микротвердости

~970 HV получено для модифицированного слоя состава Nb10 + Mo20, тогда как для состава Nb10 + Mo20 этот показатель составил ~522 HV. Высокое содержание Nb (20 %) усиливает формирование карбидов ниобия, легированных молибденом, что повышает твердость.

4. Легирование поверхности стали 40Х ниобием и молибденом приводит к значительному повышению жаростойкости материала. Количественный анализ показал, что введение 20 % молибдена и 10 % ниобия обеспечивает увеличение жаростойкости в 3,9 раза, в то время как добавление 20 % ниобия и 10 % молибдена приводит к росту данного показателя в 2,3 раза. Увеличение доли Mo (20 %) способствует получению твердых растворов на основе молибдена, улучшающих устойчивость к высоким температурам.

Список литературы

1. Microstructure and corrosion behavior of chromium-rich stainless steel coatings deposited by different laser cladding processes / S. Sun, Z. Wu, M. Pang, J. Chang, Y. Xuan, H. Qi, R. Yang, Y. Wu // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – Vol. 29. – P. 3879–3890. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.02.044.
2. High temperature corrosion resistance of FeCr(Ni, Al) alloys as bulk/overlay weld coatings in the presence of KCl at 600 °C / V. Ssenteza, J. Eklund, I. Hanif, J. Liske, T. Jonsson // Corrosion Science. – 2023. – Vol. 213. – P. 110896. – DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110896.
3. Thermal spray coatings on high-temperature oxidation and corrosion applications – A comprehensive review / V. Lakkannavar, K.B. Yogesha, C.D. Prasad, R.K. Phanden, G. Srinivasa, S.C. Prasad // Results in Surfaces and Interfaces. – 2024. – Vol. 16. – P. 100250. – DOI: 10.1016/j.rsurfi.2024.100250.
4. Tribo-oxidation of Ti-Al-Fe and Ti-Al-Mn cladding layers obtained by non-vacuum electron beam-treatment / O.E. Matts, S.Yu. Tarasov, B. Domenichini, D.V. Lazurenko, A.V. Filippov, V.A. Bataev, M.V. Rashkovets, I.K. Chakin, K.I. Emurlaev // Surface and Coatings Technology. – 2021. – Vol. 421. – P. 127442. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127442.
5. Оспенникова О.Г., Подъячев В.Н., Столянков Ю.В. Тугоплавкие сплавы для новой техники // Труды ВИАМ. – 2016. – № 10 (46). – С. 55–63. – DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-5-5. – URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1018 (дата обращения: 21.11.2025).
6. Шестаков А.В., Карапаев М.М., Дмитриев Н.С. Технологические пути создания компо-

- зионных материалов на основе жаропрочных тугоплавких соединений (обзор) // Труды ВИАМ. – 2021. – № 8 (102). – С. 12–20. – DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-12-20. – URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1732 (дата обращения: 21.11.2025).
7. Chen B., Zhuo L. Latest progress on refractory high entropy alloys: Composition, fabrication, post processing, performance, simulation and prospect // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2023. – Vol. 110. – P. 105993. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2022.105993.
8. Rymer L.-M., Lindner T., Lampke T. Enhanced high-temperature wear behavior of high-speed laser metal deposited $\text{Al}_{0.3}\text{CrFeCoNi}$ coatings alloyed with Nb and Mo // Surface and Coatings Technology. – 2023. – Vol. 470. – P. 129832. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129832.
9. Corrosion behavior of refractory metals in liquid lead at 1000 °C for 1000 h / Z. Xiao, J. Liu, Z. Jiang, L. Luo // Nuclear Engineering and Technology. – 2022. – Vol. 54 (6). – P. 1954–1961. – DOI: 10.1016/j.net.2021.12.014.
10. Boride coatings structure and properties, produced by atmospheric electron-beam cladding / A. Teplykh, M. Golkovskiy, A. Bataev, E. Drobayaz, S.V. Veselov, E. Golovin, I.A. Bataev, A. Nikulina // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 287–290. – P. 26–31. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.287-290.26.
11. Oxidation performance of spark plasma sintered Inconel 625-NbC metal matrix composites / A. Grabcś, P. Rutkowski, J. Huebner, D. Kozień, S. Zhang, Y.-L. Kuo, D. Kata, S. Hayashi // Corrosion Science. – 2022. – Vol. 205. – P. 110453. – DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110453.
12. Kinetics and mechanisms of high-temperature oxidation in BCC and FCC high-alloy Fe-based alloys with high volume fraction of carbides / K. Wieczerzak, M. Stygar, T. Brylewski, R. Chulist, P. Bała, J. Michler // Materials & Design. – 2024. – Vol. 244. – P. 113163. – DOI: 10.1016/j.matdes.2024.113163.
13. Wear-resistant boride reinforced steel coatings produced by non-vacuum electron beam cladding / D.A. Santana, G.Y. Koga, W. Wolf, I.A. Bataev, A.A. Ruktuev, C. Bolfarini, C.S. Kiminami, W.J. Botta, A.M. Jorge Jr // Surface & Coatings Technology. – 2020. – Vol. 386. – P. 125466. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125466.
14. Microstructure and mechanical properties of carbides reinforced nickel matrix alloy prepared by selective laser melting / T. Xia, R. Wang, Z. Bi, R. Wang, P. Zhang, G. Sun, J. Zhang // Materials. – 2021. – Vol. 14. – P. 4792. – DOI: 10.3390/ma14174792.
15. Effect of addition of metal carbide on the oxidation behaviors of titanium matrix composites / Y. Liu, Y. Liu, Z. Zhao, Y. Chen, H. Tang // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – Vol. 599. – P. 188–194. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.02.056.
16. The elevated temperature oxidation and wear behavior of $\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_8\text{Mo}_{12}\text{B}_{10}\text{Si}_{10}$ high-entropy alloy coating by laser cladding / G. Zhang, Z. Zhang, J. Xuan, B. Chen, D. Jiang, X. Song // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – Vol. 29. – P. 4216–4231. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.02.135.
17. Effects of Nb content on the microstructure and properties of CoCrFeMnNiNb_x high-entropy alloy coatings by laser cladding / M. Feng, T. Lin, G. Lian, C. Chen, X. Huang // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – Vol. 28. – P. 3835–3848. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.01.002.
18. Wear of Mo- and W-alloyed TiAlN coatings during high-speed turning of stainless steel / M. Moreno, J.M. Andersson, M.P. Johansson-Jöesaar, B.E. Friedrich, R. Boyd, I.C. Schramm, L.J.S. Johnson, M. Odén, L. Rogström // Surface and Coatings Technology. – 2022. – Vol. 446. – P. 128786. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128786.
19. B and Ce composite microalloying for improving high-temperature oxidation resistance of 254SMO super-austenite stainless steel / Z. Li, J. Ren, J. Ma, C. Zhang, W. Wang, Y. Li, N. Dong, P. Han // Intermetallics. – 2024. – Vol. 174. – P. 108457. – DOI: 10.1016/j.intermet.2024.108457.
20. Анализ современной ситуации в области применения электронно-пучковой обработки различных сплавов. Ч. 1 / Д.В. Комаров, С.В. Коновалов, Д.В. Жуков, И.С. Виноградов, И.А. Панченко // Ползуновский вестник. – 2021. – № 4. – С. 129–139. – DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.017.
21. Non-vacuum electron-beam boriding of lowcarbon steel / I.A. Bataev, A.A. Bataev, M.G. Golkovsky, A.Yu. Teplykh, V.G. Burov, S.V. Veselov // Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 207. – P. 245–253. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.06.081.
22. Cutting and welding of high-strength steels using non-vacuum electron beam as a universal tool for material processing / T. Hassel, N. Murray, G. Klimov, A. Beniyash // World Journal of Engineering and Technology. – 2016. – Vol. 4. – P. 598–607. – DOI: 10.4236/wjet.2016.44056.
23. Марочник сталей и сплавов / под ред. А.С. Зубченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с. – ISBN 978-5-94275-582-9.
24. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Ч. 1. Метод измерения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 16 с.
25. ГОСТ 6130-71. Металлы. Методы определения жаростойкости: взамен ГОСТ 6130-52: переизд.

(сент. 1990 г.) с Изм. № 1. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 14 с.

26. Rogl P., Korniyenko K., Velikanova T. Boron – Carbon – Niobium // Refractory Metal Systems. – Springer, 2009. – P. 474–498. – DOI: 10.1007/978-3-540-88053-0_20.

27. The crystal structure of trigonal diboron trioxide / G.E. Gurr, P.W. Montgomery, C.D. Knutson, B.T. Gorres // Acta Crystallographica. – 1970. – Vol. 26 (7). – P. 906–915. – DOI: 10.1107/S0567740870003369.

28. Tool steel coatings based on niobium carbide and carbonitride compounds / R.A. Mesquita, C.A. Schuh // Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 207. – P. 472–479. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.07.052.

29. Улиз Г.Г., Реви Р.У. Коррозия и борьба с ней: введение в коррозионную науку и технику / пер.

с англ. А.М. Сухотина. – Л.: Химия, 1989. – 456 с. – ISBN 5-7245-0355-7.

30. Oxidation mechanism and high-temperature strength of Mo–B–C-coated diamonds in the 700°C–1200 °C temperature range / X. Mao, Q. Meng, S. Wang, S. Huang, M. Yuan, Y. Qiu // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – Vol. 33. – P. 7829–7841. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.10.249.

31. Effects of Mo and Nb on the microstructure and high temperature oxidation behaviors of CoCrFe-Ni-based high entropy alloys / T. Wu, L. Yu, G. Chen, R. Wang, Y. Xue, Y. Lu, B. Luan // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol. 27. – P. 1537–1549. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.10.058.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Structure and properties of coatings based on refractory elements obtained by non-vacuum electron beam surfacing

Evdokia Bushueva^{1, a,*}, Artem Nastavshev^{1, b}, Ksenia Skorokhod^{2, c}, Evgeniy Domarov^{3, d},
Ivan Mishin^{4, e}

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Markska, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³ Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 11 Acad. Lavrentieva Pr., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

⁴ Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, 2/4 pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-7608-734X>, bushueva@corp.nstu.ru; ^b <https://orcid.org/0009-0002-1082-2086>, artem.nastavshev@yandex.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0003-0210-8405>, k.skorokhod@itam.nsc.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0003-2422-1513>, domarov88@mail.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0001-8294-7238>, mip@ispms.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 29 July 2025

Revised: 02 September 2025

Accepted: 15 November 2025

Available online: 15 December 2025

Keywords:

Structure

Electron beam surfacing

High-temperature oxidation resistance

Hardness

Funding

The study was carried out in accordance with the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project FSUN-2023-0009).

ABSTRACT

Introduction. The development of modern industry requires materials capable of withstanding high temperatures and loads while maintaining functionality and performance. Traditional materials, such as 0.4 C-Cr structural steel, are widely used in mechanical engineering and are inexpensive. However, ordinary and low-alloy steels are subject to intense oxidation when exposed to temperatures above 400°C. To improve the performance of structural steels under high-temperature conditions, the development of effective methods for modifying their surfaces is an urgent task. **The purpose of this work** is to develop a technology for creating high-temperature oxidation resistant surface layers on 0.4 C-Cr structural steel. For this purpose, the non-vacuum electron beam surfacing method was used, employing powder materials based on refractory elements: niobium, molybdenum, and boron. **Materials and methods.** In this study, modified layers were formed on 0.4 C-Cr steel using non-vacuum electron beam surfacing of Nb-Mo-B powder composites. The following research methods were used: optical microscopy, scanning electron microscopy, X-ray diffraction analysis, microhardness testing, high-temperature oxidation testing, and oxidation reaction kinetics determination. **Results and discussion.** The modified layers, which were 2.0–2.3 mm thick, exhibited a gradient structure consisting of molybdenum-doped niobium carbide present as dendrites and irregularly shaped crystals, as well as eutectic colonies based on the same carbide and α -Fe and α -(Mo,Fe) solid solutions. X-ray phase analysis identified the following phases in the modified layers: (Nb,Mo)C carbide and α -Fe and α -(Mo,Fe)-based solid solutions. The surfacing with Nb, Mo, and B resulted in the formation of layers on the surface of 0.4 C-Cr carbon steel that are 2.9 times harder and 3.9 times more temperature oxidation resistant than those of the unmodified steel.

For citation: Bushueva E.G., Nastavshev A.E., Skorokhod K.A., Domarov E.V., Mishin I.P. Structure and properties of coatings based on refractory elements obtained by non-vacuum electron beam surfacing. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = Metal Working and Material Science, 2025, vol. 27, no. 4, pp. 325–338. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-325-338. (In Russian).

References

1. Sun S., Wu Z., Pang M., Chang J., Xuan Y., Qi H., Yang R., Wu Y. Microstructure and corrosion behavior of chromium-rich stainless steel coatings deposited by different laser cladding processes. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, vol. 29, pp. 3879–3890. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.02.044.
2. Senteza V., Eklund J., Hanif I., Liske J., Jonsson T. High temperature corrosion resistance of FeCr(Ni, Al) alloys as bulk/overlay weld coatings in the presence of KCl at 600 °C. *Corrosion Science*, 2023, vol. 213, p. 110896. DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110896.

* Corresponding author

Bushueva Evdokia G., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Novosibirsk State Technical University,
20 Prospekt K. Markska,
630073, Novosibirsk, Russian Federation
Тел.: +7 383 346-06-12, e-mail: bushueva@corp.nstu.ru

3. Lakkannavar V., Yogesha K.B., Prasad C.D., Phanden R.K., Srinivasa G., Prasad S.C. Thermal spray coatings on high-temperature oxidation and corrosion applications – A comprehensive review. *Results in Surfaces and Interfaces*, 2024, vol. 16, p. 100250. DOI: 10.1016/j.rsurfi.2024.100250.
4. Matts O.E., Tarasov S.Yu., Domenichini B., Lazurenko D.V., Filippov A.V., Bataev V.A., Rashkovets M.V., Chakin I.K., Emurlaev K.I. Tribological behavior of Ti-Al-Fe and Ti-Al-Mn cladding layers obtained by non-vacuum electron beam treatment. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 421, p. 127442. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127442.
5. Ospennikova O.G., Podjyachev V.N., Stolyankov Yu.V. Tugoplavkie splavy dlya novoi tekhniki [Refractory alloys for innovative equipment]. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, 2016, no. 10 (46), pp. 55–63. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-5-5. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed 21.11.2025).
6. Shestakov A.V., Karashaev M.M., Dmitriev N.S. Tekhnologicheskie puti sozdaniya kompozitsionnykh materialov na osnove zharoprochnykh tugoplavkikh soedinenii (obzor) [Technological ways to create composite materials based on heat-resistant refractory compounds (review)]. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, 2021, no. 8 (102), pp. 12–20. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-12-20. Available at: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1732 (accessed 21.11.2025).
7. Chen B., Zhuo L. Latest progress on refractory high entropy alloys: Composition, fabrication, post processing, performance, simulation and prospect. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2023, vol. 110, p. 105993. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2022.105993.
8. Rymer L.-M., Lindner T., Lampke T. Enhanced high-temperature wear behavior of high-speed laser metal deposited Al_{0.3}CrFeCoNi coatings alloyed with Nb and Mo. *Surface and Coatings Technology*, 2023, vol. 470, p. 129832p. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129832.
9. Xiao Z., Liu J., Jiang Z., Luo L. Corrosion behavior of refractory metals in liquid lead at 1000 °C for 1000 h. *Nuclear Engineering and Technology*, 2022, vol. 54 (6), pp. 1954–1961. DOI: 10.1016/j.net.2021.12.014.
10. Teplykh A., Golkovskiy M., Bataev A., Drobyaz E., Veselov S.V., Golovin E., Bataev I.A., Nikulina A. Boride coatings structure and properties, produced by atmospheric electron-beam cladding. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 287–290, pp. 26–31. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.287-290.26.
11. Graboś A., Rutkowski P., Huebner J., Kozień D., Zhang S., Kuo Y.-L., Kata D., Hayashi S. Oxidation performance of spark plasma sintered Inconel 625-NbC metal matrix composites. *Corrosion Science*, 2022, vol. 205, p. 110453. DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110453.
12. Wieczerek K., Stygar M., Brylewski T., Chulist R., Bała P., Michler J. Kinetics and mechanisms of high-temperature oxidation in BCC and FCC high-alloy Fe-based alloys with high volume fraction of carbides. *Materials & Design*, 2024, vol. 244, p. 113163. DOI: 10.1016/j.matdes.2024.113163.
13. Santana D.A., Koga G.Y., Wolf W., Bataev I.A., Ruktuev A.A., Bolfarini C., Kiminami C.S., Botta W.J., Jorge Jr A.M. Wear-resistant boride reinforced steel coatings produced by non-vacuum electron beam cladding. *Surface & Coatings Technology*, 2020, vol. 386, p. 125466. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125466.
14. Xia T., Wang R., Bi Z., Wang R., Zhang P., Sun G., Zhang J. Microstructure and mechanical properties of carbides reinforced nickel matrix alloy prepared by selective laser melting. *Materials*, 2021, vol. 14, p. 4792. DOI: 10.3390/ma14174792.
15. Liu Y., Liu Y., Zhao Z., Chen Y., Tang H. Effect of addition of metal carbide on the oxidation behaviors of titanium matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, vol. 599, pp. 188–194. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.02.056.
16. Zhang G., Zhang Z., Xuan J., Chen B., Jiang D., Song X. The elevated temperature oxidation and wear behavior of Fe₂₀Co₂₀Ni₂₀Cr₈Mo₁₂B₁₀Si₁₀ high-entropy alloy coating by laser cladding. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, vol. 29, pp. 4216–4231. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.02.135.
17. Feng M., Lin T., Lian G., Chen C., Huang X. Effects of Nb content on the microstructure and properties of CoCrFeMnNiNb high-entropy alloy coatings by laser cladding. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, vol. 28, pp. 3835–3848. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.01.002.
18. Moreno M., Andersson J.M., Johansson-Jöesaar M.P., Friedrich B.E., Boyd R., Schramm I.C., Johnson L.J.S., Odén M., Rogström L. Wear of Mo- and W-alloyed TiAlN coatings during high-speed turning of stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 2022, vol. 446, p. 128786. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128786.
19. Li Z., Ren J., Ma J., Zhang C., Wang W., Li Y., Dong N., Han P. B and Ce composite microalloying for improving high-temperature oxidation resistance of 254SMO super-austenite stainless steel. *Intermetallics*, 2024, vol. 174, p. 108457. DOI: 10.1016/j.intermet.2024.108457.
20. Komarov D.V., Konovalov S.V., Zhukov D.V., Vinogradov I.S., Panchenko I.A. Analiz sovremennoi situatsii v oblasti primeneniya elektronno-puchkovoi obrabotki razlichnykh splavov. Ch. 1 [Analysis of the current situation in the field of application of electron-beam cladding of various alloys]. Ch. 1 [Analysis of the current situation

in the field of application of electron-beam processing of various alloys. Part 1]. *Polzunovskiy vestnik*, 2021, no. 4, pp. 129–139. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.017. (In Russian).

21. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovsky M.G., Teplykh A.Yu., Burov V.G., Veselov S.V. Non-vacuum electronbeam boriding of low-carbon steel. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 207, pp. 245–253. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.06.081.

22. Hassel T., Murray N., Klimov G., Beniyash A. Cutting and welding of high-strength steels using non-vacuum electron beam as a universal tool for material processing. *World Journal of Engineering and Technology*, 2016, vol. 4, pp. 598–607. DOI: 10.4236/wjet.2016.44056.

23. Zubchenko A.S., ed. *Marochnik stalei i splavov* [Brand book of steels and alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 784 p. ISBN 978-5-94275-582-9.

24. GOST R ISO 6507-1–2007. *Metally i splavy. Izmerenie tverdositi po Vikkersu. Ch. 1. Metod izmereniya* [State standard R ISO 6507-1–2007. Metals and alloys. Vickers hardness test. Part 1. Test method]. Moscow, Standartinform publ., 2008. 16 p.

25. GOST 6130–71. *Metally. Metody opredeleniya zharostoikosti* [State standard 6130–71. Metals. Methods of determining heat resistance]. Moscow, Standards Publ., 1990. 14 p.

26. Rogl P., Korniyenko K., Velikanova T. Boron – Carbon – Niobium. *Refractory Metal Systems*. Springer, 2009, pp. 474–498. DOI: 10.1007/978-3-540-88053-0_20.

27. Gur G.E., Montgomery P.W., Knutson C.D., Gorres B.T. The crystal structure of trigonal diboron trioxide. *Acta Crystallographica*, 1970, vol. 26 (7), pp. 906–915. DOI: 10.1107/S0567740870003369.

28. Mesquita R.A., Schuh C.A. Tool steel coatings based on niobium carbide and carbonitride compounds. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 207, pp. 472–479. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.07.052.

29. Uhlig H.H., Revie R.W. *Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering*. Wiley, 1985. 512 p. ISBN 0-471-07818-2 (Russ. ed.: Ulig G.G., Revi R.U. *Korroziya i bor'ba s nej: vvedenie v korrozionnyu nauku i tekhniku*. Leningrad, Khimiya Publ., 1989. 456 p. ISBN 5-7245-0355-7).

30. Mao X., Meng Q., Wang S., Huang S., Yuan M., Qiu Y. Oxidation mechanism and high-temperature strength of Mo–B–C-coated diamonds in the 700°C–1200 °C temperature range. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, vol. 33, pp. 7829–7841. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.10.249.

31. Wu T., Yu L., Chen G., Wang R., Xue Y., Lu Y., Luan B. Effects of Mo and Nb on the microstructure and high temperature oxidation behaviors of CoCrFeNi-based high entropy alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 27, pp. 1537–1549. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.10.058.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).