



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Поверхностное упрочнение сплава ВТ1-0 с использованием технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей

Ольга Ленивецова^{1, а}, Александр Токарев^{2, б}, Иван Чакин^{3, с}, Сергей Буров^{4, д, *},
 Юлия Худорожкова^{4, е}

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

² Сибирский государственный университет водного транспорта, ул. Щетинкина, 33, г. Новосибирск, 630099, Россия

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

⁴ Институт машиноведения УрО РАН, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0003-2471-3286>, lenivtseva_olga@mail.ru, ^б <http://orcid.org/0000-0002-2841-3689>, aot51@ngs.ru,

^с <https://orcid.org/0000-0003-0529-2017>, chak_in2003@bk.ru, ^д <https://orcid.org/0000-0002-0413-1054>, burchitai@mail.ru,

^е <https://orcid.org/0000-0003-3832-1419>, khjv@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.92

История статьи:

Поступила: 28 февраля 2018

Рецензирование: 28 марта 2018

Принята к печати: 04 мая 2018

Доступно онлайн: 15 июня 2018

Ключевые слова:

Сплав ВТ1-0

Электронно-лучевая обработка

Покрытие

Карбид бора

Карбид титана

Борид титана

Триботехнические свойства

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-33-60066 мол_а_дк.

АННОТАЦИЯ

Введение. В современном машиностроении для реализации многих задач, связанных с модификацией структуры поверхностных слоев металлических материалов, все чаще применяют высокотемпературные источники нагрева. Структурные преобразования, происходящие при их использовании, позволяют повысить прочностные, коррозионные и триботехнические свойства металлов. Титан и сплавы на его основе нашли широкое применение в современной промышленности, однако более широкое их распространение ограничено высоким коэффициентом трения и низкой стойкостью к изнашиванию. Проблеме упрочнения титана и его сплавов при использовании высокотемпературных источников нагрева уделяется недостаточное внимание. Анализ работ, связанных с высокоскоростным нагревом сплавов на основе титана, показал, что в качестве инструмента для поверхностного нагрева чаще всего используется лазерный луч. Функцию основного материала преимущественно выполняет титановый сплав Ti-6Al-4V. Высокой твердостью и износостойкостью обладают образцы, полученные при наплавке порошковых смесей, содержащих диборид титана (TiB₂) и карбид бора (B₄C). Однако толщина сформированных таким образом покрытий не превышает 1 мм. При необходимости получения модифицированных слоев повышенной толщины рационально использовать метод электронно-лучевой обработки материалов в воздушной среде. **Целью** работы являлось изучение возможности наплавки порошковой смеси, содержащей карбид бора, для модифицирования поверхностных слоев технически чистого титана методом вневакуумной электронно-лучевой обработки. **Методы.** В качестве материала основы использовали титановый сплав ВТ1-0, пластины которого обрабатывали высококонцентрированным электронным лучом, выведенным в воздушную атмосферу. Для формирования частиц высокопрочной фазы в поверхностных слоях использовали порошковые смеси с различным содержанием порошка карбида бора (10, 20 и 30 вес. %). Модифицированные материалы анализировали методами оптической и растровой электронной микроскопии. Исследования износостойкости проводили в условиях трения о закрепленные и нежестко закрепленные частицы абразива. **Результаты и обсуждение.** Механические и триботехнические свойства модифицированных слоев титана в значительной мере определяются структурными преобразованиями, происходящими в поверхностных слоях материала. Обработка титанового сплава высококонцентрированным электронным лучом в воздушной среде позволяет получать модифицированные слои толщиной более 1 мм. Наплавка порошковой смеси, содержащей карбид бора, приводит к формированию в поверхностно-легированных слоях высокопрочных частиц, оказывающих существенное влияние на свойства основного материала. Введение в наплавочную смесь 10 вес. % порошка карбида бора позволяет получить качественные слои, содержащие мелкодисперсные частицы моноборида и карбида титана. Объемная доля высокопрочной фазы в этих слоях составляет ~ 20 %. Повышение концентрации карбида бора в исходной порошковой смеси до 30 вес. % приводит к образованию в структуре модифицированных слоев крупных первичных кристаллов борида титана и карбида титана дендритной морфологии. Увеличение концентрации B₄C приводит также к росту объемной доли упрочняющей фазы до 40...44 %. Характерной особенностью этих образцов является присутствие конгломератов мелкодисперсных частиц в нижней зоне покрытия. Средний уровень микротвердости упрочненных слоев достигает 4250...6400 МПа. В условиях трения о закрепленные частицы абразива максимальная износостойкость, превышающая в 2,4 раза аналогичный показатель эталонного образца, зафиксирована в процессе испытания сплава, полученного при наплавке смеси с 30 вес. % B₄C. Эти же образцы показали восьмикратный рост значений износостойкости при воздействии на материал нежестко закрепленных частиц абразива.

Для цитирования: Поверхностное упрочнение сплава BT1-0 с использованием технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей / О.Г. Ленивцева, А.О. Токарев, И.К. Чакин, С.В. Буров, Ю.В. Худорожкова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 116–129. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-116-129.

***Адрес для переписки**

Буров Сергей Владимирович, к.т.н.,
Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук
ул. Комсомольская, 34,
620049, г. Екатеринбург, Россия
Тел.: 8 (343) 362-30-17, e-mail: burchitai@mail.ru

Введение

В последние десятилетия многие актуальные задачи современного материаловедения успешно решаются при реализации процессов, основанных на применении плазмы, лазерного и электронного луча. Изменение комплекса свойств поверхностных слоев титановых сплавов обусловлено преобразованиями структуры, формированием в них высокопрочных частиц, в том числе карбидов, боридов и частиц иной природы.

Для решения многих задач, связанных с модификацией структуры поверхностных слоев материалов, специалисты широко используют плазменные технологии. Разработаны плазменные покрытия, характеризующиеся повышенной прочностью, износостойкостью в различных условиях внешнего воздействия. Однако во многих случаях формируемые покрытия обладают высокой пористостью и низким уровнем адгезионных свойств.

Модифицирование плазменными технологиями поверхностных слоев на заготовках из титанового сплава достаточно редко [1–5]. Лишь в некоторых случаях цели поверхностной обработки связаны с повышением триботехнических свойств титана [4–6]. Результатом обработки плазменными технологиями титанового сплава, представленным в патенте [7], является увеличение уровня твердости в 1,3...1,4 раза и снижение коэффициента трения в 1,5...2,1 раза.

Обработка лазерным лучом позволяет сформировать высокопрочные слои, обеспечивающие повышение износостойкости, усталостной и контактно-усталостной долговечности металлических материалов [8–14]. В то же время следует учитывать ограничения, характерные для этих процессов. Известно, что металлические заготовки с гладкой поверхностью поглощают лишь 3...7 % лазерного излучения. Толщина по-

крытий, получаемых методом лазерного оплавления, достигает 1 мм.

Авторами работы [8] описаны особенности наплавки порошков B_4C и C в среде азота на титановый сплав Ti-6Al-4V (аналог российского BT6). Результаты исследований свидетельствуют о формировании поверхностных слоев толщиной ~0,8 мм с твердостью до 1060...1358 HV. Особенности упрочнения титанового сплава Ti-6Al-4V частицами $TiC_{0.3}N_{0.7}$ и TiB отражены в работе [9].

При необходимости формирования поверхностно упрочненных слоев толщиной до 3 мм с высокой производительностью обращаются к технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей. Проведена экспериментальная оценка возможностей обработки сплавов на основе титана. Подробно изучены слои, сформированные при наплавке порошковых смесей Mo-WC, графит-Si, SiC и TiC [15–17]. По данным литературных исследований в процессах вневакуумной электронно-лучевой обработки порошковых соединений TiB_2 и B_4C применялись лишь при наплавке на заготовки из сплава Ti-6Al-4V [18–21].

Kwang Jun Euh с соавторами [18] отмечают, что в результате электронно-лучевой наплавки в воздушной среде порошков диборида титана и борида молибдена были получены поверхностно-легированные слои толщиной 1,5 мм, показатели твердости и износостойкости которых в 2...3 раза выше по сравнению с основным материалом. В соответствии с экспериментальными данными, представленными в работе [19], результатом наплавки порошковой смеси ($Ti + TiB_2 + B_4C$) на титановый сплав Ti-6Al-4V является рост износостойкости материала в диапазоне от 6 до 9 раз.

Цель работы заключалась в изучении возможности применения технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых

смесей, содержащих карбид бора, для поверхностного упрочнения заготовок из технического чистого титана.

Задачей являлось установление зависимости сформированных структур в поверхностных слоях титанового сплава BT1-0 методом электронно-лучевой обработки в воздушной атмосфере с механическими и триботехническими свойствами полученных материалов.

Методика исследований

Для обработки методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки применялись плоские заготовки из технического чистого титана BT1-0 размером 100×50×12 мм. В качестве наплавочных материалов применялись порошковые смеси, в состав которых входили 10, 20, 30 вес. % карбида бора (средний размер частиц ~ 20 мкм) и 40, 30, 20 вес. % титана (средний размер частиц ~ 100 мкм). С целью защиты расплава от кислорода воздуха в порошковую смесь добавляли 40 вес. % CaF_2 и 10 вес. % LiF .

При выполнении экспериментов было реализовано три режима наплавки (табл. 1). Изменяемым параметром являлась концентрация наплавляемого порошка карбида бора (10, 20, 30 вес. %).

Вневакуумную электронно-лучевую наплавку осуществляли с использованием промышленного ускорителя электронов ЭЛВ-6 в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск) [22]. Разработанная специалистами

трехступенчатая система откачки воздуха позволяла выводить сформированный в колонне электронный пучок в воздушную среду и контролировать их положение в атмосфере [23]. Обработка металлических материалов электронным лучом накладывала определенные требования, в том числе необходимость применения дорогостоящих вакуумных камер. Возможность выводить высококонцентрированный пучок электронов в воздушную атмосферу позволила снять данные ограничения [22]. Основными достоинствами ускорителя электронов ЭЛВ-6 являются высокий коэффициент полезного действия установки, малое рассеивание энергии, высокая производительность, возможность формирования поверхностно-легированных слоев повышенной толщины. Дополнительные параметры, характеризующие особенности наплавки порошковых смесей, приведены в табл. 2.

Металлографические исследования проводились на микроскопе *Carl Zeiss Axio Observer Z1m*. Для определения элементного состава частиц различных фаз материала использовался микрорентгеноспектральный анализатор типа *X-ACT (Oxford Instruments)*. Оценка объемной доли и морфологии упрочняющих частиц осуществлялась на нетравленных шлифах с использованием программного приложения *Image J*.

Фазовый анализ покрытий был проведен на дифрактометре *ARL X'TRA* с использованием $\text{Cu K}\alpha$ -излучения. Дифракционные картины регистрировались в шаговом режиме с интервалом

Таблица 1

Table 1

Составы порошковых смесей и режимы обработки
Compositions of powder mixtures and treatment regimes

Номер режима/ Mode number	Маркировка образца/ Sample designation	Состав наплавочной смеси, % (вес.) / Composition of the surfacing mixture, % (wt.)	Ток пучка, мА / Beam current, mA	Скорость перемещения образца, мм/с / Speed of sample movement, mm/s	Плотность насыпки, г/см ² / Density of powder mixtures, g/cm ²
1	«Ti-10B ₄ C»	Ti + B ₄ C + CaF ₂ +LiF (40 + 10 + 40 + 10)	28	25	0,2
2	«Ti-20B ₄ C»	Ti + B ₄ C + CaF ₂ +LiF (30 + 20 + 40 + 10)			
3	«Ti-30B ₄ C»	Ti + B ₄ C + CaF ₂ +LiF (20 + 30 + 40 + 10)			

Таблица 2

Table 2

Параметры наплавки порошковых смесей
Cladding parameters of powders mixture

Энергия пучка электронов / Electron beam energy	1,4 МэВ
Расстояние от выпускного отверстия / Distance from the outlet	90 мм
Гауссовский диаметр пучка электронов / Gauss electron beam diameter	12 мм
Частота сканирования пучка электронов / Electron beam scanning frequency	50 Гц
Энергия пучка электронов / Electron beam energy	50 мм

$\Delta 2\theta = 0,05^\circ$. Время накопления сигнала на одну точку составляло 12 с. Идентификация фаз, присутствующих в наплавленных слоях, осуществлялась на основании базы данных *PDF-4*.

Микротвердость наплавленных слоев оценивали с использованием микротвердомера *Wolpert Group 402MVD*. Измерения выполнялись на поперечных шлифах в направлении от поверхности к основному металлу по результатам измерения отпечатков на пяти дорожках с шагом 100 мкм. В качестве индентора применялась четырехгранная алмазная пирамида. Нагрузка на индентор составляла 0,98 Н.

Показателями качества полученных в работе материалов являлись значения их стойкости в условиях воздействия закрепленных и нежестко закрепленных частиц абразива. Для испытаний на трение о закрепленные частицы абразива были подготовлены цилиндрические образцы диаметром 2,5 мм и высотой 12 мм. Абразивом был карбид кремния с размерами частиц от 80 до 100 мкм. В процессе испытаний образцы с усилием 3 Н прижимались к вращающемуся стальному диску диаметром 225 мм с закрепленной на нем абразивной бумагой и перемещались при этом в радиальном направлении. Сочетание отмеченных видов движения обеспечивало траекторию движения образца относительно диска в форме спирали Архимеда. В качестве эталона использовался титановый сплав ВТ1-0. Значения износостойкости исследуемых материалов рассчитывали в соответствии с соотношением

$$\varepsilon = \frac{\Delta m_{\text{э}}}{\Delta m_{\text{и}}} \frac{\rho_{\text{и}}}{\rho_{\text{э}}}$$

где $\rho_{\text{и}}$, $\rho_{\text{э}}$ – значение плотности исследуемого и эталонного образцов; $\Delta m_{\text{и}}$, $\Delta m_{\text{э}}$ – потеря массы исследуемого и эталонного образцов.

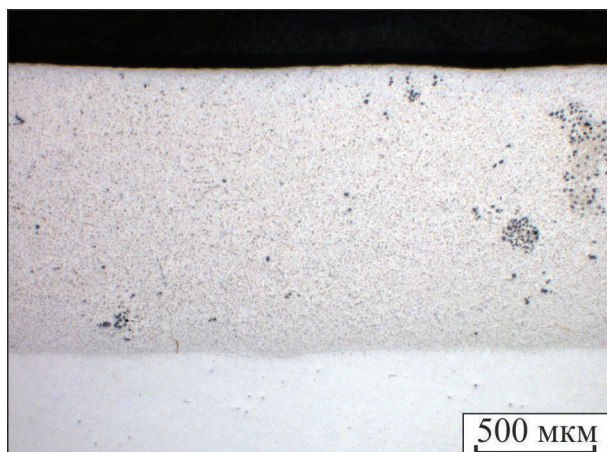
Испытания материалов при трении в условиях воздействия нежестко закрепленных абразивных частиц были выполнены по ГОСТ 23.208–79. В соответствии со стандартом образцы изнашивались речным песком при его перемещении резиновым роликом, вращающимся с частотой 60 об/мин. Усилие прижатия ролика к поверхности образца было равно 44 Н. Общий путь трения составил 942 м. Критерием поведения материалов в условиях абразивного изнашивания являлась потеря массы.

Результаты и их обсуждение

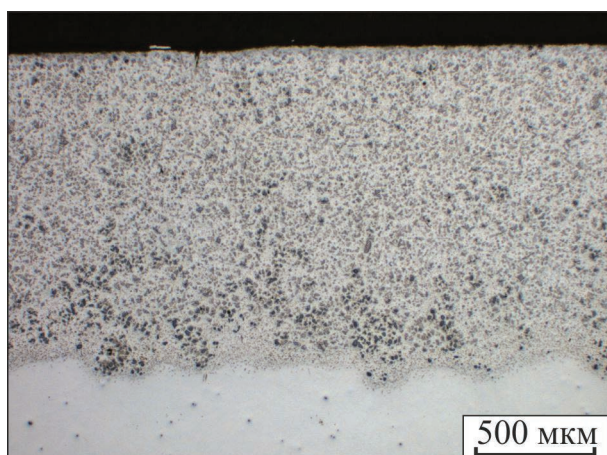
Толщина поверхностно оплавленных материалов при обработке всех типов порошковых смесей превышала 1 мм. Легированные слои отчетливо выделяются при металлографических исследованиях и надежно идентифицируются путем измерения уровня микротвердости в процессе исследования поперечного сечения шлифов.

Типичные снимки структур сформированных модифицированных слоев, полученные с применением методов световой и растровой электронной микроскопии, представлены на рис. 1 и 2.

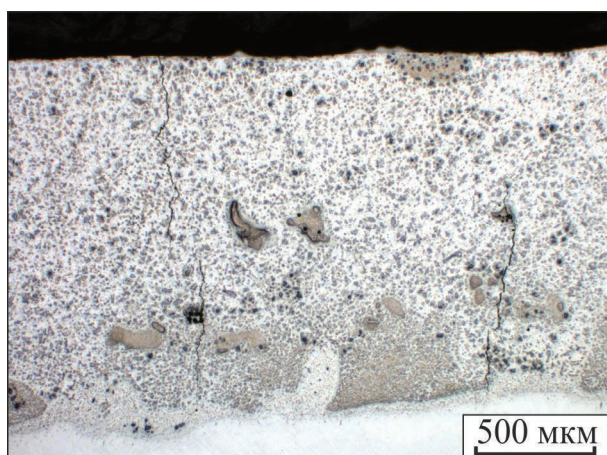
В сплаве, полученном при наплавке порошковой смеси, содержащей 10 вес. % карбида бора, наблюдаются выделения преимущественно вытянутых первичных мелкодисперсных кристаллов боридов титана длиной до ~ 15 мкм и карбида титана дендритной формы с длиной оси первого



a



б



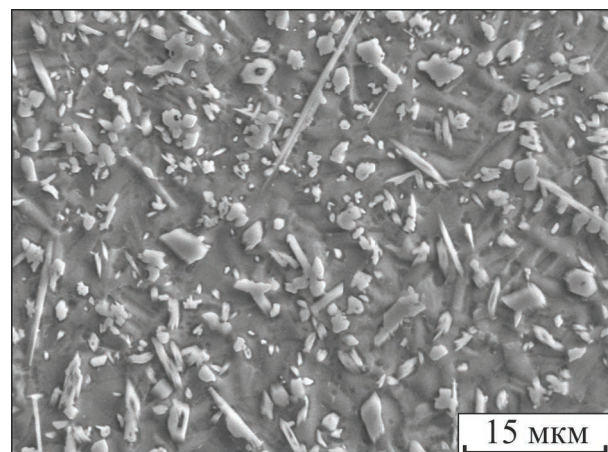
в

Рис. 1. Структура поверхностных слоев титана, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки смеси порошков титана и карбида бора (оптическая металлография):

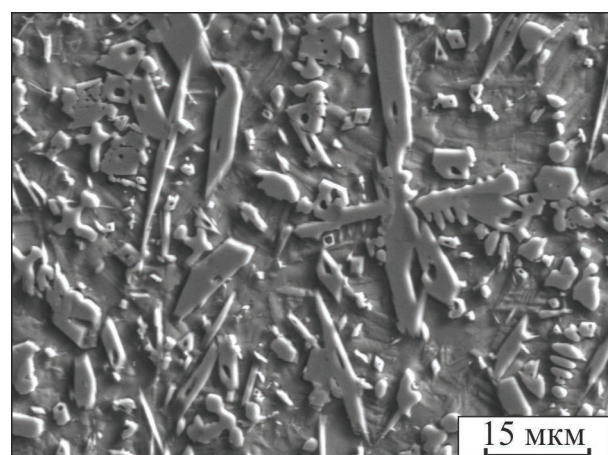
a – 10 вес. % B_4C ; *б* – 20 вес. % B_4C ; *в* – 30 вес. % B_4C

Fig. 1. The structure of the surface layers of titanium formed by the method of nonvacuum electron-beam cladding of a mixture of titanium and boron carbide powders (optical metallography):

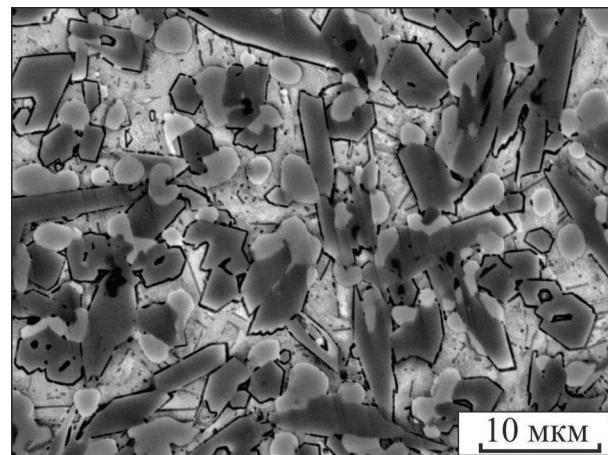
a – 10 wt. % B_4C ; *б* – 20 wt. % B_4C ; *в* – 30 wt. % B_4C



a



б



в

Рис. 2. Структура поверхностных слоев титана, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки смеси порошков титана и карбида бора (электронная микроскопия):

a – 10 вес. % B_4C ; *б* – 20 вес. % B_4C ; *в* – 30 вес. % B_4C

Fig. 2. The structure of the surface layers of titanium obtained by the method of nonvacuum electron-beam cladding of a mixture of titanium powders and boron carbide (electronic metallography):

a – 10 wt. % B_4C ; *б* – 20 wt. % B_4C ; *в* – 30 wt. % B_4C

порядка до ~ 10 мкм (рис. 2, а). Объемная доля упрочняющих фаз в покрытии «Ti-10B₄C» с учетом мелкодисперсных эвтектических частиц составляет 20 %. Следует отметить, что даже при минимальном содержании в исходной смеси порошка карбида бора (10 вес. %) в наплавленных электронным лучом покрытиях зафиксированы нерастворившиеся частицы B₄C (рис. 3).

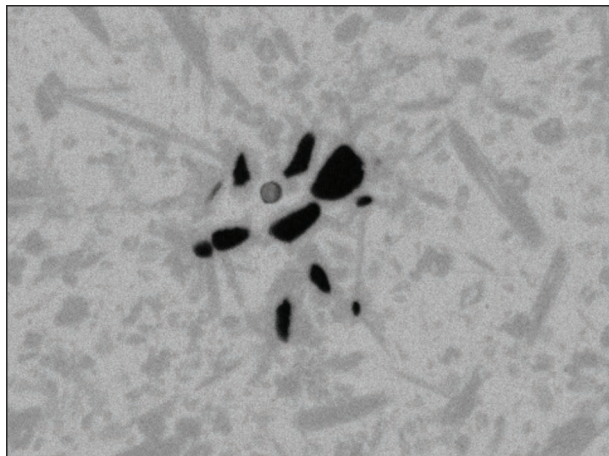


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение частиц карбида бора, нерастворившихся при оплавлении электронным лучом сплава «Ti-20B₄C»

Fig. 3. Electron microscopical image of boron carbide particles that are insoluble upon electron-beam cladding of «Ti-20B₄C» alloy

Дальнейшее повышение концентрации карбида бора в исходной порошковой смеси приводит к выделению более крупных частиц борида и карбида титана (рис. 2, б, в). Методами энергодисперсионного анализа было определено распределение элементного состава в этих фазах (рис. 4). Содержание высокопрочных частиц карбида и борида титана в поверхностно легированных слоях также возрастает. В сплаве «Ti-30B₄C» объемная доля упрочняющих фаз увеличивается до 40...44 %.

В зонах скопления высокопрочных частиц карбида и борида титана возможно образование микротрещин. По данным структурного анализа наиболее равномерное распределение упрочняющих фаз характерно для сплава, сформированного при наплавке смеси, содержащей в своем составе 20 вес. B₄C %.

Особенностью, характерной для сплавов, полученных при обработке смесей типа «Ti-20B₄C» и «Ti-30B₄C», является образование дефектов в

структуре первичных крупных кристаллов борида титана в виде пустот. В сплаве, содержащем 30 вес. % порошка карбида бора, в нижней зоне покрытия формируются конгломераты мелкодисперсных частиц (рис. 5). Энергодисперсионный анализ участков такого рода позволяет сделать вывод о присутствии в них углерода, бора и титана.

Данные рентгенофазового анализа, представленные на рис. 6, подтверждают присутствие во всех поверхностно-легированных слоях карбида титана (TiC), моноборида титана (TiB) и α (α')-титана. Структура легированных слоев во многом зависит от скорости охлаждения материала. В случае формирования покрытий на титановом сплаве BT1-0 методом вневакуумного электронно-лучевого оплавления скорость охлаждения образцов крайне высока.

С учетом этого можно предположить, что в легированных слоях формируется фаза α' -титан, однако методами рентгенофазового анализа данную фазу определить затруднительно.

Некоторые рефлексy фаз карбида и моноборида титана на рентгенограммах отсутствуют или накладываются на пики титана. Повышение концентрации карбида бора в исходной порошковой смеси от 10 до 30 вес. % сопровождается увеличением интенсивности пиков карбида и борида титана.

На рис. 7 отражено распределение уровня микротвердости на поперечных шлифах образцов «Ti-10B₄C» и «Ti-20B₄C». Полученные результаты хорошо коррелируют с данными проведенных структурных исследований. Характер представленных на рис. 7 зависимостей позволяет делать надежные выводы о глубине слоев, в пределах которых произошли кардинальные структурные изменения. Так же как и данные, полученные при структурных исследованиях, графики распределения уровня микротвердости показали, что толщина модифицированных слоев составляет 1,15, 1,3 и 1,65 мм для образцов, содержащих 10, 20 и 30 вес. % порошка карбида бора соответственно.

Анализ представленных результатов свидетельствует о повышении твердости наплавленных слоев при увеличении содержания карбида бора в исходной порошковой смеси. Средний уровень твердости исследуемых слоев составляет 4250 МПа (10 вес. % B₄C), 5050 МПа

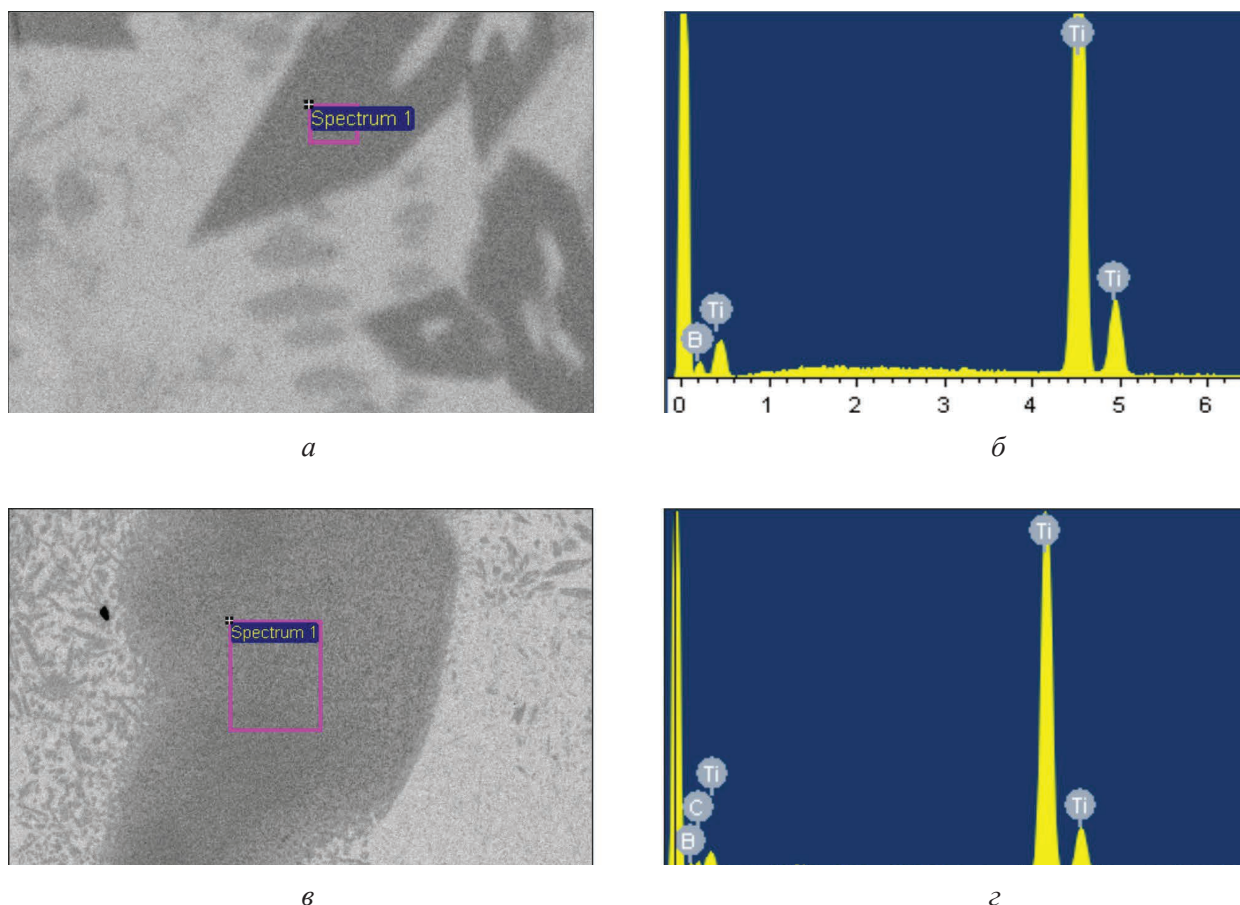


Рис. 4. Распределение химических элементов в частицах, возникших в сплаве, полученном при наплавке смеси типа “Ti-20B₄C” (локальный микрорентгеноспектральный анализ):

частица борида титана (а) и ее элементный состав (б); частица карбида титана (в) и ее элементный состав (г)

Fig. 4. The distribution of chemical elements in the particles produced in the alloy obtained by cladding of a “Ti-20B₄C” mixture (local micro-X-ray spectral analysis):

a particle of titanium boride (a) and its elemental composition (б); a particle of titanium carbide (в) and its elemental composition (г)

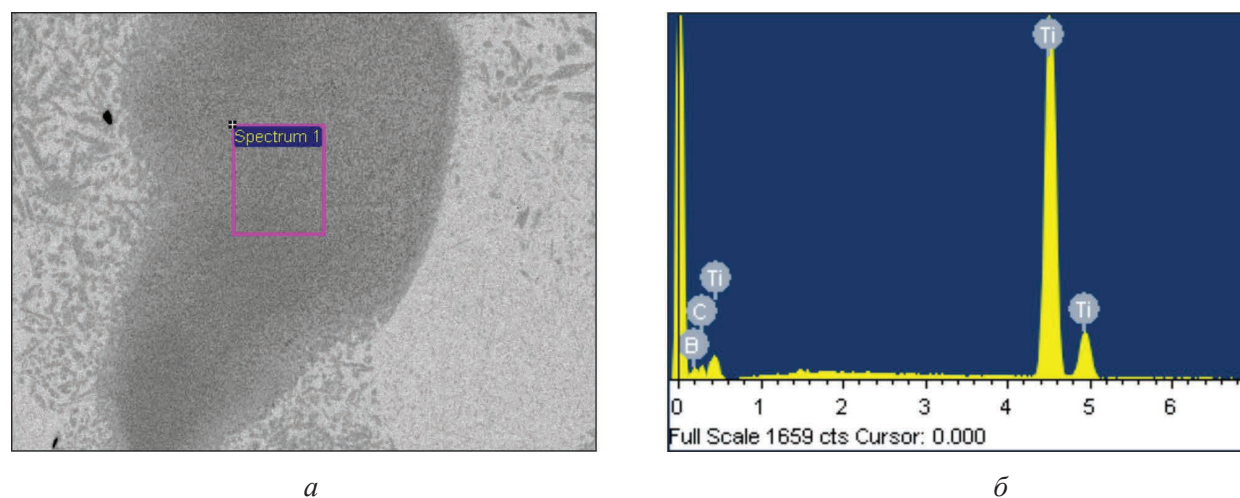
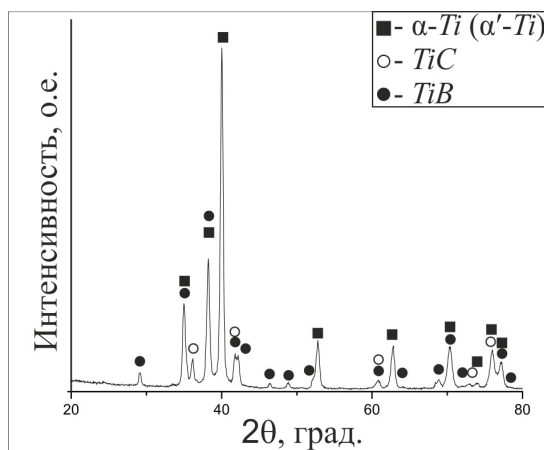
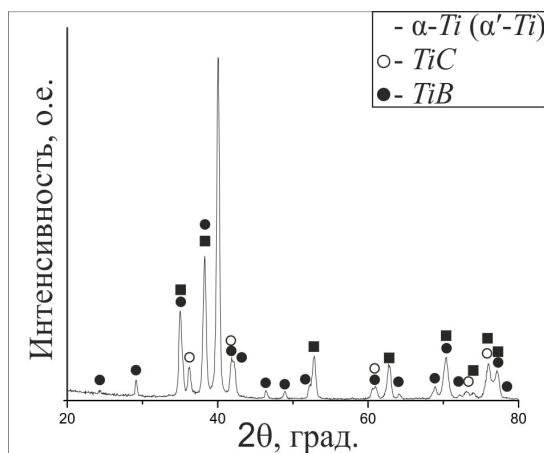


Рис. 5. Конгломерат мелкодисперсных частиц, возникший в сплаве, сформированном при наплавке смеси 30 вес. % карбида бора (а) и его элементный состав (б)

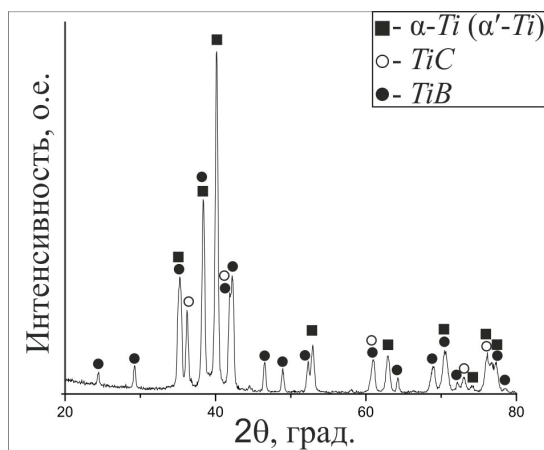
Fig. 5. A conglomerate of fine particles located in the alloy formed by cladding of a mixture of 30 wt. % boron carbide (a) and its elemental composition (б)



a



б



в

Рис. 6. Рентгенограммы, зафиксированные при анализе слоев, полученных при наплавке порошковых смесей с 10 вес. % (а); 20 вес. % (б) и 30 вес. % (в) B_4C

Fig. 6. X-ray patterns recorded during the analysis of layers formed by cladding of a powder mixtures with 10 wt. % (a); 20 wt. % (б); 30 wt. % (в) B_4C

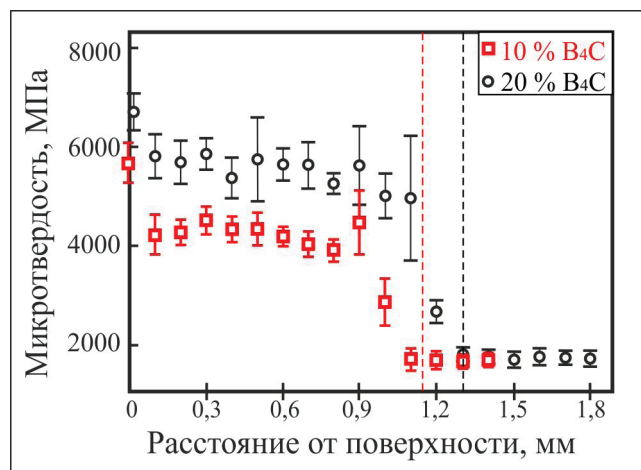


Рис. 7. Распределение микротвердости по глубине слоев, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей, содержащих 10 и 20 вес. % B_4C

Fig. 7. The distribution of microhardness over the depth of layers formed by the method of nonvacuum electron-beam cladding of powder mixtures containing 10 wt. % and 20 wt. % B_4C

(20 вес. % B_4C), и 6400 МПа (30 вес. % B_4C). Рост прочностных свойств материалов обусловлен увеличением в них объемной доли частиц упрочняющих фаз.

Следует подчеркнуть, что для сплава «Ti-30 B_4C » характерной особенностью является более высокий разброс значений микротвердости, что также согласуется с результатами металлографических исследований.

Результаты испытаний на трение в присутствии закрепленных частиц абразива показали, что износостойкость сплава «Ti-10 B_4C » в 1,3 раза выше по сравнению с эталоном, в качестве которого был принят материал основы (рис. 8).

Максимально высокий уровень, в 2,4 раза превышающий стойкость титанового сплава ВТ1-0, был зафиксирован при испытании образцов, полученных при наплавке 30 вес. % порошка карбида бора. Следует подчеркнуть, что этот результат достигнут, несмотря на присутствие в сплаве трещин, обусловленных наличием локальных скоплений высокопрочных частиц.

Повышение объемной доли высокопрочных частиц, обусловленное ростом содержания карбида бора в исходных порошковых смесях, благоприятно отражается и на стойкости материалов при проведении испытаний в условиях трения о нежестко закрепленные частицы абразива. Такой

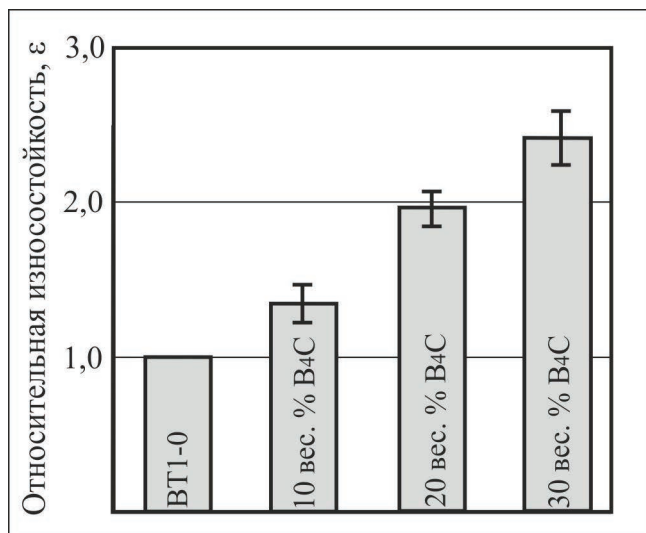


Рис. 8. Значение износостойкости поверхностно-упрочненных материалов, полученных при наплавке порошковой смеси, содержащей 10, 20 и 30 вес. % B₄C

Fig. 8. The wear resistance of surface-hardened materials produced by cladding of a powder mixture containing 10, 20 and 30 wt. % B₄C

вывод может быть сделан на основе анализа экспериментальных данных, представленных на рис. 9.

Введение в наплавляемую смесь 10 вес. % порошка карбида бора приводит к повышению износостойкости сплава в 3,86 раза по сравнению с эталонным материалом. Увеличение концентрации B₄C в исходной порошковой насыпке до 30 вес. % сопровождается восьмикратным

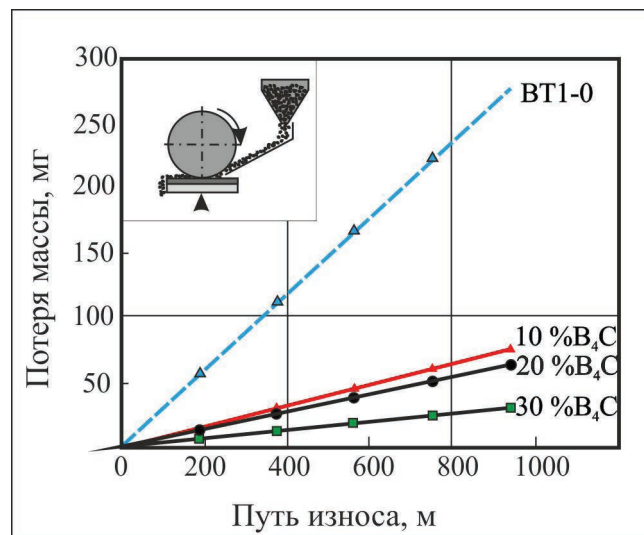
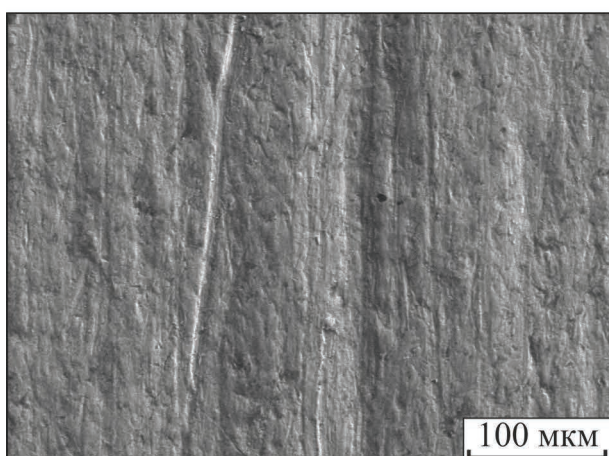


Рис. 9. Результаты изнашивания материалов при реализации схемы трения о нежестко закрепленные частицы абразива

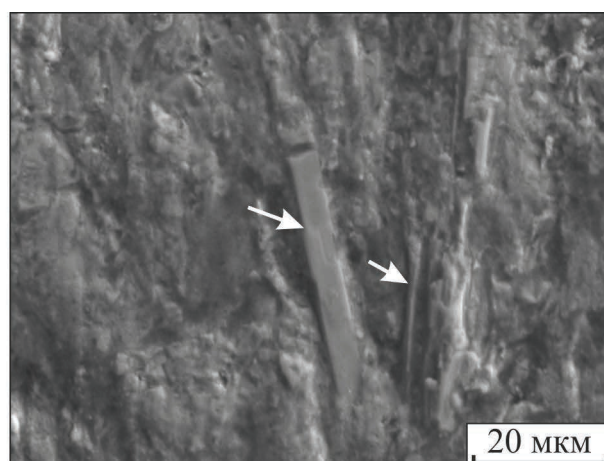
Fig. 9. The wear results of the materials when implementing the friction scheme on loosely fixed abrasive particles

ростом износостойкости поверхностно легированного слоя.

Особенности топографии поверхности изношенных образцов приведены на рис. 10. Очевидно, что основным фактором, объясняющим восьмикратный рост износостойкости наплавляемых материалов, является присутствие в них частиц высокопрочных фаз (рис. 10, б, указано стрелкой).



а



б

Рис. 10. Топография поверхности изношенных образцов:

а – “Ti-10B₄C”; б – “Ti-30B₄C”

Fig. 10. Surface topography of worn out samples:

а – “Ti-10B₄C”; б – “Ti-30B₄C”

Выводы

1. Проведенные исследования поверхностно-легированных слоев позволяют сделать вывод, что модифицирование титанового сплава методом вневакуумной электронно-лучевой обработки способствует повышению его механических и триботехнических свойств. Наплавка высококонцентрированным электронным лучом порошковой смеси, содержащей карбид бора, позволяет получить на основе из технически чистого титана качественные слои толщиной более 1,6 мм.

2. Структура образцов, полученных при наплавке порошковой смеси, содержащей 30 вес. % карбида бора, характеризуется образованием конгломератов мелкодисперсной фазы вблизи зоны термического влияния, а также наличием микротрещин. В покрытиях, полученных при наплавке порошковой смеси, содержащей 10 и 20 вес. % карбида бора, подобных дефектов обнаружено не было.

3. Формирование частиц высокопрочной фазы в наплавленных слоях приводит к резкому увеличению среднего уровня микротвердости материала. С повышением концентрации порошка карбида бора в наплавочной смеси с 10 до 30 вес. % микротвердость поверхностно легированного слоя возрастает до 6 400 МПа.

4. Максимальный уровень стойкости к изнашиванию в условиях воздействия закрепленных частиц абразива зафиксирован при испытании легированных слоев, полученных наплавкой порошковой смеси, содержащей 30 вес. % карбида бора. По сравнению с эталонным материалом (титан BT1-0) скорость изнашивания исследуемого материала в 2,4 раза меньше. При испытании в условиях трения о нежестко закрепленные абразивные частицы наблюдалось восьмикратное увеличение уровня износостойкости по сравнению с технически чистым титаном BT1-0.

5. Основным структурным фактором, определяющим повышение микротвердости и износостойкости сплавов, полученных при легировании технически чистого титана, является формирование в процессе кристаллизации частиц упрочняющей фазы TiC и TiB, объемная доля которых достигает 40...44 %.

Список литературы

1. Microstructure and wear resistance of c-BN/Ni-Cr-Ti composites prepared by spark plasma sintering / Y. Wang, K. Lei, Y. Ruan, W. Dong // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2016. – Vol. 54. – P. 98–103. – doi: 10.1016/j.ijrmhm.2015.07.010.
2. Shigeta M., Watanabe T. Multicomponent co-condensation model of Ti-based boride/silicide nanoparticle growth in induction thermal plasmas // Thin Solid Films. – 2007. – Vol. 515, iss. 9. – P. 4217–4227. – doi: 10.1016/j.tsf.2006.02.042.
3. Microstructure and tribological property of TiC-Mo composite coating prepared by vacuum plasma spraying / X. Guo, Y. Niu, L. Huang, H. Ji, X. Zheng // Journal of Thermal Spray Technology. – 2012. – Vol. 21, iss. 5. – P. 1083–1090. – doi: 10.1007/s11666-012-9797-3.
4. Microstructure and sliding wear behavior of pure titanium surface modified by double-glow plasma surface alloying with Nb / Q. Wang, P.-Z. Zhang, D.-B. Wei, X.-H. Chen, R.-N. Wang, H.-Y. Wang, K.-T. Feng // Materials and Design. – 2012. – Vol. 52. – P. 265–273. – doi: 10.1016/j.matdes.2013.05.061.
5. Formation of equiaxed alpha and titanium nitride precipitates in spark plasma sintered TiB/Ti-6Al-4V composites / P. Nandwana, J.Y. Hwang, M.Y. Koo, J. Tiley, S.H. Hong, R. Banerjee // Materials Letters. – 2012. – Vol. 83. – P. 202–205. – doi: 10.1016/j.matlet.2012.05.132.
6. Патент 2427666 Российская Федерация. Способ упрочнения поверхности изделий из титановых сплавов / А.Е. Михеев, А.В. Гирн, С.С. Ивасев, Е.В. Вахтеев. – № 2009147581/02; заявл. 21.12.2009; опубл. 27.08.2011, Бюл. № 24. – 6 с.
7. Патент 2464355 Российская Федерация. Способ упрочнения поверхности изделий из титановых сплавов / В.В. Углов, Н.Н. Черенда, В.И. Шиманский, Г.З. Подсобей, В.М. Асташинский. – № 2011115506/02; заявл. 19.04.2011; опубл. 20.10.2012, Бюл. № 29. – 11 с.
8. Zhang H.X., Yu H.J., Chen C.Z. In-situ forming composite coating by laser cladding C/B₄C // Materials and Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 30, iss. 6. – P. 743–747. – doi: 10.1080/10426914.2014.994772.
9. Zhang Yo., Sun Ji., Vilar R. Characterization of (TiB + TiC)/TC₄ in situ titanium matrix composites prepared by laser direct deposition // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Vol. 211, iss. 4. – P. 597–601. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.11.009.
10. Zeng X., Yamaguchi T., Nishio K. Characteristics of Ti (C,N)/TiB composite layer on Ti-6Al-4V alloy produced by laser surface melting // Optics and Laser Technology. – 2016. – Vol. 80. – P. 84–91. – doi: 10.1016/j.optlastec.2016.01.004.

11. White R.M., Dickey E.C. Mechanical properties and deformation mechanisms of B_4C - TiB_2 eutectic composites // Journal of the European Ceramic Society. – 2013. – Vol. 34, iss. 9. – P. 2043–2050. – doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.08.012.
12. Effect of yttrium on microstructure and mechanical properties of laser clad coatings reinforced by in situ synthesized TiB and TiC / J. Li, H. Wang, M. Li, Zh. Yu // Journal of Rare Earths. – 2011. – Vol. 29, iss. 5. – P. 477–483. – doi: 10.1016/S1002-0721(10)60483-8.
13. Xin H., Watson L.M., Baker T.N. Surface analytical studies of a laser nitrided Ti-6Al-4V alloy: a comparison of spinning and stationary laser beam modes // Acta Materialia. – 1998. – Vol. 46, iss. 6. – P. 1949–1961. – doi: 10.1016/S1359-6454(97)00438-2.
14. Pulsed laser deposited hard TiC, ZrC, HfC and TaC films on titanium: hardness and an energy-dispersive X-ray diffraction study / D. Ferro, J.V. Rau, V. Rossi Albertini, A. Generosi, R. Teghil, S.M. Barinov // Surface and Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202, iss. 8. – P. 1455–1461. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.06.060.
15. Морфология боридов железа в поверхностном слое, наплавленном электронным лучом / И.А. Батаев, Н.В. Курлаев, О.А. Бутыленкова, О.Г. Ленивцева, А.А. Лосинская // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 1 (54). – С. 85–89.
16. Surface hardening of steels with carbon by non-vacuum electron-beam processing / I.A. Bataev, M.G. Golkovskii, A. Bataev, A. Losinskaya, R. Dostovalov, A. Popelyukh, E. Drobyaz // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 242. – P. 164–169. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.01.038.
17. Батаев В.А., Буров В.Г., Дробяз Е.А. Особенности разрушения поверхностного слоя стали, перегретого электронным лучом // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2006. – № 12 – С. 60–63.
18. Euh K., Lee Jo., Lee S. Microstructural modification and property improvement of Boride/Ti-6Al-4V surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron-beam irradiation // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2001. – Vol. 32, iss. 10. – P. 2499–2508. – doi: 10.1007/s11661-001-0039-4.
19. Lee Ch.S., Oh J.Ch., Lee S. Improvement of hardness and wear resistance of (TiC, TiB)/Ti-6Al-4V surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron-beam irradiation // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2003. – Vol. 34, iss. 7. – P. 1461–1471. – doi: 10.1007/s11661-003-0258-y.
20. Microstructural modification and hardness improvement in boride/Ti-6Al-4V surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron beam irradiation / K. Euh, J. Lee, S. Lee, Y. Koo, N.J. Kim // Scripta Materialia. – 2001. – Vol. 45. – P. 1–6. – doi: 10.1016/S1359-6462(01)00981-2.
21. Yun E., Lee K., Lee S. Improvement of high-temperature hardness of (TiC, TiB)/Ti-6Al-4V surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation // Surface and Coatings Technology. – 2004. – Vol. 184, iss. 1. – P. 74–83. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2003.10.017.
22. Салимов Р.А. Мощные ускорители электронов для промышленного применения // Успехи физических наук. – 2000. – Т. 170, № 2. – С. 197–201. – doi: 10.3367/UFNr.0170.200002h.0197.
23. Борискин В.Н., Татанов В.И. Контроль положения пучка электронов в атмосфере // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования. – 2008. – № 3. – P. 75–77.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2018 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



Surface Hardening of Commercially Pure Titanium by Non-vacuum Electron Beam Cladding of Powder Mixtures

Olga Lenivtseva^{1,a}, Aleksander Tokarev^{2,b}, Ivan Chakin^{3,c}, Sergey Burov^{4,d}, Yulia Khudorozhkova^{4,e}





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



² Siberian State University of Water Transport, 33 Schetinkina st., Novosibirsk, 630099, 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 Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya st., 620049, Ekaterinburg, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0003-2471-3286>,  lenivtseva_olga@mail.ru, ^b  <http://orcid.org/0000-0002-2841-3689>,  aot51@ngs.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0003-0529-2017>,  chak_in2003@bk.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0002-0413-1054>,  burchitai@mail.ru,

^e  <https://orcid.org/0000-0003-3832-1419>,  khjv@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 28 February 2018

Revised: 28 March 2018

Accepted: 04 May 2018

Available online: 15 June 2018

Keywords:

Cp-titanium

Electron beam treatment

Coating

Boron carbide

Titanium carbide

Titanium boride

Tribotechnical characteristics

Funding:

The study is carried out with the financial support of the RFBR in the framework of the scientific project No. 16-33-60066 Mol_a_dk.

ABSTRACT

Introduction. Modern engineering copes with different tasks associated with the modification of the structure of the surface layers of metallic materials using high-temperature heating sources. Structural transformations that occur during this treatment make it possible to increase the strength, corrosion and tribological behavior of metals. Titanium and its alloys are widely used in modern industry, but its distribution is limited by a high coefficient of friction and low resistance to wear. An insufficient attention is paid to the problem of titanium and its alloys hardening with the use of high-temperature sources of heating. Analysis of the works related to high-speed heating of titanium-base alloys showed that the laser beam is most often used as a source of surface heating. The Ti-6Al-4V titanium alloy predominantly performs the function of the base material. The samples obtained by surfacing powder mixtures containing titanium diboride (TiB₂) and boron carbide (B₄C) possess high hardness and wear resistance. However, the thickness of the coatings formed this way does not exceed 1 mm. To produce modified layers of increased thickness it is rational to use the method of electron beam treatment of materials in air. The aim of the work is to study the possibility of cladding of a powder mixture containing boron carbide to modify surface layers of cp-titanium by the method of non-vacuum electron beam treatment. **Materials and Methods.** Cp-titanium is used as the base material. Plates of base material were treated with a highly concentrated electron beam discharged into air. Powder mixtures with different content of boron carbide powder (10, 20 and 30 wt. %) were used to form particles of the high-strength phase in the surface layers. Modified materials were analyzed by optical and scanning electron microscopy. Studies of abrasion resistance were carried out under friction conditions on fixed and loosely fixed abrasive particles. **Results and discussion.** The mechanical and tribotechnical characteristics of modified titanium layers are largely determined by structural transformations occurring in the surface layers of the material. The treatment of a titanium alloy with a high-concentration electron beam in air allows obtaining modified layers with a thickness of more than 1 mm. Cladding of a powder mixture containing boron carbide leads to the formation of high-strength particles in the surface-alloyed layers, which have a significant effect on the properties of the base material. Addition to the cladding mixture 10 wt. % of a boron carbide powder allows obtaining qualitative layers containing finely dispersed particles of titanium monoboride and titanium carbide. The volume fraction of the high-strength phase in these layers is ~ 20%. Increasing the concentration of boron carbide in the original powder mixture to 30 wt. % leads to the formation in the structure of modified layers of large primary crystals of titanium boride and titanium carbide of dendritic morphology. An increase in B₄C concentration also leads to an increase in the volume fraction of the strengthening phase to 40...44 %. A characteristic feature of these samples is the presence of conglomerates of fine particles in the lower coverage zone. The average microhardness of the hardened layers reaches 4 250-6 400 MPa. In the conditions of friction on fixed of abrasive particles, the maximum wear resistance exceeds 2.4 times the same index of the reference sample was recorded during the testing of the alloy obtained by cladding the mixture with 30 wt. % B₄C. The same samples showed an eightfold increase in the wear resistance values when the abrasive particles were loosely attached to the material.

For citation: Lenivtseva O.G., Tokarev A.O., Chakin I.K., Burov S.V., Khudorozhkova Yu.V. Surface hardening of commercially pure titanium by non-vacuum electron beam cladding of powder mixtures. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 116–129. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-116-129. (In Russian).

*** Corresponding author**

Burov Sergey V., Ph.D. (Engineering), Senior Researcher
Institute of Engineering Science,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya st., 620049, Ekaterinburg, Russian Federation
Tel.: 8 (343) 362-30-17, e-mail: burchitai@mail.ru

References

1. Wang Y., Lei K., Ruan Y., Dong W. Microstructure and wear resistance of c-BN/Ni–Cr–Ti composites prepared by spark plasma sintering. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2016, vol. 54, pp. 98–103. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2015.07.010.
2. Shigeta M., Watanabe T. Multicomponent co-condensation model of Ti-based boride/silicide nanoparticle growth in induction thermal plasmas. *Thin Solid Films*, 2007, vol. 515, iss. 9, pp. 4217–4227. doi: 10.1016/j.tsf.2006.02.042.
3. Guo X., Niu Y., Huang L., Ji H., Zheng X. Microstructure and tribological property of TiC–Mo composite coating prepared by vacuum plasma spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2012, vol. 21, iss. 5, pp. 1083–1090. doi: 10.1007/s11666-012-9797-3.
4. Wang Q., Zhang P.-Z., Wei D.-B., Chen X.-H., Wang R.-N., Wang H.-Y., Feng K.-T. Microstructure and sliding wear behavior of pure titanium surface modified by double-glow plasma surface alloying with Nb. *Materials and Design*, 2012, vol. 52, pp. 265–273. doi: 10.1016/j.matdes.2013.05.061.
5. Nandwana P., Hwang J.Y., Koo M.Y., Tiley J., Hong S.H., Banerjee R. Formation of equiaxed alpha and titanium nitride precipitates in spark plasma sintered TiB/Ti–6Al–4V composites. *Materials Letters*, 2012, vol. 83, pp. 202–205. doi: 10.1016/j.matlet.2012.05.132.
6. Mikheev A.E., Girn A.V., Ivasev S.S., Vakhteev E.V. *Sposob uprochneniya poverkhnosti izdelii iz titanovykh splavov* [Procedure for strengthening surface of items of titanium alloys]. Patent RF, no. 2427666, 2011.
7. Uglov V.V., Cherenda N.N., Shimanskii V.I., Podsobei G.Z., Astashinskii V.M. *Sposob uprochneniya poverkhnosti izdelii iz titanovykh splavov* [Strengthening method of surface of items from titanium alloys]. Patent RF, no. 2464355, 2012.
8. Zhang H.X., Yu H.J., Chen C.Z. In-situ forming composite coating by laser cladding C/B4C. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 30, iss. 6, pp. 743–747. doi: 10.1080/10426914.2014.994772.
9. Zhang Yo., Sun Ji., Vilar R. Characterization of (TiB + TiC)/TC4 in situ titanium matrix composites prepared by laser direct deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol. 211, iss. 4, pp. 597–601. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.11.009.
10. Zeng X., Yamaguchi T., Nishio K. Characteristics of Ti (C,N)/TiB composite layer on Ti–6Al–4V alloy produced by laser surface melting. *Optics and Laser Technology*, 2016, vol. 80, pp. 84–91. doi: 10.1016/j.optlastec.2016.01.004.
11. White R.M., Dickey E.C. Mechanical properties and deformation mechanisms of B4C–TiB2 eutectic composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 2013, vol. 34, iss. 9, pp. 2043–2050. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.08.012.
12. Li J., Wang H., Li M., Yu Zh. Effect of yttrium on microstructure and mechanical properties of laser clad coatings reinforced by in situ synthesized TiB and TiC. *Journal of Rare Earths*, 2011, vol. 29, iss. 5, pp. 477–483. doi: 10.1016/S1002-0721(10)60483-8.
13. Xin H., Watson L.M., Baker T.N. Surface analytical studies of a laser nitrided Ti–6Al–4V alloy: a comparison of spinning and stationary laser beam modes. *Acta Materialia*, 1998, vol. 46, iss. 6, pp. 1949–1961. doi: 10.1016/S1359-6454(97)00438-2.
14. Ferro D., Rau J.V., Rossi Albertini V., Generosi A., Teghil R., Barinov S.M. Pulsed laser deposited hard TiC, ZrC, HfC and TaC films on titanium: hardness and an energy-dispersive X-ray diffraction study. *Surface and Coatings Technology*, 2008, vol. 202, iss. 8, pp. 1455–1461. doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.06.060.
15. Bataev I.A., Kurlaev N.V., Butylenkova O.A., Lenivtseva O.G., Losinskaya A.A. Morfologiya boridov zheleza v poverkhnostnom sloe, naplavlennom elektronnym luchom [Morphology of iron borides in coatings, produced

by non-vacuum electron beam cladding]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2012, no. 1 (54), pp. 85–89.

16. Bataev I., Golkovskii M., Bataev A., Losinskaya A., Dostovalov R., Popelyukh A., Drobyaz E. Surface hardening of steels with carbon by non-vacuum electron-beam processing. *Surface and Coatings Technology*, 2014, vol. 242, pp. 164–169. doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.01.038.

17. Bataev V.A., Burov V.G., Drobyaz E.A. Osobennosti razrusheniya poverkhnostnogo sloya stali, peregretoego elektronnyim luchom [Features of the destruction of the surface layer of steel superheated by an electron beam]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2006, no. 12, pp. 60–63.

18. Euh K., Lee Jo., Lee S. Microstructural modification and property improvement of Boride/Ti-6Al-4V surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron-beam irradiation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, vol. 32, iss. 10, pp. 2499–2508. doi: 10.1007/s11661-001-0039-4.

19. Lee Ch.S., Oh J.Ch., Lee S. Improvement of hardness and wear resistance of (TiC, TiB)/Ti-6Al-4V surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron-beam irradiation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2003, vol. 34, iss. 7, pp. 1461–1471. doi: 10.1007/s11661-003-0258-y.

20. Euh K., Lee J., Lee S., Koo Y., Kim N.J. Microstructural modification and hardness improvement in boride/Ti-6Al-4V surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron beam irradiation. *Scripta Materialia*, 2001, vol. 45, pp. 1–6. doi: 10.1016/S1359-6462(01)00981-2.

21. Yun E., Lee K., Lee S. Improvement of high-temperature hardness of (TiC, TiB) / Ti-6Al-4V surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation. *Surface and Coatings Technology*, 2004, vol. 184, iss. 1, pp. 74–83. doi: 10.1016/j.surfcoat.2003.10.017.

22. Salimov R.A. Moshchnye uskoriteli elektronov dlya promyshlennogo primeneniya [High-energy electron accelerators for industrial applications]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi*, 2000, vol. 170, no. 2, pp. 197–201. doi: 10.3367/UFNr.0170.200002h.0197. (In Russian).

23. Boriskin V.N., Tatanov V.I. Kontrol' polozheniya puchka elektronov v atmosfere [The position control of the electron beam at air]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Yaderno-fizicheskie issledovaniya = Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations*, 2008, no. 3, pp. 75–77.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2018 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/>).