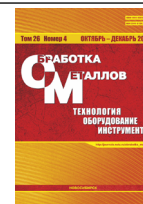




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Влияние горячей пластической деформации на структуру и свойства поверхностно модифицированных слоев после вневакуумной электронно-лучевой наплавки на сталь 12X18H9T с применением порошковой смеси состава 10Cr-30B

Алина Дударева^{1, a, *}, Евдокия Бушуева^{1, b}, Андрей Тюрин^{1, c}, Евгений Домаров^{2, d},
 Игорь Насенник^{1, 4, e}, Владислав Шикалов^{3, f}, Ксения Скороход^{3, g}, Александр Легкодымов^{2, 4, h}

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

² Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 11, г. Новосибирск, 630090, Россия

³ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Институтская улица, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия

⁴ Федеральный исследовательский центр «Институт катализа имени Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук», Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов», пр. Никольский, 1, р.п. Кольцово, Новосибирская область, 1630559, Россия

^a <https://orcid.org/0009-0001-5649-7090>, dudareva-alina@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0001-7608-734X>, bushueva@corp.nstu.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0003-4757-424X>, a.tyurin@corp.nstu.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0003-2422-1513>, domarov88@mail.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0003-0937-5004>, nasennik.2017@corp.nstu.ru; ^f <https://orcid.org/0000-0002-0491-2803>, v.shikalov@gmail.com;

^g <https://orcid.org/0000-0003-0210-8405>, k.skorokhod@itam.nsc.ru; ^h <https://orcid.org/0000-0001-7405-7454>, a_legkodymov@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 539.374.2

История статьи:

Поступила: 06 сентября 2024
 Рецензирование: 20 сентября 2024
 Принята к печати: 08 октября 2024
 Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Хромоникелевая аустенитная сталь
 Электронно-лучевая наплавка
 Горячая пластическая деформация
 Синхротронное излучение
 Бор

Финансирование

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время хромоникелевые аустенитные стали широко используются в нефтегазовой промышленности для бурения скважин благодаря высокой коррозионной стойкости, немагнитным свойствам, высокой ударной вязкости, пластичности и свариваемости. Однако для увеличения срока эксплуатации изделий необходимо повышение абразивной стойкости поверхностных слоев с сохранением химической стойкости, что является сложной технологической задачей. Решение такой задачи может заключаться в создании листовых заготовок «хромоникелевая аустенитная сталь – модифицированный слой», подвергнутых горячей пластической деформации. **Цель работы:** исследование влияния горячей пластической деформации на структуру и фазовый состав композиций «модифицированный слой – основной металл», полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковой смеси бора и хрома на хромоникелевую аустенитную сталь 12X18H9T. **В работе исследованы** образцы из стали 12X18H9T с модифицированным слоем 10Cr-30B, сформированным вневакуумной электронно-лучевой наплавкой порошковой смеси хрома и бора и последующей горячей пластической деформацией при температуре 950 °С. **Методами исследования** являются механические испытания на микротвердость, рентгеноспектральный анализ модифицированного слоя, металлографические исследования, профильный анализ и расчет параметров решетки. **Результаты и обсуждение.** Выявлено, что после деформации получены бездефектные композиции, поверхностный слой которых представляет собой матричный композиционный материал, содержащий ориентированные частицы карбида хрома с измененными параметрами кристаллической решетки. После пластической деформации не было зафиксировано трещин и расслоений, что позволяет говорить о высоком качестве композиций «модифицированный слой – основной металл» с увеличенными показателями твердости, превышающими в 6,5 раза (13...11 ГПа) соответствующие показатели стали 12X18H9T в состоянии поставки (2 ГПа). В модифицированном слое образуются сложные бориды типа $(Fe_xCr_y)B$, расположенные в γ -твердом растворе железа. Параметр решетки уменьшается для γ -железа с 3,588 до 3,580 Å, для борида параметр a – с 5,126 до 5,111 Å, параметр c – с 4,228 до 4,199 Å.

Для цитирования: Влияние горячей пластической деформации на структуру и свойства поверхностно модифицированных слоев после вневакуумной электронно-лучевой наплавки на сталь 12X18H9T с применением порошковой смеси состава 10Cr-30B / А.А. Дударева, Е.Г. Бушуева, А.Г. Тюрин, Е.В. Домаров, И.Е. Насенник, В.С. Шикалов, К.А. Скороход, А.А. Легкодымов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 192–205. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-192-205.

*Адрес для переписки

Дударева Алина Алексеевна, аспирант, м.н.с.
 Новосибирский государственный технический университет,
 пр. К. Маркса, 20,
 630073, г. Новосибирск, Россия
 Тел.: +7 913 707-63-44, e-mail: dudareva-alina@mail.ru

Введение

Вневакуумная электронно-лучевая наплавка позволяет получать композиции, которые состоят из основного металла и поверхностно-модифицированного упрочняющего слоя различной толщины, содержащего боридные частицы. Толщина слоя регулируется параметрами [1–12].

В процессе вневакуумной электронно-лучевой наплавки необходимо использовать в качестве основного материала плоские заготовки толщиной не менее 9 мм с целью исключения коробления при наплавке порошковой смеси. Большая толщина и форма упрочняемой поверхности ограничивают возможности различных вариантов наплавки. Например, для бурения скважин в нефтегазовой отрасли применяются телеметрические системы контроля состояния и направления движения бурового инструмента, детали которых имеют сложную конструкцию с цилиндрическими и фасонными поверхностями. В качестве материала для этих деталей, эксплуатируемых в условиях коррозионных сред и абразивного воздействия частиц породы, используется хромоникелевая аустенитная сталь, обладающая немагнитными свойствами. Повышение гидроабразивной износостойкости поверхностных слоев таких изделий (внутренние поверхности корпусных деталей, труб и клапанов телеметрических систем) при сохранении химической стойкости и отсутствия намагничивания – важная техническая задача [13–15].

Использование горячей пластической деформации композиций, состоящих из относительно пластичной аустенитной стали и износостойко-

го модифицированного слоя, позволяет получать тонколистовые изделия и изделия с фасонными поверхностями, которые будут сочетать в себе высокие коррозионные и износостойкие свойства [16–20].

Цель настоящей работы: исследование влияния горячей пластической деформации на структуру и фазовый состав композиций «модифицированный слой – основной металл», полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковой смеси бора и хрома на хромоникелевую аустенитную сталь 12Х18Н9Т.

Для поставленной цели требуется решить следующие **задачи**:

- получить заготовки из аустенитной нержавеющей стали, упрочненной методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей 10Cr-30В;
- оценить влияние степени пластической деформации на структуру и свойства боридных слоев;
- исследовать влияние горячей пластической деформации на фазовый состав и параметры решетки модифицированного слоя.

Методика исследований

Для создания модифицированного слоя на стали 12Х18Н9Т, упрочненного боридными частицами, применяли наплавку порошковой смеси (табл. 1) пучком релятивистских электронов, выведенным в воздушную атмосферу на ускорителе электронов промышленного типа ЭЛВ-6 в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. Параметры вневакуумной электронно-лучевой наплавки представлены в табл. 2.

Таблица 1

Table 1

Состав порошковой смеси
Composition of the powder mixture

Наименование порошковой системы	Состав порошковой смеси, масс. %		
	Cr	В	MgF ₂ *
10Cr-30В	10	30	60
	Размеры частиц порошка, мкм		
	5...20	40...80	200...300

* Поскольку наплавка осуществляется без применения вакуума и защитных газов, то MgF₂ используется в качестве флюса.

Таблица 2

Table 2

Режимы вневакуумной электронно-лучевой обработки
Modes of non-vacuum electron beam surfacing

Параметр	Значение
Энергия электронного пучка, E	1,4 МэВ
Удельная энергия, $E_{уд}$	6,44 кДж/см ²
Масса порошка на единицу площади, m	0,33 г/см ²
Частота сканирования электронного пучка, ν	50 Гц
Расстояние от выпускного отверстия до заготовки, h	90 мм
Скорость перемещения столика с образцом, V	10 мм/с

Следует отметить, что аустенитная сталь применялась в качестве эталонного материала при дюраметрических исследованиях.

Образцы после вневакуумной электронно-лучевой наплавки подвергали горячей пластической деформации при 950 °С на прокатном стане «Кварто» с диаметром рабочих валков 330 мм, скоростью 60 мм/с и шагом деформации 5 %. Минимальная степень деформации составила 30 %, максимальная – 80 %. При деформации менее 30 % существенных изменений в структуре и внешнем виде заготовок не наблюдается. При 80 % наблюдается максимально возможная степень пластической деформации для образцов «модифицированный слой – основной металл».

Основываясь на научной литературе, температура для пластической деформации была выбрана 950 °С как минимальная температура для обеспечения пластичности подложки (12Х18Н9Т) и относительной пластичности модифицированного слоя. Кроме того, деформация при 950 °С позволяет избежать перегрева материала и укрупнения зерна в основном металле.

Металлографические исследования проводили на микроскопе Axio Observer Z1m Carl Zeiss.

Определение фазового состава и структуры выполнялось на станции «Жесткая рентгено-скопия» Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. Дифракционный анализ проводили при комнатной температуре в просвечивающем режиме. Энергия излучения – 56,35 кэВ, размер пучка – 500×500 мкм, расстояние до исследуемого материала – 353 мм. Детектор Mar345 применялся для регистрации дифрагированного

излучения. После проведения исследования двумерные дифракционные картины интегрировались посредством программного обеспечения руFAI с открытым исходным кодом [21].

Профильный анализ дифракционных максимумов проводился с использованием функции псевдо-Войта и дальнейшим расчетом параметра кристаллической решетки матричным методом.

Для выявления особенностей расположения боридных частиц в структуре модифицированного слоя применяли растровый микроскоп Carl Zeiss EVO50 XVP. Исследования были проведены в режиме дифракции обратно рассеянных электронов, химический состав определялся с использованием энергодисперсионного анализатора EDX X-Act.

Микротвердость полученных модифицированных слоев измеряли по методу Виккерса в соответствии с ГОСТ 9450–76 при нагрузке 0,98 Н на микротвердомере Wolpert Group 402MVD. На каждый образец наносили не менее пяти дорожек с уколами по 10 отпечатков.

Результаты и их обсуждение

Наиболее эффективным для деформирования хромоникелевой стали является диапазон температур 950...1100 °С, в котором успевают пройти процессы динамического возврата и рекристаллизации, а также отсутствуют локальные области оплавления с дефектами, приводящими к разрушению.

На рис. 1 представлена структура поперечных шлифов модифицированных слоев, полученных

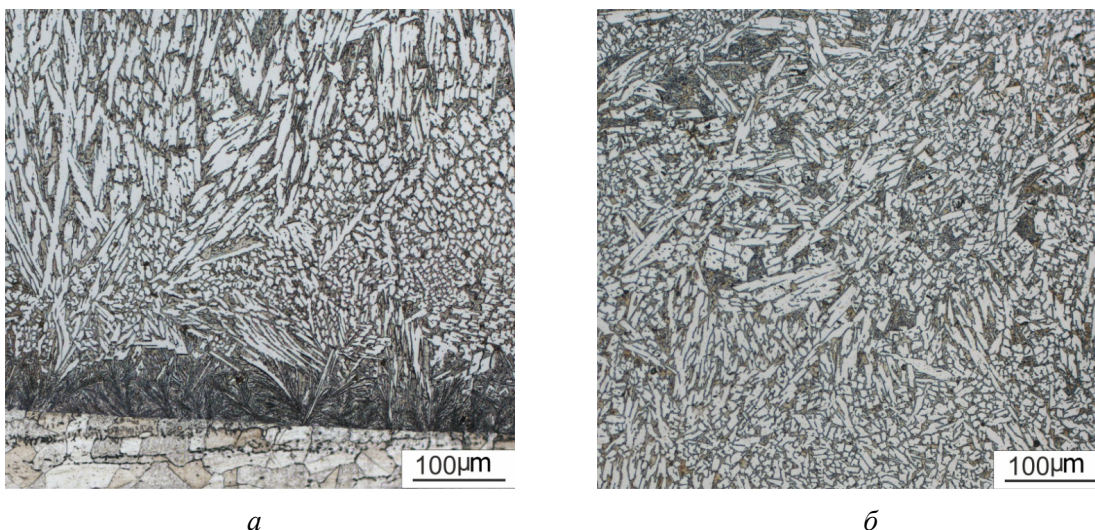


Рис. 1. Структура образцов до пластической деформации:
a – поперечный шлиф; *б* – фронтальный шлиф

Fig. 1. Structure of the specimens before plastic deformation:
a – transverse section; *б* – frontal section

после наплавки порошковой смеси состава 10Cr-30В и представляющих собой композиционный материал с плотным расположением боридных частиц. Под матричным композиционным материалом понимается образец «модифицированный слой – основной металл» (рис. 1, *a*). Бориды выступают в качестве упрочняющей фазы в модифицированном слое. Плотность расположения боридных частиц оценивалась визуально (рис. 1, *б*). Модифицированный поверхностный слой толщиной до 2,5 мм связан с основным материалом переходной зоной толщиной 100...150 мкм. В структуре модифицированного слоя присутствуют бориды, не имеющие правильной геометрической формы, что может быть объяснено столкновением кристаллов в процессе их роста. Переходный слой представляет собой эвтектику, компонентами которой являются аустенит и кристаллы боридов.

Согласно экспериментальным данным, при увеличении степени пластической деформации композиций наблюдается формирование трещин и расслоений в относительно крупных боридных частицах, что может способствовать их выкрашиванию и образованию дефектов в виде несплошностей, хотя до деформации дефектов в структуре не наблюдается (рис. 2). При увеличении степени пластической деформации происходит измельчение боридных частиц с их выстраиванием в направлении прокатки (рис. 2, *a*, *в*, *д*). Ха-

отическое расположение боридных частиц после вневакуумной электронно-лучевой наплавки (рис. 2, *a*) и текстура прокатки с ориентацией боридов (рис. 2, *в*, *д*) подтверждают предположение, высказанное выше. Под воздействием высоких температур (950 °С) и больших деформаций (80 %) измельченные бориды, не контактирующие с матричным материалом, становятся источниками дефектов структуры в виде сетки трещин и выкрашивания при приготовлении шлифов (рис. 2, *б*, *г*, *е*).

Кроме того, после горячей пластической деформации с увеличением степени деформации бориды неправильной геометрической формы (рис. 2, *б*) становятся более сглаженными за счет высоких температур и частичной диффузии элементов (рис. 2, *д*, *е*).

В соответствии с данными растровой электронной микроскопии (рис. 3, *a*, *б*) поверхность образца после максимальной пластической деформации характеризуется четко выраженными следами пластического течения и разрушением высокопрочных частиц боридов (рис. 3, *в*). Наблюдается также продольное уширение образцов (рис. 3, *г*) и текстура основного металла 12Х18Н9Т (рис. 3, *a*), которая является результатом высокой пластичности стали и подтверждается в дальнейшем рентгенофазовым анализом. Анализ изображений при максимальной пластической деформации показывает присутствие

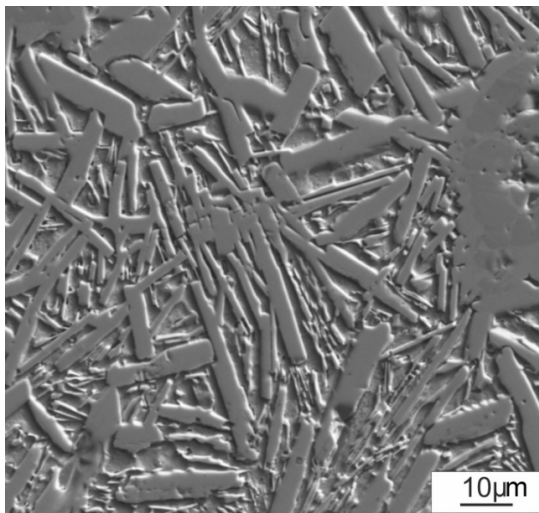
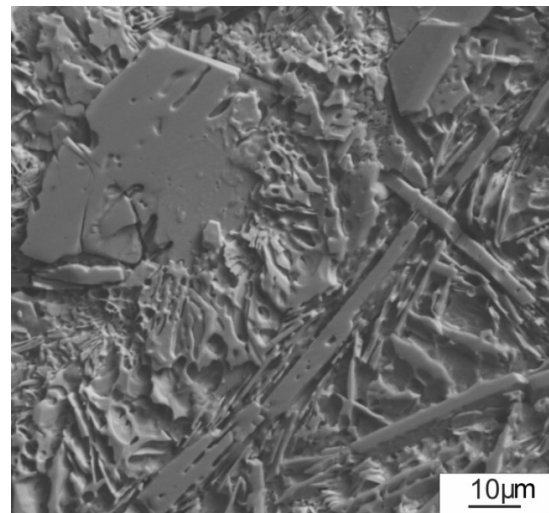
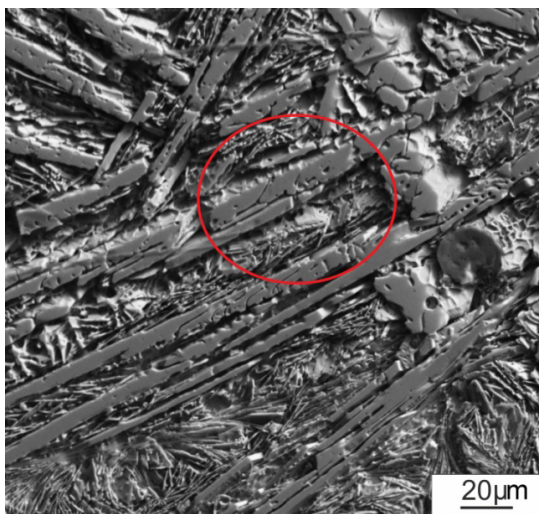
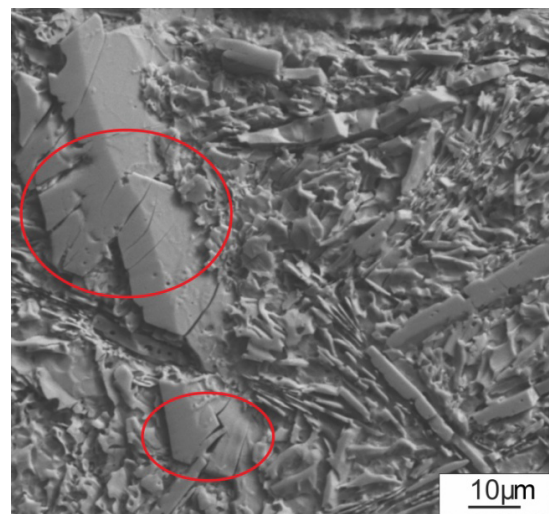
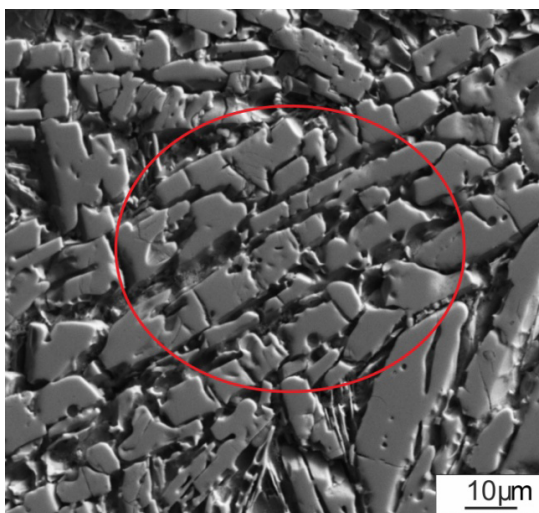
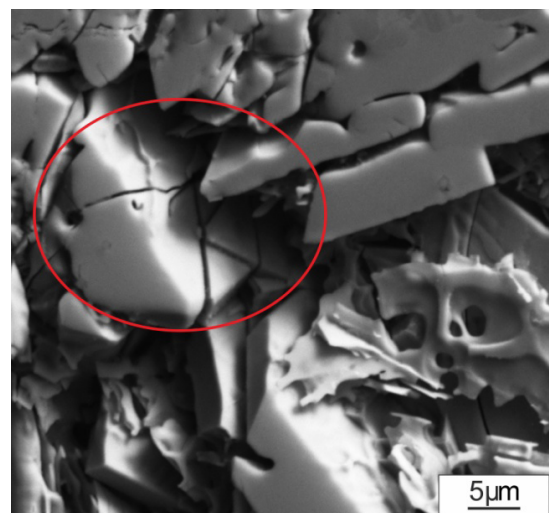

a

б

в

г

д

е

Рис. 2. Изменение формы боридных частиц в зависимости от степени пластической деформации: *a, б* – до пластической деформации; *в, г* – 30 %; *д, е* – 80 %. Красным овалом выделены места трещин, расслоений и несплошностей в боридных частицах

Fig. 2. Change in the shape of boride particles depending on the degree of plastic deformation: *a, б* – before plastic deformation; *в, г* – 30 %; *д, е* – 80 %. The places of cracks, delamination and discontinuities in boride particles are highlighted in a red oval

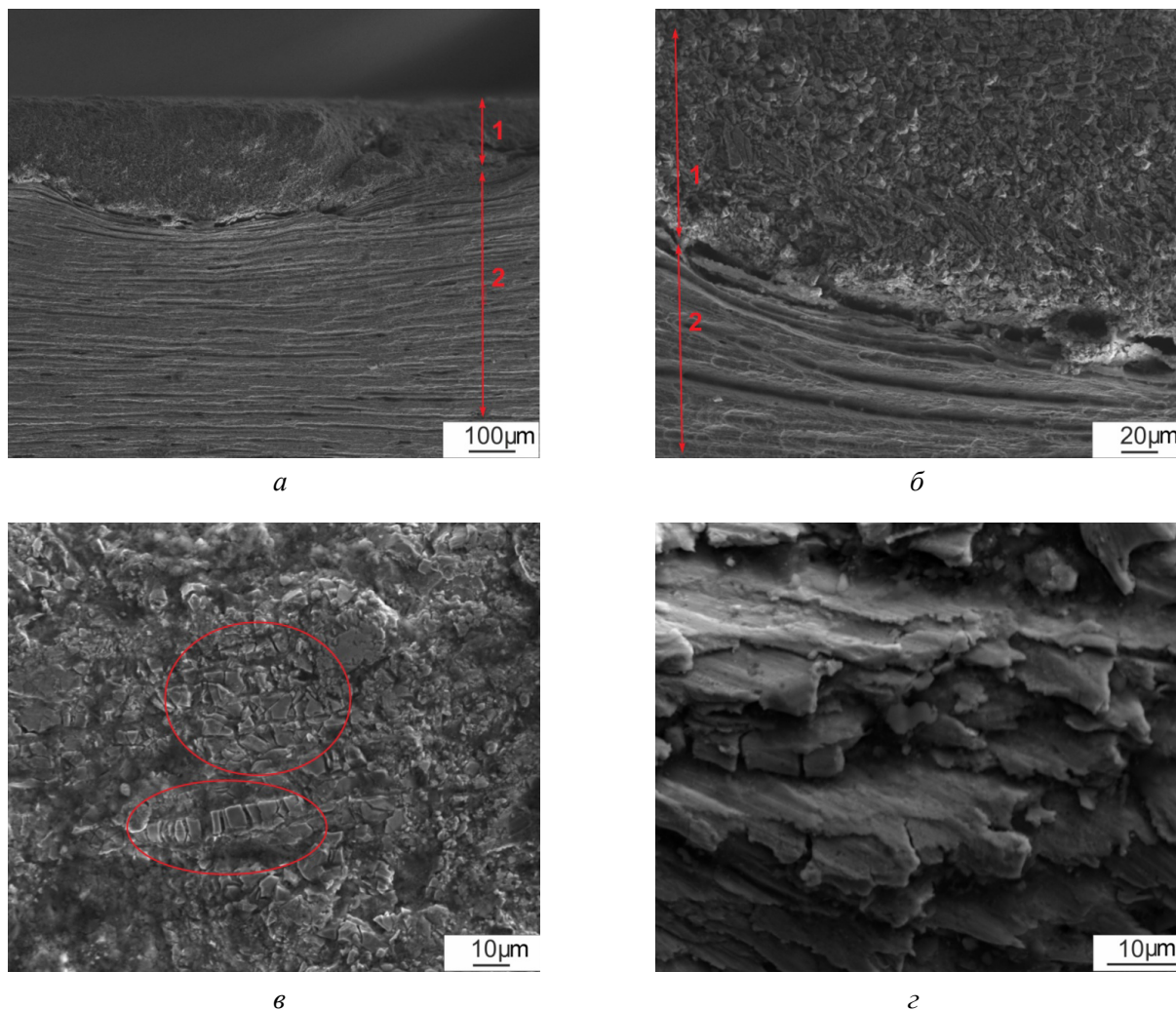


Рис. 3. Структура композиции после 80 % деформации и травления смесью кислот HNO_3 и HCl в соотношении 1:3 по объему, где 1 – модифицированный слой, 2 – основной металл: *а, б* – поперечный шлиф композиции после прокатки; *в* – структура модифицированного слоя с выделенными разрушенными боридами после пластической деформации; *г* – морфология боковой поверхности основного материала 12X18H9T вдоль прокатки

Fig. 3. The structure of the composition after 80 % deformation after etching with a mixture of HNO_3 and HCl acids in a ratio of 1:3 by volume, where 1 is the modified layer, 2 is the base metal: *а, б* – the transverse section of the composition after rolling; *в* – the structure of the modified layer, with isolated destroyed borides after plastic deformation; *г* – morphology of the side surface of the base material 0.12 C-18 Cr-9 Ni-Ti along the rolling direction

небольших трещин между модифицированным слоем и основным металлом в переходной зоне (рис. 2, б).

При более детальном рассмотрении переходной зоны (рис. 3, б) наблюдается текстура деформации, видны множественные бороздки и ямки травления. В модифицированном слое заметно частичное растрескивание высокопрочных частиц одновременно с их измельчением (рис. 3, в). Можно предположить, что такая структура образуется вследствие критических напряжений и сопутствующих им деформаций.

Толщина модифицированного слоя уменьшается от 2,5 мм (рис. 1, а) до 0,5 мм (рис. 3, а). Композиция в процессе деформации приобретает сложную слоистую морфологию и уменьшается по толщине в 7–8 раз (рис. 3, а).

Анализ результатов исследования показал, что пластическая деформация композиции начинается с основного материала, а затем продолжается в модифицированном слое. С увеличением степени обжатия бориды измельчаются по хрупкому механизму, а основной металл и матрица модифицированного слоя – преимущественно по

вязкому. Механизм разрушения высокопрочных частиц боридов и матрицы одинаков при всех степенях деформации. Начиная с 30 % деформации изменяется степень измельчения боридных частиц и продолжается их частичное разрушение с увеличением последующей прокатки.

Кроме того, при рассмотрении боридных частиц в матрице аустенита с использованием рентгеноспектрального анализа модифицированного слоя были зафиксированы высокие доли хрома в боридах, а также железа с никелем в матрице, что, предположительно, свидетельствует о диффузии бора из боридов в материал матрицы (рис. 4).

Для оценки механических свойств проводили измерение микротвердости образцов. Средняя микротвердость модифицированного слоя для образцов без деформации составляет 13 ГПа, 12 ГПа – для деформации 30 %, 11 ГПа – для деформации 80 %. Микротвердость хромоникелевой аустенитной стали 12X18H9T составляет

2,3 ГПа. Можно заметить, что чем больше степень деформирования композиции, тем меньше значения микротвердости, это объясняется измельчением высокопрочных частиц и образованием сетки мелких трещин между ними при нехватке в этих местах матричного материала.

Фазовый состав образцов определялся с использованием жесткого рентгеновского излучения с длиной волны 1,783 Å. На рентгенограммах наблюдаются только дифракционные пики фаз аустенита и сложных боридов (Fe_xCr_y)B (рис. 5). Анализ рентгенограмм позволяет ориентировочно проанализировать дефектность структуры по уширению рентгеновских линий. Пики уширяются с увеличением степени пластической деформации. При этом следует отметить уменьшение интенсивности пиков боридов относительно интенсивности пиков аустенита и текстурованность их распределения в аустенитной матрице, а также рост интенсивности дифракционных пиков 200 и 202 при степени дефор-

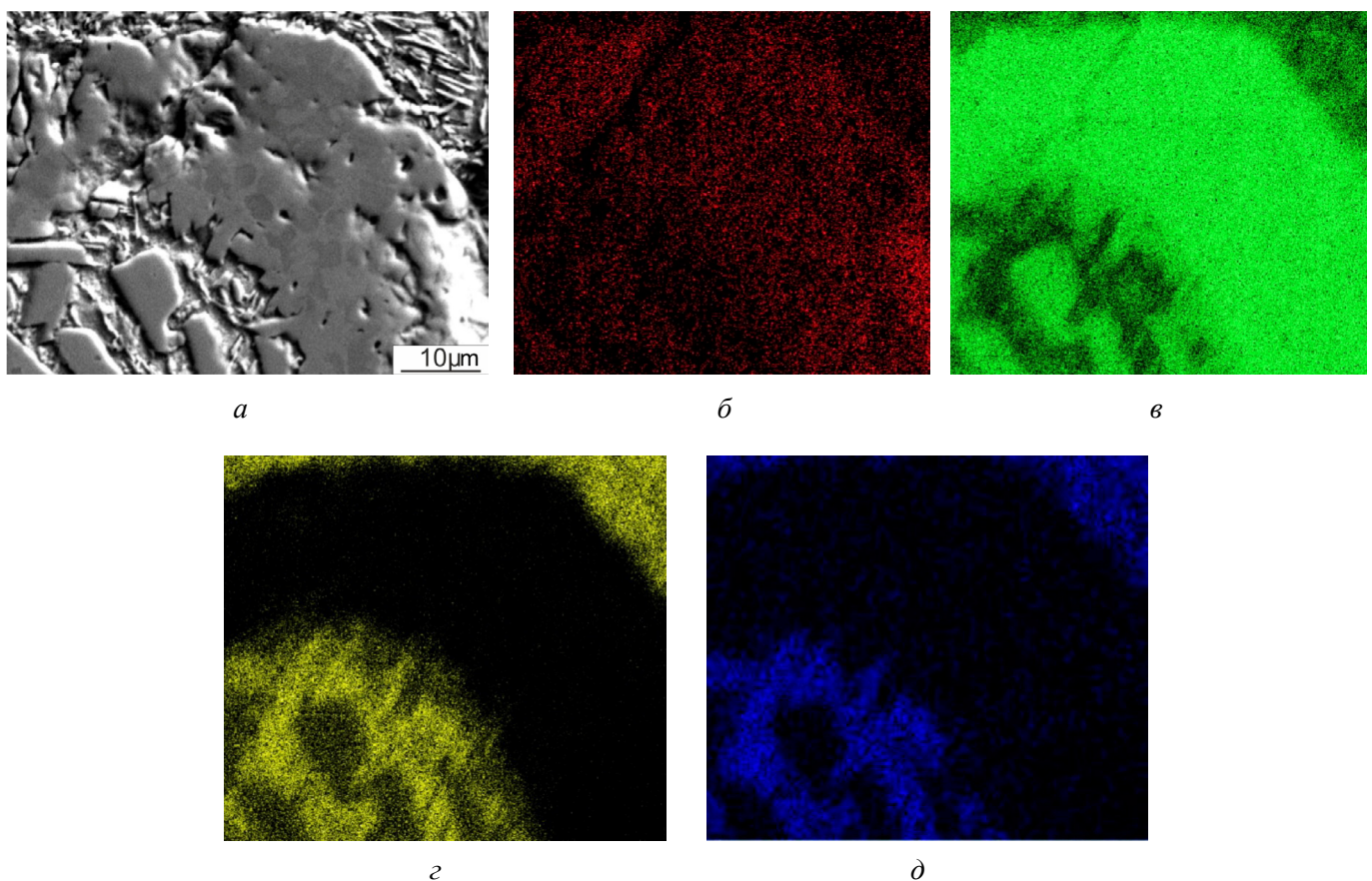


Рис. 4. Микрорентгеноспектральный анализ образцов при степени деформации 80 %:
 а – поверхность съемки; б – распределение В; в – распределение Cr; г – распределение Fe; д – распределение Ni

Fig. 4. Micro X-ray spectral analysis of specimens after 80 % deformation:
 а – shooting surface; б – B distribution; в – Cr distribution; г – Fe distribution; д – Ni distribution

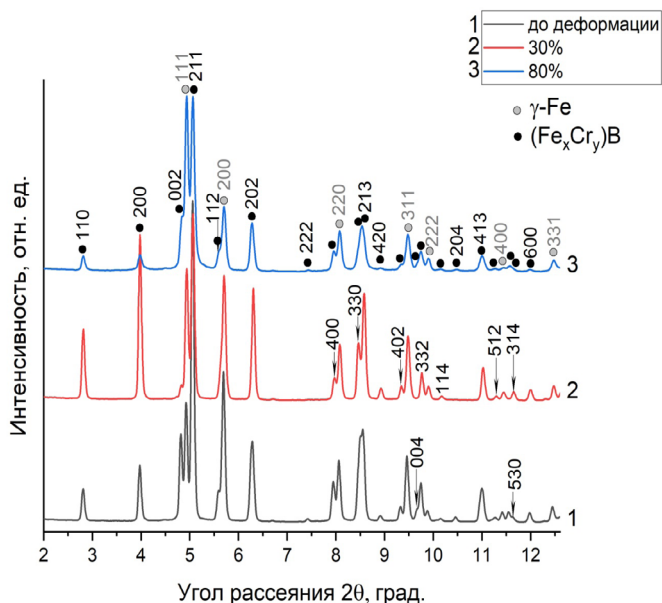


Рис. 5. Образцы после дифракции синхротронного излучения

Fig. 5. Specimens after synchrotron radiation diffraction

мации 30 %. В процессе после вневакуумной электронно-лучевой наплавки и последующей пластической деформации присутствует текстура, это означает, что образцы для синхротронных исследований были вырезаны и снимались с накоплением в разных токах, и в каком-то месте могла быть более выраженная текстура.

Для боридов наиболее развитыми плоскостями являются плоскости (110), (200), (002), (211) и (202).

Оценка ширины спектральной линии на половине высоты ее максимума (FWHM), или полуширина, позволяет только ориентировочно оценить дефектность структуры упрочняющей фазы модифицированного слоя из-за наличия множества факторов, влияющих на точность рассчитываемых параметров (возможная диффузия бора из упрочняющей фазы при горячей пластической деформации и появление текстуры).

В табл. 3 отражено изменение FWHM боридов и матрицы материала. Уширение интерференционных линий может быть связано с неоднородностью изменения межплоскостного расстояния за счет изменения химического состава фаз.

При степени пластической деформации 80 % значения FWHM максимальны как для матрицы, так и для боридов. FWHM минимальна для образцов до деформации при расчете матрицы и при 30 % – при расчете боридов. Можно предположить, что при степени деформации 30 % изменение полуширины пиков для боридов менее интенсивно, чем для аустенита. Это можно объяснить тем, что у аустенита пластичность матрицы выше, чем у боридов.

Таблица 3

Table 3

Изменение FWHM дифрактограмм модифицированных слоев после пластической деформации
Change in FWHM diffraction patterns of modified layers after plastic deformation

Угловая позиция 2θ, град.	FWHM при степени пластической деформации		
	0 %	30 %	80 %
Для аустенита			
4,94	0,068	0,070	0,076
5,71	0,073	0,079	0,091
8,08	0,075	0,077	0,092
9,48	0,077	0,080	0,089
9,90	0,076	0,084	0,081
Для боридов			
2,81	0,069	0,069	0,077
3,98	0,07	0,068	0,088
4,82	0,07	0,065	0,079
5,06	0,07	0,076	0,085
5,59	0,07	0,062	0,083
6,28	0,088	0,101	0,084

После пластической деформации характерно уменьшение параметров элементарной ячейки. Для аустенита характерна кубическая сингония с пространственной группой $Fm-3m$ (225), для борида – тетрагональная с $I4/mcm$ (140). Уменьшение параметров элементарной ячейки

аустенита может быть объяснено тем, что происходит замещение иона большего радиуса на ион с меньшим радиусом. Одновременно с этим изменяется объем элементарной ячейки борида, что, в свою очередь, указывает на увеличение содержания в нем атомов металла (табл. 4).

Таблица 4

Table 4

Изменение параметра решетки после горячей пластической деформации
Change in lattice parameter after hot plastic deformation

Параметр решетки	Параметр решетки при степени пластической деформации, Å		
	0 %	30 %	80 %
Для аустенита			
<i>a</i>	3,588	3,580	3,580
Для боридов			
<i>a</i>	5,126	5,113	5,111
<i>c</i>	4,228	4,238	4,199

Выводы

Результаты исследования влияния горячей пластической деформации на структуру и свойства композиции «модифицированный слой 10Cr-30В – хромоникелевая аустенитная сталь 12Х18Н9Т», полученной методом вневакуумной электронно-лучевой обработки (ВЭЛО), позволяют сделать ниже изложенные выводы.

1. Были получены образцы «модифицированный слой – основной металл» с применением технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых композиций на поверхность стали 12Х18Н9Т с последующей горячей пластической деформацией (ГПД) при температуре 950 °С. Модифицированный слой составлял 2,5 мм после ВЭЛО и примерно 0,5 мм после процесса ГПД до 80 %.

2. Структура модифицированного поверхностного слоя после горячей пластической деформации представляет собой композиционный материал с дисперсными частицами упрочняющей фазы в виде боридов $(Fe_xCr_y)B$. Переходный слой между этим материалом и основным металлом не имеет трещин и пор. Бориды в процессе пластической деформации измельчаются и ориентируются в сторону прокатки. По результатам дюрOMETрических исследований установлено, что микротвердость модифицированных слоев

после деформации в 6,5...5,5 раза (13...11 ГПа) выше микротвердости основного материала 12Х18Н9Т (2 ГПа), который выступал в качестве материала эталона. Для исключения выкрашивания частиц упрочняющей фазы модифицированного слоя необходимо повысить содержание в нем матричного материала за счет увеличения содержания в наплавляемой порошковой смеси хрома и уменьшения содержания бора.

3. Синхротронные методы исследования показали, что в модифицированном слое образуются сложные бориды типа $(Fe_xCr_y)B$, расположенные в γ -твердом растворе железа. С увеличением степени пластической деформации происходит уширение дифракционных максимумов и увеличение объема элементарных ячеек аустенита и боридов за счет накопления дефектов в кристаллической решетке.

Список литературы

1. Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel / I.A. Bataev, A.A. Bataev, A.Y. Teplykh, 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.

2. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding / I.A. Bataev, A.A. Bataev, M.G. Golkovsky, D.S. Krivizhenko,



A.A. Losinskaya, O.G. Lenivtseva // Applied Surface Science. – 2013. – Vol. 284. – P. 472–481. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121.

3. 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 and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 386. – P. 125466. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125466.

4. Challenges in optimizing the resistance to corrosion and wear of amorphous Fe-Cr-Nb-B alloy containing crystalline phases / G.Y. Koga, T. Ferreira, Y. Guo, D.D. Coimbra, A.M. Jorge Jr, C.S. Kiminami, C. Bolfarini, W.J. Botta // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2021. – Vol. 555. – P. 120537. – DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120537.

5. Влияние исходного состояния на неоднородность структуры углеродистых сталей, упрочненных методом электронно-лучевой обработки при атмосферном давлении / Е.А. Батаева, И.А. Батаев, В.Г. Буров, Л.И. Тушинский, М.Г. Голковский // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2009. – № 3 (645). – С. 3–5.

6. Structure and tribological properties of steel after non-vacuum electron beam cladding of Ti, Mo and graphite powders / I.A. Bataev, D.O. Mul, A.A. Bataev, O.G. Lenivtseva, M.G. Golkovski, Ya.S. Lizunkova, R.A. Dostovalov // Materials Characterization. – 2016. – Vol. 112. – P. 60–67. – DOI: 10.1016/j.matchar.2015.11.028.

7. 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.

8. Structure and oxidation behavior of CoCrFeNiX (where X is Al, Cu, or Mn) coatings obtained by electron beam cladding in air atmosphere / A.A. Ruktuev, D.V. Lazurenko, T.S. Ogneva, R.I. Kuzmin, M.G. Golkovski, I.A. Bataev // Surface and Coatings Technology. – 2022. – Vol. 448. – P. 128921. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128921.

9. Ogneva T., Ruktuev A., Girsh A. Non-vacuum electron beam cladding of Ti-Ni-Al intermetallics on titanium // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 11. – P. 191–196. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.12.130.

10. Structure and tribological properties of “carbon steel – VC containing coating” compositions formed by non-vacuum electron-beam surfacing of vanadium-containing powder mixtures / D.O. Mul, E.G. Bushueva, D.V. Lazurenko, E.A. Lozhkina, E.V. Domarov // Sur-

face and Coatings Technology. – 2023. – Vol. 474. – P. 130107. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.130107.

11. Structural characterization of layers fabricated by non-vacuum electron beam cladding of Ni-Cr-Si-B self-fluxing alloy with additions of niobium and boron / T.A. Zimogliadova, A.A. Bataev, D.V. Lazurenko, I.A. Bataev, V.A. Bataev, M.G. Golkovskii, S. Holger, T.S. Ogneva, A.A. Ruktuev // Materials Today Communications. – 2022. – Vol. 33. – P. 104363. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104363.

12. Al-Co-Cr-Fe-Ni high-entropy coatings produced by non-vacuum electron beam cladding: Understanding the effect of Al by in-situ synchrotron X-ray diffraction / T.S. Ogneva, K.I. Emurlaev, K.E. Kuper, Y.N. Malyutina, E.V. Domarov, I.K. Chakin, K.A. Skorokhod, A.A. Ruktuev, I.E. Nasennik, I.A. Bataev // Applied Surface Science. – 2024. – Vol. 665. – P. 160367. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.160367.

13. Boride coatings structure and properties, produced by atmospheric electron-beam cladding / A. Teplykh, M. Golkovskiy, A. Bataev, E. Drobyaz, 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.

14. Формирование упрочняющих покрытий наплавкой в пучке релятивистских электронов / И.М. Полетика, М.Г. Голковский, М.Д. Борисов, Р.А. Салимов, М.В. Перовская // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8, спец. вып. – С. 129–132.

15. Структура и свойства покрытий, полученных электронно-лучевой наплавкой / И.М. Полетика, Ю.Ф. Иванов, М.Г. Голковский, М.В. Перовская // Физика и химия обработки материалов. – 2007. – № 6. – С. 48–56.

16. Guo C., Kelly P.M. Boron solubility in Fe–Cr–B cast irons // Materials Science and Engineering: A. – 2003. – Vol. 352. – P. 40–45. – DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00449-5.

17. Yuan L.L., Han J.T., Liu J. Analysis of boride phase composition in high boron alloyed stainless steel containing titanium // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 941–944. – P. 226–231. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.941-944.226.

18. Ван Хуэй, Ван Тао. Влияние горячей прокатки и обработки на твердый раствор на микроструктуру и механические свойства дуплексной нержавеющей стали 0Cr21Ni5Ti-2В с высоким содержанием бора // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2021. – № 3 (789). – С. 13–18.

19. Влияние прокатки и термической обработки на структуру и свойства слоев, сформированных на титановых заготовках методом электронно-лучевой наплавки / В.В. Самойленко, Д.В. Лазуренко, И.А. По-

ляков, А.А. Руктуев, О.Г. Ленивцева, В.С. Ложкин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – № 2 (67). – С. 55–63. – DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-55-63.

20. Structure and mechanical properties of a two-layered material produced by the E-beam surfacing of Ta and Nb on the titanium base after multiple rolling / V.A. Bataev, M.G. Golkovski, V.V. Samoilenko,

A.A. Ruktuev, I.A. Polyakov, N.K. Kuksanov // Applied Surface Science. – 2018. – Vol. 437. – P. 181–189. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.12.114.

21. The fast azimuthal integration Python library: pyFAI / G. Ashiotis, A. Deschildre, Z. Nawaz, J.P. Wright, D. Karkoulis, F.E. Picca, J. Kieffer // Journal of Applied Crystallography. – 2015. – Vol. 48 (2). – P. 510–519. – DOI: 10.1107/S1600576715004306.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 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>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



The effect of hot plastic deformation on the structure and properties of surface-modified layers after non-vacuum electron beam surfacing of a powder mixture of composition 10Cr-30B on steel 0.12 C-18 Cr-9 Ni-Ti

Alina Dudareva^{1, a, *}, Evdokia Bushueva^{1, b}, Andrey Tyurin^{1, c}, Evgeny Domarov^{2, d},
 Igor Nasennik^{1, 4, e}, Vladislav Shikalov^{3, f}, Ksenia Skorokhod^{3, g}, Alexander Legkodymov^{2, 4, h}

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

² Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 11 Acad. Lavrentieva Pr., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³ Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

⁴ “Federal Research Center” G.K. Boreskov Institute of Catalysis of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Center for Collective Use “Siberian Ring Photo Source”, 1 Nikolsky ave., Koltsovo village, Novosibirsk region, 1630559, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0009-0001-5649-7090>, dudareva-alina@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0001-7608-734X>, bushueva@corp.nstu.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0003-4757-424X>, a.tyurin@corp.nstu.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0003-2422-1513>, domarov88@mail.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0003-0937-5004>, nasennik.2017@corp.nstu.ru; ^f <https://orcid.org/0000-0002-0491-2803>, v.shikalov@gmail.com;

^g <https://orcid.org/0000-0003-0210-8405>, k.skorokhod@itam.nsc.ru; ^h <https://orcid.org/0000-0001-7405-7454>, a_legkodymov@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 06 September 2024

Revised: 20 September 2024

Accepted: 08 October 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

Austenitic Ni-Cr steel

Electron beam surfacing

Hot plastic deformation

Synchrotron radiation

Boron

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. Currently, austenitic Ni-Cr steels are widely used in the oil and gas industry for drilling wells due to its high corrosion resistance, non-magnetic properties, high impact strength, ductility and weldability. However, in order to increase the service life of products, it is necessary to increase the abrasive resistance of the surface layers while maintaining chemical resistance, which is a difficult technological task. The solution to such a problem can be the creation of sheet blanks “austenitic Ni-Cr steel - modified layer” subjected to hot plastic deformation. **The purpose of the work** is to study the effect of hot plastic deformation on the structure and phase composition of “modified layer – base metal” compositions obtained by the method of non-vacuum electron beam surfacing of a powder mixture of boron and chromium on austenitic Ni-Cr steel 0.12 C-18 Cr-9 Ni-Ti. **Material and methods of research.** The work investigated specimens made of steel 0.12 C-18 Cr-9 Ni-Ti with a modified 10Cr-30B layer formed by non-vacuum electron beam surfacing of a powder mixture of chromium and boron, and subsequent hot plastic deformation at a temperature of 950 °C. The research methods are mechanical tests for microhardness, X-ray spectral analysis of the modified layer, metallographic studies, profile analysis, calculation of lattice parameters. **Results and discussion.** It is revealed that after deformation, defect-free compositions are obtained, the surface layer of which is a matrix composite material containing oriented chromium carbide particles with altered crystal lattice parameters. After plastic deformation, cracks and delamination are not recorded, which allows us to speak about the high quality of the “modified layer – base metal” compositions with increased hardness values exceeding 6.5 times as-delivered steel 0.12 C-18 Cr-9 Ni-Ti (3...11 GPa and 2 GPa, respectively). In the modified layer, complex borides of type $(Fe_xCr_y)B$ are formed and located in a γ -solid solution of iron. The lattice parameter decreases for γ -iron from 3.588 Å to 3.580 Å, for boride parameter *a* from 5.126 Å to 5.111 Å, parameter *c* from 4.228 Å to 4.199 Å.

For citation: Dudareva A.A., Bushueva E.G., Tyurin A.G., Domarov E.V., Nasennik I.E., Shikalov V.S., Skorokhod K.A., Legkodymov A.A. The effect of hot plastic deformation on the structure and properties of surface-modified layers after non-vacuum electron beam surfacing of a powder mixture of composition 10Cr-30B on steel 0.12 C-18 Cr-9 Ni-Ti. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 192–205. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-192-205. (In Russian).

* Corresponding author

Dudareva Alina A., Ph.D. (Engineering) student, Research assistant
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 630073, Novosibirsk, Russian Federation
Tel.: +7 913 707-63-44, **e-mail:** dudareva-alina@mail.ru

References

1. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovsky M.G., Teplykh A.Yu., Burov V.G., Veselov S.V. Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 207, pp. 245–253. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.06.081.
2. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovski M.G., Krivizhenko D.S., Losinskaya A.A., Lenivtseva O.G. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding. *Applied Surface Science*, 2013, vol. 284, pp. 472–481. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121.
3. 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 and Coatings Technology*, 2020, vol. 386, p. 125466. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125466.
4. Koga G.Y., Ferreira T., Guo Y., Coimbrao D.D., Jorge Jr A.M., Kiminami C.S., Bolfarini C., Botta W.J. Challenges in optimizing the resistance to corrosion and wear of amorphous Fe-Cr-Nb-B alloy containing crystalline phases. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2021, vol. 555, p. 120537. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120537.
5. Bataeva E.A., Bataev I.A., Burov V.G., Tushinskii L.I., Golkovskii M.G. Vliyanie iskhodnogo sostoyaniya na neodnorodnost' struktury uglerodistykh stalei, uprochnennykh metodom elektronno-luchevoi obrabotki pri atmosfernom davlenii [The effect of initial state on the structure inhomogeneity of carbon steels strengthened by electron-beam treatment at atmospheric pressure]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2009, no. 3 (645), pp. 3–5. (In Russian).
6. Bataev I.A., Mul D.O., Bataev A.A., Lenivtseva O.G., Golkovski M.G., Lizunkova Ya.S., Dostovalov R.A. Structure and tribological properties of steel after non-vacuum electron beam cladding of Ti, Mo and graphite powders. *Materials Characterization*, 2016, vol. 112, pp. 60–67. DOI: 10.1016/j.matchar.2015.11.028.
7. 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. Tribo-oxidation 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.
8. Ruktuev A.A., Lazurenko D.V., Ogneva T.S., Kuzmin R.I., Golkovski M.G., Bataev I.A. Structure and oxidation behavior of CoCrFeNiX (where X is Al, Cu, or Mn) coatings obtained by electron beam cladding in air atmosphere. *Surface and Coatings Technology*, 2022, vol. 448, p. 128921. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128921.
9. Ogneva T., Ruktuev A., Girsh A. Non-vacuum electron beam cladding of Ti-Ni-Al intermetallics on titanium. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 11, pp. 191–196. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.12.130.
10. Mul D.O., Bushueva E.G., Lazurenko D.V., Lozhkina E.A., Domarov E.V. Structure and tribological properties of “carbon steel – VC containing coating” compositions formed by non-vacuum electron-beam surfacing of vanadium-containing powder mixtures. *Surface and Coatings Technology*, 2023, vol. 474, p. 130107. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.130107.
11. Zimogliadova T.A., Bataev A.A., Lazurenko D.V., Bataev I.A., Bataev V.A., Golkovskii M.G., Holger S., Ogneva T.S., Ruktuev A.A. Structural characterization of layers fabricated by non-vacuum electron beam cladding of Ni-Cr-Si-B self-fluxing alloy with additions of niobium and boron. *Materials Today Communications*, 2022, vol. 33, p. 104363. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104363.
12. Ogneva T.S., Emurlaev K.I., Kuper K.E., Malyutina Yu.N., Domarov E.V., Chakin I.K., Skorokhod K.A., Ruktuev A.A., Nasennik I.E., Bataev I.A. Al-Co-Cr-Fe-Ni high-entropy coatings produced by non-vacuum electron beam cladding: Understanding the effect of Al by in-situ synchrotron X-ray diffraction. *Applied Surface Science*, 2024, vol. 665, p. 160367. DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.160367.
13. 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.
14. Poletika I.M., Golkovskii M.G., Borisov M.D., Salimov R.A., Perovskaya M.V. Formirovanie uprochnyayushchikh pokrytii naplavkoi v puchke relyativistskikh elektronov [Fusion of hardening coatings in a relativistic electron beam]. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, 2005, vol. 8, special. iss., pp. 129–132. (In Russian).
15. Poletika I.M., Ivanov Yu.F., Golkovskii M.G., Perovskaya M.V. Struktura i svoistva pokrytii, poluchennykh elektronno-luchevoi naplavkoi [Structure and properties of the coatings produced by electron-beam overlaying welding]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2007, no. 6, pp. 48–56. (In Russian).
16. Guo C., Kelly P.M. Boron solubility in Fe–Cr–B cast irons. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, vol. 352, pp. 40–45. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00449-5.



17. Yuan L.L., Han J.T., Liu J. Analysis of boride phase composition in high boron alloyed stainless steel containing titanium. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 941–944, pp. 226–231. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.941-944.226.

18. Wang H., Wang T. Vliyanie goryachei prokatki i obrabotki na tverdyi rastvor na mikrostrukturu i mekhanicheskie svoystva dupleksnoi nerzhavayushchei stali 0Cr21Ni5Ti-2B s vysokim sodержaniem bora [Influence of hot rolling and solution treatment on the microstructure and mechanical properties of high boron duplex stainless steel 0Cr21Ni5Ti-2B]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2021, no. 3 (789), pp. 13–18. (In Russian).

19. Samoilenko V.V., Lazurenko D.V., Polyakov I.A., Ruktuev A.A., Lenivtseva O.G., Lozhkin V.S. Vliyanie prokatki i termicheskoi obrabotki na strukturu i svoystva sloev, sformirovannykh na titanovykh zagotovkakh metodom elektronno-luchevoi naplavki [Influence of rolling and heat treatment on the structure and properties of the coatings fabricated on the titanium substrates by electron beam cladding]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2015, no. 2 (67), pp. 55–63. DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-55-63.

20. Bataev V.A., Golkovski M.G., Samoilenko V.V., Ruktuev A.A., Polyakov I.A., Kuksanov N.K. Structure and mechanical properties of a two-layered material produced by the E-beam surfacing of Ta and Nb on the titanium base after multiple rolling. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 437, pp. 181–189. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.12.114.

21. Ashiotis G., Deschildre A., Nawaz Z., Wright J.P., Karkoulis D., Picca F.E., Kieffer J. The fast azimuthal integration Python library: pyFAI. *Journal of Applied Crystallography*, 2015, vol. 48 (2), pp. 510–519. DOI: 10.1107/S1600576715004306.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 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>).