

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СЛОЕВ TiB-TiC-Ti, ПОЛУЧЕННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВА ВТ1-0 МЕТОДОМ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ*

О.Г. ЛЕНИВЦЕВА¹, канд. техн. наук, с.н.с., доцент

Е.А. ДРОБЯЗ¹, канд. техн. наук, доцент

А.С. ГОНТАРЕНКО^{1,2}, мл. научный сотрудник, ассистент

Т.А. ЗИМОГЛЯДОВА¹, аспирант

Л.В. ЧУЧКОВА¹, магистрант

(¹НГТУ, г. Новосибирск

²Ганноверский университет им. Вильгельма Лейбница, г. Гарбсен)

Поступила 12 октября 2016

Рецензирование 21 октября 2016

Принята к печати 15 ноября 2016

Ленивцева О.Г. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: lenivtseva_olga@mail.ru

Исследовано влияние режимов вневакуумной электронно-лучевой обработки на структуру и свойства износостойких слоев борид титана-карбид титана-титан, полученных на заготовках из титанового сплава ВТ1-0. В качестве наплавочного материала использовали смесь титана с карбидом бора и сварочными флюсами. Структурные исследования проводили с использованием оптической и растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного и рентгенофазового анализов. В результате проведенных экспериментов были получены слои толщиной до 3,4 мм, состоящие из фаз α (α')-Ti, карбида и моноборида титана. Структурные исследования показали, что высокая объемная доля упрочняющих фаз TiC и TiB способствует формированию трещин в наплавленных слоях. Изменение технологических режимов электронно-лучевой обработки оказывает влияние на твердость наплавленных слоев. При токе пучка 22 мА средний уровень микротвердости слоя, полученного при наплавке 20 % вес. карбида бора составляет 582 HV, что в ~3,5 раза выше твердости основного металла. Повышение тока пучка до 23 мА способствует снижению уровня микротвердости до 543 HV. Средний уровень микротвердости образцов, полученных при наплавке 12 % вес. карбида бора, составляет 436 HV.

Для оценки износостойкости полученные материалы испытывались на трение в условиях нежестко закрепленных абразивных частиц. Лучшие показатели достигнуты при испытании слоев, сформированных в процессе наплавки 20 % вес. карбида бора. Интенсивность изнашивания образцов с покрытием в восемь раз меньше по сравнению с титаном ВТ1-0.

Ключевые слова: электронно-лучевая наплавка, титан, карбиды титана, бориды титана, микротвердость, износостойкость.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-63-74

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

Введение

Титан и сплавы на его основе широко используются в авиастроении, судостроении, химической промышленности и медицине. Распространенность титановых сплавов в промышленности обусловлена комплексом их уникальных свойств, таких как высокая удельная прочность, пластичность, отличная коррозионная стойкость и биосовместимость [1]. Однако при контакте с другими конструкционными материалами титановые сплавы подвержены сильному адгезионному изнашиванию [2–4]. Процесс трения титановых сплавов характеризуется высоким и нестабильным коэффициентом трения и сопровождается схватыванием и переносом частиц титана на поверхность контртела. Этот перенос материала в первую очередь приводит к истиранию поверхности титана и сопровождается сильным абразивным изнашиванием. Таким образом, в большинстве случаев при трении наблюдаются одновременно два механизма изнашивания титановых сплавов: абразивный и адгезионный [2, 5].

Известно, что повышение прочности и твердости приводит к повышению износостойкости, но это не всегда характерно для титановых сплавов. Авторы работы [2] отмечают, что термическая обработка (ТО) титановых сплавов Ti-Nb-Ta-Zr (β -Ti) и Ti-6Al-4V (α + β -Ti) не приводит к повышению износостойкости. Кроме того, вызывает интерес тот факт, что потеря массы высокопрочного титанового сплава Ti-6Al-4V в условиях воздействия нежестко закрепленных абразивных частиц выше, чем технически чистого титана [6]. Скорость абразивного изнашивания титановых сплавов примерно в семь раз выше скорости изнашивания углеродистой стали 1080. Таким образом, ТО не позволяет повысить триботехнические свойства титана и его сплавов, что ограничивает возможность их применения для изготовления деталей, эксплуатирующихся в условиях абразивного изнашивания.

Одним из перспективных методов, позволяющих повысить износостойкость титановых сплавов, является поверхностное упрочнение [7–16]. Данный подход позволяет увеличить уровень твердости, износостойкости, улучшить высокотемпературные свойства титана и снизить коэффициент трения. При этом свойства основного металла не изменяются. В настоящее время

можно выделить две основные технологии поверхностного упрочнения, используемые для повышения износостойкости титановых сплавов: лазерная и электронно-лучевая обработка. Данные методы позволяют получать материал типа упрочняющие частицы–титановая матрица с высоким комплексом свойств. В качестве упрочняющих частиц обычно используются карбиды, бориды или силициды [9, 17–22]. Первые работы по лазерной наплавке на титановые сплавы появились в 80-х годах прошлого века, и интерес к данной технологии не исчез в настоящее время [23, 24]. Работ по использованию электронного луча в качестве источника энергии для обработки титановых сплавов значительно меньше. Традиционные электронно-лучевые установки оснащены вакуумной камерой, которая позволяет не только защитить обрабатываемый материал от окисления, но и выполняет функцию радиационной защиты. Часто для получения качественного слоя необходимо делать несколько проходов электронным лучом, осуществляющим предварительный прогрев заготовок.

В конце 1990-х годов в научной литературе стали появляться работы по повышению износостойкости титана и сплавов на его основе методами электронно-лучевой наплавки в воздушной среде [15, 16, 25].

Использование в качестве наплавляемого материала карбида бора было показано в работах [26, 27]. Авторами этих работ были получены покрытия толщиной 1,6 мм, содержащие частицы карбида и бориды титана, а также отмечено, что получение композитов TiC-TiB-Ti позволяет повысить высокотемпературную твердость материалов.

В настоящей работе рассматриваются возможности получения на титановых сплавах износостойких слоев толщиной до 3,4 мм методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошков карбида бора и титана. Особое внимание уделяется исследованию влияния режимов обработки на структуру и триботехнические свойства наплавленных слоев.

Материалы и методы исследования

В работе в качестве упрочняемого материала использовался титановый сплав ВТ1-0. Заготовки размером 50 × 100 мм вырезались из листа титана толщиной 12 мм методом гидроабразивной

резки на установке OMAX 5555 JetMachining Center.

В качестве наплавочной смеси использовались порошки титана (производства ООО Химмет, г. Гатчина) и карбида бора марки М20 (ООО ИПК ЮМЭКС, г. Уфа). Концентрации карбида бора в порошковой насыпке в образцах, полученных по режимам 1, 2, 3, составляла 20 % вес., для образца 4 – 12 % вес. (см. таблицу). Для защиты расплава от воздействия воздушной атмосферы использовались сварочные флюсы (30 % вес. CaF_2 и 10 % вес. LiF). Перед нанесением порошковой смеси на поверхность титановой заготовки порошки просушивались в печи для удаления влаги при температуре 150...200 °С и равномерно перемешивались между собой. Плотность порошковой насыпки составляла 0,33 г/см³. Электронно-лучевая обработка материалов осуществлялась в Институте ядерной физики

им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск). Схема промышленного ускорителя электронов приведена в работах [28, 29].

Параметры обработки (см. таблицу) выбирались таким образом, чтобы наплавляемые материалы успели раствориться и равномерно распределиться в ванне расплава.

Для анализа структуры наплавленных слоев были подготовлены поперечные шлифы. Характер распределения и размеры частиц упрочняющих фаз исследовались на нетравленных шлифах с использованием оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m и программы ImageJ. Микроструктура титановой матрицы выявлялась химическим травлением раствором Кролла (H_2O – 18,4 мл, HNO_3 – 1,2 мл и HF – 0,4 мл). Особенности микроструктуры изучались на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP.

Состав наплавляемой смеси и режимы наплавки

| Номер режима | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|--|----|----|--|
| Состав наплавляемой смеси, % вес. | $40\text{Ti} + 20\text{B}_4\text{C} + 30\text{CaF}_2 + 10\text{LiF}$ | | | $48\text{Ti} + 12\text{B}_4\text{C} + 30\text{CaF}_2 + 10\text{LiF}$ |
| Скорость перемещения образцов, мм/с | 10 | | | |
| Частота сканирования, Гц | 50 | | | |
| Расстояние от выпускного окна до заготовки, мм | 90 | | | |
| Энергия электронов, МэВ | 1,4 | | | |
| Ток пучка, мА | 22 | 23 | 24 | 23 |

Распределение микротвердости по глубине наплавленного слоя оценивалось с использованием микротвердомера Wolpert Group 402MVD. Каждая точка на представленных в работе графиках получена на основании пяти измерений. Нагрузка на алмазный индентор составляла 0,98 Н. Фазовый состав слоев оценивался с использованием дифрактометра ARL X'TRA. Дифракционные картины были получены в $\text{Cu K}\alpha$ -излучении в пошаговом режиме с шагом 0,05 град. и временем накопления 5 с на точку.

Триботехнические испытания материалов, полученных при электронно-лучевой наплавке, проводились в соответствии с ГОСТ 23.208–79 в условиях воздействия нежестко закрепленных абразивных частиц. Для испытаний была использована схема, приведенная в работе [30], и

были подготовлены плоские образцы размером 50 × 25 × 10 мм. Нагрузка на образцы составляла 44 Н, общее время испытаний 100 с, скорость вращения резинового ролика 60 об/мин. Степень износа оценивалась по потере веса образца. Общая длина пути трения составила 942,5 м. После изнашивания поверхность образцов исследовалась на растровом электронном микроскопе.

Результаты и обсуждение

Структурные исследования, проведенные на оптическом микроскопе, показали, что в процессе наплавки смеси порошков титана с карбидом бора при токе пучка 22 мА на поверхности титановых заготовок формируются слои толщиной 3 мм с градиентным строением (рис. 1, а). Повыше-

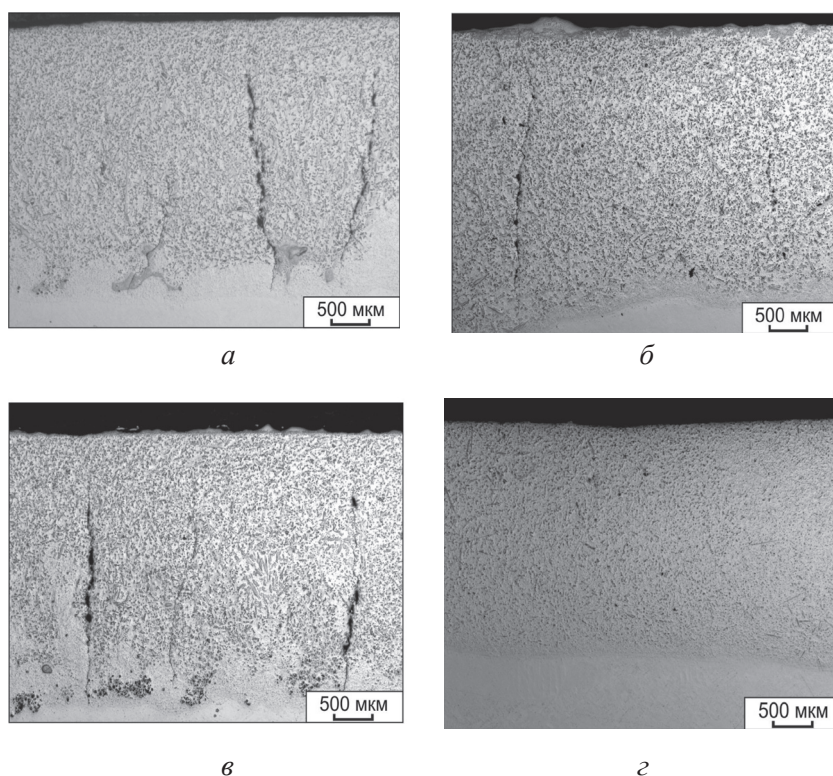


Рис. 1. Структура поверхностных слоев титана, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки смеси порошков титана и 20 % вес. карбида бора (а–в) и смеси порошков титана и 12 % вес. карбида бора (г):

а – ток пучка 22 мА; б, г – ток пучка 23 мА; в – ток пучка 24 мА

ние тока пучка электронов в процессе наплавки на 1 мА способствует увеличению толщины слоев на 0,2 мм. Толщина слоя, полученного при наплавке 48 % титана и 12 % карбида бора, составляет 2,6 мм. В слоях, полученных при наплавке 20 % вес. карбида бора, были обнаружены трещины (рис. 1, а–в). Одной из причин распространения трещин является возникновение в процессе ускоренной кристаллизации растягивающих напряжений. Вторая причина данного явления – хрупкие выделения боридов титана, объемная доля которых составляет ~25 %. Суммарная объемная доля карбидов и боридов титана в наплавленных слоях, полученных при наплавке 20 % вес. B_4C , составляет 37...40 %.

Повышение тока пучка до 24 мА приводит к формированию неоднородной структуры наплавленного слоя (рис. 1, в). В структуре данного образца присутствуют участки с высоким содержанием упрочняющих фаз (до 55 % об.). Для данных зон характерно скопление мелкодисперсных частиц и появление трещин.

Рядом с этими участками присутствуют области доэвтектического состава, где не происходило выделения первичных кристаллов боридов и карбидов титана (объемная доля упрочняющих фаз ~20 %).

В процессе взаимодействия электронов с образцом выделяется большое количество тепла, которое приводит к плавлению наплавочной смеси и материала основы. При этом частицы карбида бора растворяются в ванне расплава. В соответствии с диаграммой состояния системы Ti-C-B в богатых титаном сплавах этой системы возможно появление фаз TiB и TiC. Эти фазы могут появляться как в виде крупных первичных кристаллов, так и в виде мелкодисперсной эвтектики (рис. 1 и 2).

Из рис. 1, в видно, что в связи с кратковременностью процесса наплавки полного растворения частиц B_4C может не произойти. В возникающей ванне расплава частицы карбида бора являются центрами кристаллизации, это наглядно видно на

рис. 2, а. Учитывая высокие скорости нагрева и охлаждения, не все частицы карбида бора успевают прореагировать с жидким титаном. В нижней зоне покрытий, полученных при наплавке 20 % вес. карбида бора, обнаружены скопления нерастворившихся частиц карбида бора (рис. 1, в; 2, в). Данные EDX анализа показали, что в составе частиц зафиксированы только бор и углерод (рис. 2, в). Снижение концентрации карбида бора в исходной порошковой насыпке на 8 % вес.

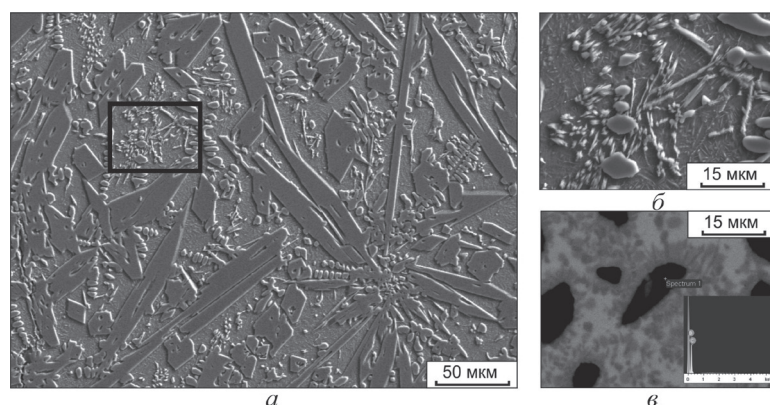
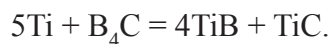
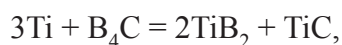


Рис. 2. Растровая электронная микроскопия наплавленных слоев (а, б) и EDX-анализ частиц карбида бора (в)

позволяет исключить образование трещин в наплавленных слоях и способствует полному растворению порошка карбида бора (рис. 1, в).

При взаимодействии титана с карбидом бора возможно протекание следующих реакций:



Следует отметить, что в условиях присутствия большого количества титана фаза TiB является более стабильной, чем TiB_2 . На это также указывают данные работ [31–33].

На рис. 3 показана типичная рентгенограмма полученных образцов. Основными фазами, присутствующими в наплавленных слоях, является α -титан (α' -Ti), карбид титана и моноборид титана. Полученные данные хорошо согласуются с результатами работ по электронно-лучевой [26, 27] и лазерной наплавке карбида бора [32–34].

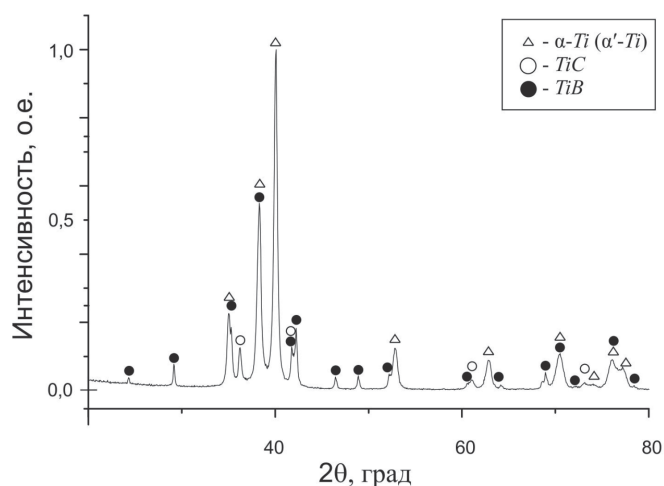


Рис. 3. Типичная дифракционная картина, снятая с наплавленного слоя TiC-TiB-Ti

Анализ диаграммы состояния Ti-B-C [35] показал, что в процессе первичной кристаллизации вначале происходит выделение кристаллов борида титана. Поперечное сечение кристаллов моноборида титана, как правило, имеет форму, близкую к гексагональной (рис. 4, а–д). Следует отметить, что характерным для TiB является ускоренный рост в осевом направлении 010 и медленный рост в поперечном направлении [36–38]. Длина кристаллов борида титана составляет 120...400 мкм, а диаметр 5...30 мкм. В наплавленном слое, полученном при минимальных значениях тока пучка (21 мА), длина TiB достигает 600 мкм. В образце, полученном

при наплавке 48 % Ti –12 % B_4C , толщина первичных выделений борида титана не превышала 15 мкм. Следует отметить, что все кристаллы моноборида титана имели полую сердцевину (рис. 4, а–д). При анализе тонкой структуры композитов системы Ti-B-C авторы работы [39] показали, что борид титана внутри заполнен титаном. Учитывая незначительную разницу в коэффициентах линейного расширения между боридом титана и титаном, при охлаждении не формируется каких-либо дефектов. При приближении к зоне термического влияния морфология первичных кристаллов борида титана все больше отличается от правильной (рис. 4, д). Это обусловлено нехваткой атомов бора для построения идеальных кристаллов. В нижней области наплавленных слоев наблюдается доэвтектическая область с объемной долей упрочняющих частиц ~16 % (рис. 4, е). В данной области наблюдаются только дисперсные эвтектические выделения борида титана в виде тонких полых игл длиной до 20 мкм. Данные частицы, собранные в конгломераты, также можно наблюдать в других зонах образца (рис. 1, а, б).

Для кристаллов карбида титана характерна сферическая и дендритная морфология (рис. 4). При кристаллизации зарождение и рост карбидов титана происходит на плоскостях боридов титана таким образом, чтобы уменьшить поверхностную энергию зародыша. Как правило, такими плоскостями являются (101) и (10-1) [38].

Большой интерес представляет структура титановой матрицы. В поверхностном слое толщиной до 1 мм титановая матрица имеет грубое пластинчатое строение (рис. 4, а). На глубине 1 мм наблюдаются типичная для наплавленных слоев структура закаленного сплава титана (рис. 4, в, з), представляющая собой пластины из α' -фазы титана. Очевидно, что различная скорость охлаждения, а также различия в концентрациях бора и углерода в объемах материала, находящихся на разном расстоянии от поверхности, оказывают влияние на структуру матрицы после охлаждения. Измельчение пластин альфа-титана, возможно, связано с большой концентрацией бора, а также повышенной скоростью охлаждения в данных областях. Авторы работы [40] указывают, что добавки бора в титановые сплавы способствуют измельчению зерна.

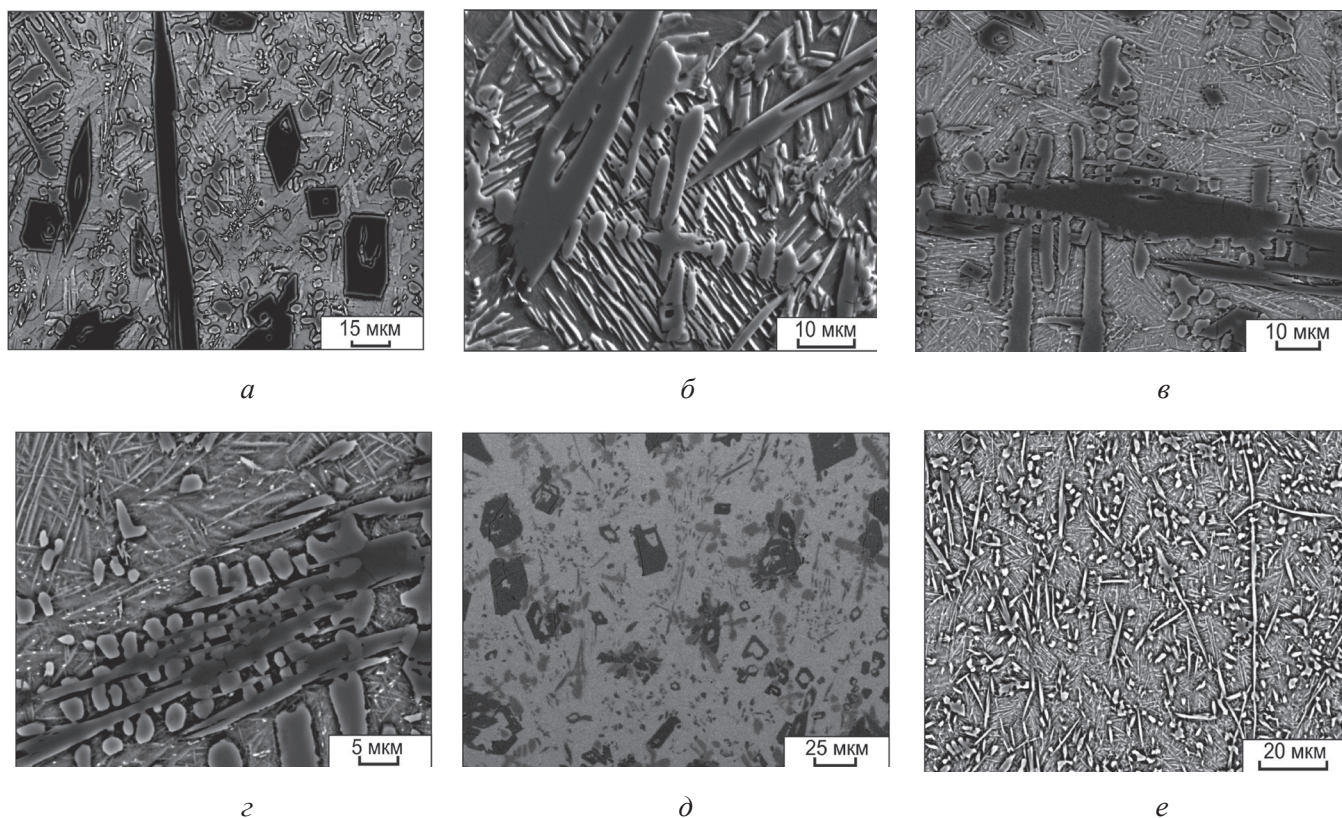


Рис. 4. Микроструктура наплавленных слоев титана, наблюдаемая методом растровой электронной микроскопии:

a – верхняя зона слоев; *б-г* – средняя зона слоев; *д-е* – нижняя зона слоев

Распределение микротвердости по глубине наплавленных слоев приведено на рис. 5. Средний уровень микротвердости слоев, полученных при наплавке 20 % вес. B_4C при токах пучка 22, 22 и 24 мА, составляет 582, 543, 679 НВ соответственно. Повышение тока пучка приводит к более значительному разбавлению наплавленного слоя основным металлом, что должно приводить к снижению концентрации упрочняющих фаз и твердости образцов. Однако образец, полученный при наплавке 20 % вес. карбида бора с током пучка 24 мА, имеет более высокий уровень микротвердости, что связано с локальным увеличением объемной доли упрочняющих фаз до 55 %. Средний уровень микротвердости образцов, полученных при наплавке 12 % карбида бора, составляет 436 НВ. Это обусловлено небольшой объемной долей борида и карбида титана 17 и 10 % соответственно.

Износостойкость оценивалась по результатам испытаний на трение в условиях воздействия нежестко закрепленных абразивных частиц по потере массы образцов после каждого цикла изнашивания. На рис. 6 представлены

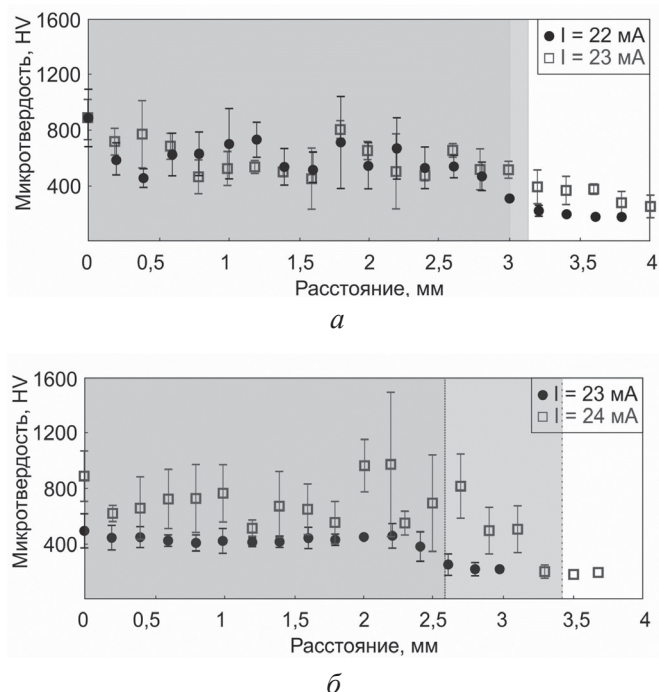


Рис. 5. Распределение микротвердости по глубине материала:

a – наплавка 20 % вес. карбида бора при токах пучка 22 и 23 мА; *б* – наплавка 20 % вес. карбида бора при токе пучка 24 мА и наплавка 12 % вес. карбида бора при токе пучка 24 мА

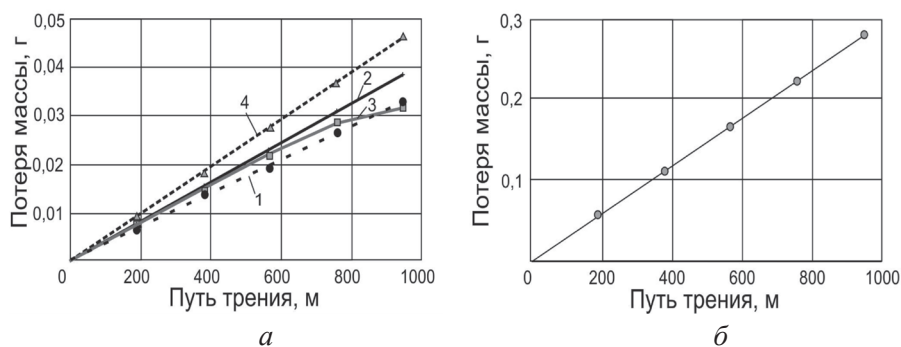


Рис. 6. Потеря массы наплавленных слоев (а) и технически чистого титана (б) при трении в условиях воздействия нежестко закрепленных абразивных частиц:

1 – наплавка 20 % карбида бора при токе пучка 22 мА; 2 – наплавка 20 % карбида бора при токе пучка 23 мА; 3 – наплавка 20 % карбида бора при токе пучка 24 мА; 4 – наплавка 12 % карбида бора при токе пучка 23 мА

результаты испытаний. Полученные данные коррелируют с результатами по оценке микротвердости. Наплавленный слой, у которого наибольшее среднее значение микротвердости, имеет меньшие потери материала при изнашивании. Максимальной износостойкостью обладает образец 3, полученный при наплавке порошков карбида бора и титана с током пучка 24 мА. Его износостойкость в 8,4 раза выше износостойкости технически чистого титана. Однако скорость потери массы образца была нелинейной, что указывает на неравномерный характер изнашивания. Наименьшей износостойкостью обладает образец 4, имеющий самую низкую твердость и объемную долю упрочняющих фаз. Следует тем не менее отметить, что даже относительно невысокое содержание упрочняющих фаз в образце 4 (27 %) способствует повышению уровня износостойкости в шесть раз по сравнению с необработанным материалом.

На рис. 7 показаны микрофотографии поверхности материалов после изнашивания. На поверхности титана наблюдаются глубокие канавки, идущие в направлении изнашивания (рис. 7, а).

Анализ изношенной поверхности наплавленных слоев показал, что упрочняющие частицы являются эффективным барьером,

препятствующим интенсивному изнашиванию титановой матрицы. На это указывают многочисленные выделения частиц борида титана. Следует отметить, что данные частицы прочно связаны с титаном и не выкрашиваются в процессе изнашивания.

Выводы

Проведенные исследования показали, что электронно-лучевая наплавка смеси порошков титана и карбида бора позволяет сформировать на поверхности сплава ВТ1-0 качественные слои толщиной 2,6 мм, не содержащие пор, трещин и нерастворившихся частиц порошка. Основными типами упрочняющих частиц в наплавленных слоях являются карбиды и борида титана. Разные скорости нагрева и охлаждения разных объемов материала в процессе наплавки приводят к различному строению титановой матрицы. В середине наплавленного слоя зафиксировано формирование закалочных структур.

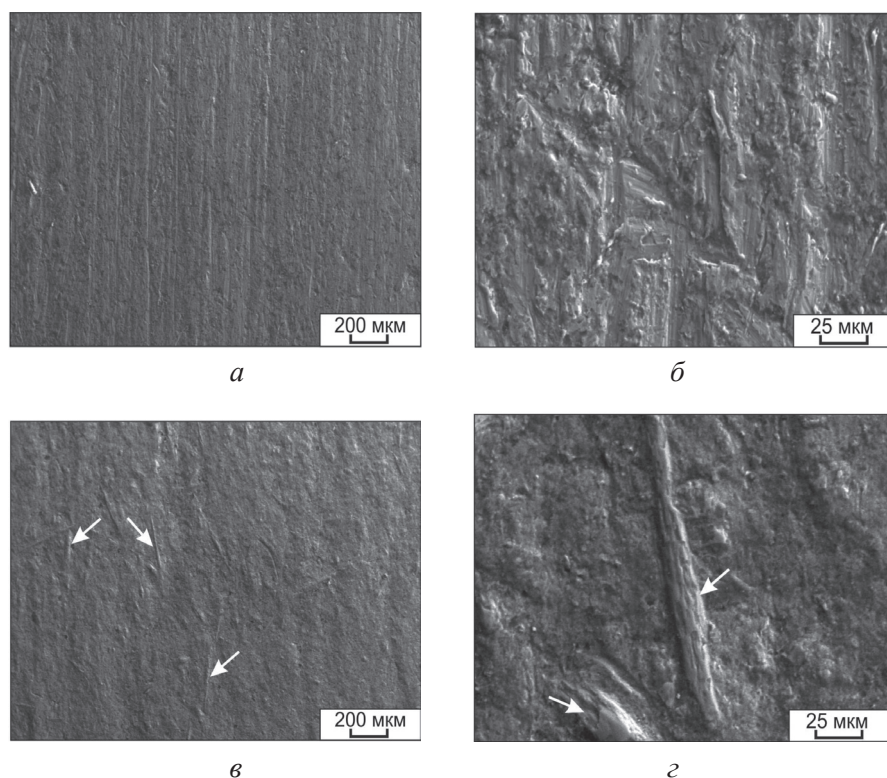


Рис. 7. Растровая электронная микроскопия поверхности после износа титанового сплава ВТ1-0 (а, б) и наплавленного слоя (образец 2) (в, г). Стрелками показаны частицы упрочняющих фаз

ДюрOMETрические исследования показали, что среднее значение микротвердости поверхностных слоев титана после наплавки повышается до 436...679 HV и зависит от режимов обработки.

Выделение в наплавленных слоях упрочняющих фаз с объемной долей выше 35 % способствует повышению уровня износостойкости более чем в восемь раз выше по сравнению с титановым сплавом BT1-0, однако способствует возникновению трещин. Снижение концентрации карбида бора в наплавочной смеси до 12 % позволяет сформировать качественные покрытия, уровень износостойкости которых в шесть раз выше по сравнению с необработанным титаном.

Список литературы

1. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications / ed. by C. Leyens and M. Peters. – Weinheim: Wiley-VCH, 2005. – 532 p.
2. Dong H. Tribological properties of titanium-based alloys // Surface Engineering of Light Alloys. – Oxford: Woodhead Publishing, 2010. – P. 58–80. – ISBN 978-1-845-69945-1.
3. Miller P.D., Holladay J.W. Friction and wear properties of titanium // Wear. – 1958. – Vol. 2. – P. 133–140. – doi: 10.1016/0043-1648(58)90428-9.
4. Rabinowicz E. Friction properties of titanium and its alloys // Metal Progress. – 1954. – Vol. 65 (2). – P. 107–110.
5. Alam M.O., Haseeb A.S.M.A. Response of Ti–6Al–4V and Ti–24Al–11Nb alloys to dry sliding wear against hardened steel // Tribology International. – 2002. – Vol. 35, iss. 6. – P. 357–362. – doi: 10.1016/S0301-679X(02)00015-4.
6. Budinski K.G. Tribological properties of titanium alloys // Wear. – 1991. – Vol. 151, iss. 2. – P. 203–217. – doi: 10.1016/0043-1648(91)90249-T.
7. Sun R.L., Lei Y.W. Microstructure and wear resistance of laser clad layer of TiN on TC4 alloy // Journal of Tianjin Polytechnic University. – 2007. – Vol. 26, iss. 4. – P. 57–59.
8. Filip R., Sieniawski J., Pleszak E. Formation of surface layers on Ti–6Al–4V titanium alloy by laser alloying // Surface Engineering. – 2006. – Vol. 22, iss. 1. – P. 53–57. – doi: 10.1179/174329406X84967.
9. Laser surface modification of titanium alloys – a review / Y.S. Tian, C.Z. Chen, D.Y. Wang, T.Q. Lei // Surface Review and Letters. – 2005. – Vol. 12, iss. 01. – P. 123–130. – doi: 10.1142/S0218625X0500686X.
10. Research progress on laser surface modification of titanium alloys / Y.S. Tian, C.Z. Chen, S.T. Li, Q.H. Huo // Applied Surface Science. – 2005. – Vol. 242, iss. 1–2. – P. 177–184. – doi: 10.1016/j.apsusc.2004.08.011.
11. Development of laser cladding wear-resistant coating on titanium alloys / R. Bao, H. Yu, C. Chen, B. Qi, L. Zhang // Surface Review and Letters. – 2006. – Vol. 13. – P. 645–654. – doi: 10.1142/S0218625X06008608.
12. Saleh A.F., Abboud J.H., Benyounis K.Y. Surface carburizing of Ti–6Al–4V alloy by laser melting // Optics and Lasers in Engineering. – 2010. – Vol. 48, iss. 3. – P. 257–267. – doi: 10.1016/j.optlaseng.2009.11.001.
13. Molian P.A., Hualun L. Laser cladding of Ti–6Al–4V with bn for improved wear performance // Wear. – 1989. – Vol. 130, iss. 2. – P. 337–352. – doi: 10.1016/0043-1648(89)90187-7.
14. Получение износостойких покрытий на титановых сплавах методом вневакуумной электронно-лучевой обработки / О.Г. Ленивцева, В.В. Самойленко, М.Г. Голковский, И.А. Батаев, Р.А. Достовалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 3 (60). – С. 103–109.
15. Hardness improvement of TiB₂/Ti surface-alloyed material fabricated by high-energy electron beam irradiation / J.C. Oh, K. Euh, S. Lee, Y. Koo, N.J. Kim // Scripta Materialia. – 1998. – Vol. 39, iss. 10. – P. 1389–1394. – doi: 10.1016/S1359-6462(98)00325-X.
16. Oh J.C., Choo D.-K., Lee S. Microstructural modification and hardness improvement of titanium-base surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron beam irradiation // Surface and Coatings Technology. – 2000. – Vol. 127, iss. 1. – P. 76–85. – doi: 10.1016/S0257-8972(99)00664-7.
17. Kühnle T., Partes K. In-situ formation of titanium boride and titanium carbide by selective laser melting // Physics Procedia. – 2012. – Vol. 39. – P. 432–438. – doi: 10.1016/j.phpro.2012.10.058.
18. Baker T.N., Selamat M.S. Surface engineering of Ti–6Al–4V by nitriding and powder alloying using CW CO₂ laser // Materials Science and Technology. – 2008. – Vol. 24, iss. 2. – P. 189–200. – doi: 10.1179/174328407X226563.
19. WCp/Ti–6Al–4V graded metal matrix composites layer produced by laser melt injection / Y. Chen, D. Liu, F. Li, L. Li // Surface and Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202, iss. 19. – P. 4780–4787. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2008.04.057.
20. Höche D., Schaaf P. Laser nitriding: investigations on the model system TiN. A review // Heat and Mass Transfer. – 2011. – Vol. 47, iss. 5. – P. 519–540. – doi: 10.1007/s00231-010-0742-z.
21. High-energy electron beam cladding of titanium and carbon on titanium alloy / O.G. Lenivtseva,

O.A. Butylenkova, E.D. Golovin, M.G. Golkovsky // The 8th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2013), Ulaanbaatar, Mongolia, 28 June – 1 July 2013. – Ulaanbaatar: MUST, 2013. – P. 152–155.

22. Structure and properties of titanium surface layers after electron beam alloying with powder mixtures containing carbon / O.G. Lenivtseva, I.A. Bataev, M.G. Golkovski, A.A. Bataev, V.V. Samoilenko, N.V. Plotnikova // *Applied Surface Science*. – 2015. – Vol. 355. – P. 320–326. – doi: 10.1016/j.apsusc.2015.07.043.

23. *Ayers J.D., Schaefer R.J., Robey W.P.* A laser processing technique for improving the wear resistance of metals // *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. – 1981. – Vol. 33, iss. 8. – P. 19–23. – doi: 10.1007/BF03339467.

24. *Draper C.W., Ewing C.A.* Laser surface alloying: a bibliography // *Journal of Materials Science*. – 1984. – Vol. 19, iss. 12. – P. 3815–3825. – doi: 10.1007/BF00980743.

25. Improvement of hardness and wear resistance in SiC/Ti–6Al–4V surface composites fabricated by high-energy electron beam irradiation / J.C. Oh, E. Yun, M.G. Golkovski, S. Lee // *Materials Science and Engineering: A*. – 2003. – Vol. 351, iss. 1–2. – P. 98–108. – doi: 10.1016/S0921-5093(02)00821-3.

26. *Lee C.S., Oh J.C., 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.

27. *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.

28. Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel / I.A. Bataev, A.A. Bataev, M.G. Golkovsky, A.Y. 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.

29. Structure of surface layers produced by nonvacuum electron beam boriding / I.A. Bataev, A.A. Bataev, M.G. Golkovski, 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.

30. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка углеродсодержащих порошковых смесей на заготовки из титана ВТ1-0 / О.Г. Ленивцева, И.А. Батаев, В.В. Иванцовский, Н.С. Белоусова, Е.Д. Головин, Т.А. Зимоглядова // *Обработка металлов (технология,*

оборудование, инструменты). – 2013. – № 4 (61). – С. 49–57.

31. In situ technique for synthesizing (TiB+TiC)/Ti composites / X. Zhang, W. Lü, D. Zhang, R. Wu, Y. Bian, P. Fang // *Scripta Materialia*. – 1999. – Vol. 41, iss. 1. – P. 39–46. – doi: 10.1016/S1359-6462(99)00087-1.

32. Microstructural characterization of titanium matrix composite coatings reinforced by in situ synthesized TiB + TiC fabricated on Ti6Al4V by laser cladding / J. Li, Z. Yu, H. Wang, M. Li // *Rare Metals*. – 2010. – Vol. 29, iss. 5. – P. 465–472. – doi: 10.1007/s12598-010-0151-y.

33. Study on microstructure of laser in situ formation of TiBX and TiC titanium composite coatings / J. Liang, S. Chen, C. Liu, F. Liu // *Materials Science Forum*. – 2011. – Vol. 686. – P. 646–653. – doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.686.646.

34. *Zhang Y., Sun J., 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.

35. Handbook of ternary alloy phase diagrams / P. Villars, A. Prince, H. Okamoto, eds. – Materials Park, Ohio: ASM International, 1994. – ISBN 10: 0871705265. – ISBN 13: 9780871705266.

36. Microstructural characterization of TiB in situ synthesized titanium matrix composites prepared by common casting technique / W. Lu, D. Zhang, X. Zhang, R. Wu, T. Sakata, H. Mori // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2001. – Vol. 327, iss. 1–2. – P. 240–247. – doi: 10.1016/S0925-8388(01)01445-1.

37. Evolution of microstructure and phases in in situ processed Ti–TiB composites containing high volume fractions of TiB whiskers / S.S. Sahay, K.S. Ravichandran, R. Atri, B. Chen, J. Rubin // *Journal of Materials Research*. – 1999. – Vol. 14, iss. 11. – P. 4214–4223. – doi: 10.1557/JMR.1999.0571.

38. TEM characterization of symbiosis structure of in situ TiC and TiB prepared by reactive processing of Ti–B4C / D.R. Ni, L. Geng, J. Zhang, Z.Z. Zheng // *Materials Letters*. – 2008. – Vol. 62, iss. 4–5. – P. 686–688. – doi: 10.1016/j.matlet.2007.06.033.

39. *Kooi B.J., Pei Y.T., Hosson J.T.M. de.* The evolution of microstructure in a laser clad TiB–Ti composite coating // *Acta Materialia*. – 2003. – Vol. 51, iss. 3. – P. 831–845. – doi: 10.1016/S1359-6454(02)00475-5.

40. Grain refinement of cast titanium alloys via trace boron addition / S. Tamirisakandala, R.B. Bhat, J.S. Tiley, D.B. Miracle // *Scripta Materialia*. – 2005. – Vol. 53, iss. 12. – P. 1421–1426. – doi: 10.1016/j.scriptamat.2005.08.020.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4 (73), October – December 2016, Pages 63–74

Structure and properties of TiB-TiC-Ti layers fabricated on cp-titanium substrates by electron beam cladding

Lenivtseva O.G.¹, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, Associate Professor,
e-mail: lenivtseva_olga@mail.ru

Drobyaz E.A.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: ekaterina.drobyaz@yandex.ru

Gontarenko A.S.^{2, 1}, Junior researcher, Assistant, e-mail: gontarenko@iw.uni-hannover.de

Zimogliadova T.A.¹, Ph.D. student, e-mail: zimogliadovatatiana@gmail.com

Chuchkova L.V.¹, Master's Degree student, e-mail: l_chuchkova@bk.ru

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

²Leibniz University of Hannover, 2 University str., Garbsen, 30823, Germany

Abstract

The influence of non-vacuum electron beam treatment modes on the structure and properties of wear resistant TiB-TiC-Ti layers formed on the surface of VT1-0 titanium alloy is investigated. A mixture of titanium, boron carbide and flux powders is used as filler. The structure and phase composition of the layers are investigated by the means of optical microscopy and scanning electron microscopy, and X-ray diffractometry. The experiments resulted in the formation of layers with the thickness of 3.4 mm consisting of α (α')-Ti, titanium carbide and titanium monoboride. Structural investigations revealed a high volume fraction of TiC and TiB reinforcing compounds contributed in the formation of cracks in the clad layers. Variation of technological regimes of the electron beam treatment affected the hardness of clad layers. Treatment of the sample containing 20 wt. % of boron carbide in a filler with a beam current of 22 μ A led to the formation of the layer with hardness of 582 HV. This value was about 3.5-fold higher than titanium microhardness. Increase of a beam current by 1 μ A resulted in decrease of the microhardness level to 543 HV. Treatment of the sample containing 12 wt. % of boron carbide in a filler led to the formation of the layer with hardness of 436 HV.

Wear resistance of fabricated materials is estimated in the conditions of friction by non-rigidly fixed abrasive particles. The best characteristics possessed the layers obtained by cladding of 20 wt. % boron carbide. Intensity of wear of the coated samples was 8-fold lower comparing to cp-titanium.

Keywords

Electron beam cladding, titanium, titanium carbide, titanium boride, microhardness, wear resistance

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-63-74

References

1. Leyens C., Peters M., eds. *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. Weinheim, Wiley-VCH, 2005. 532 p. ISBN 978-3-527-30534-6.
2. Dong H. Tribological properties of titanium-based alloys. *Surface Engineering of Light Alloys*. Oxford, Woodhead Publishing, 2010, pp. 58–80. ISBN 978-1-845-69945-1.
3. Miller P.D., Holladay J.W. Friction and wear properties of titanium. *Wear*, 1958, vol. 2, pp. 133–140. doi: 10.1016/0043-1648(58)90428-9
4. Rabinowicz E. Friction properties of titanium and its alloys. *Metal Progress*, 1954, vol. 65 (2), pp. 107–110.
5. Alam M.O., Haseeb A.S.M.A. Response of Ti–6Al–4V and Ti–24Al–11Nb alloys to dry sliding wear against hardened steel. *Tribology International*, 2002, vol. 35, iss. 6, pp. 357–362. doi: 10.1016/S0301-679X(02)00015-4
6. Budinski K.G. Tribological properties of titanium alloys. *Wear*, 1991, vol. 151, iss. 2, pp. 203–217. doi: 10.1016/0043-1648(91)90249-T
7. Sun R.L., Lei Y.W. Microstructure and wear resistance of laser clad layer of TiN on TC4 alloy. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2007, vol. 26, iss. 4, pp. 57–59.

8. Filip R., Sieniawski J., Pleszak E. Formation of surface layers on Ti-6Al-4V titanium alloy by laser alloying. *Surface Engineering*, 2006, vol. 22, iss. 1, pp. 53–57. doi: 10.1179/174329406X84967
9. Tian Y.S., Chen C.Z., Wang D.Y., Lei T.Q. Laser surface modification of titanium alloys – a review. *Surface Review and Letters*, 2005, vol. 12, iss. 01, pp. 123–130. doi: 10.1142/S0218625X0500686X
10. Tian Y.S., Chen C.Z., Li S.T., Huo Q.H. Research progress on laser surface modification of titanium alloys. *Applied Surface Science*, 2005, vol. 242, iss. 1–2, pp. 177–184. doi: 10.1016/j.apsusc.2004.08.011
11. Bao R., Yu H., Chen C., Qi B., Zhang L. Development of laser cladding wear-resistant coating on titanium alloys. *Surface Review and Letters*, 2006, vol. 13, pp. 645–654. doi: 10.1142/S0218625X06008608
12. Saleh A.F., Abboud J.H., Benyounis K.Y. Surface carburizing of Ti-6Al-4V alloy by laser melting. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, vol. 48, iss. 3, pp. 257–267. doi: 10.1016/j.optlaseng.2009.11.001
13. Molian P.A., Hualun L. Laser cladding of Ti-6Al-4V with bn for improved wear performance. *Wear*, 1989, vol. 130, iss. 2, pp. 337–352. doi: 10.1016/0043-1648(89)90187-7
14. Lenivtseva O.G., Bataev I.A., Golkovsky M.G., Samoylenko V.V., Dostovalov R.A. Poluchenie iznosostoykikh pokrytii na titanovykh splavakh metodom vnevakuumnoi elektronno-luchevoi obrabotki [Production of wear-resistance coatings on titanium alloys by the method of non-vacuum electron-beam cladding]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 3 (60), pp. 103–109.
15. Oh J.C., Euh K., Lee S., Koo Y., Kim N.J. Hardness improvement of TiB₂/Ti surface-alloyed material fabricated by high-energy electron beam irradiation. *Scripta Materialia*, 1998, vol. 39, iss. 10, pp. 1389–1394. doi: 10.1016/S1359-6462(98)00325-X
16. Oh J.C., Choo D.-K., Lee S. Microstructural modification and hardness improvement of titanium-base surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron beam irradiation. *Surface and Coatings Technology*, 2000, vol. 127, iss. 1, pp. 76–85. doi: 10.1016/S0257-8972(99)00664-7
17. Kühnle T., Partes K. In-situ formation of titanium boride and titanium carbide by selective laser melting. *Physics Procedia*, 2012, vol. 39, pp. 432–438. doi: 10.1016/j.phpro.2012.10.058
18. Baker T.N., Selamat M.S. Surface engineering of Ti-6Al-4V by nitriding and powder alloying using CW CO₂ laser. *Materials Science and Technology*, 2008, vol. 24, iss. 2, pp. 189–200. doi: 10.1179/174328407X226563
19. Chen Y., Liu D., Li F., Li L. WCp/Ti-6Al-4V graded metal matrix composites layer produced by laser melt injection. *Surface and Coatings Technology*, 2008, vol. 202, iss. 19, pp. 4780–4787. doi: 10.1016/j.surfcoat.2008.04.057
20. Höche D., Schaaf P. Laser nitriding: investigations on the model system TiN. A review. *Heat and Mass Transfer*, 2011, vol. 47, iss. 5, pp. 519–540. doi: 10.1007/s00231-010-0742-z
21. Lenivtseva O.G., Butylenkova O.A., Golovin E.D., Golkovsky M.G. High-energy electron beam cladding of titanium and carbon on titanium alloy. *The 8th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2013): proceedings*, Ulaanbaatar, Mongolia, 28 June – 1 July 2013, vol. 1, pp. 152–155.
22. Lenivtseva O.G., Bataev I.A., Golkovski M.G., Bataev A.A., Samoilenko V.V., Plotnikova N.V. Structure and properties of titanium surface layers after electron beam alloying with powder mixtures containing carbon. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 355, pp. 320–326. doi: 10.1016/j.apsusc.2015.07.043
23. Ayers J.D., Schaefer R.J., Robey W.P. A laser processing technique for improving the wear resistance of metals. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 1981, vol. 33, iss. 8, pp. 19–23. doi: 10.1007/BF03339467
24. Draper C.W., Ewing C.A. Laser surface alloying: a bibliography. *Journal of Materials Science*, 1984, vol. 19, iss. 12, pp. 3815–3825. doi: 10.1007/BF00980743
25. Oh J.C., Yun E., Golkovski M.G., Lee S. Improvement of hardness and wear resistance in SiC/Ti-6Al-4V surface composites fabricated by high-energy electron beam irradiation. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, vol. 351, iss. 1–2, pp. 98–108. doi: 10.1016/S0921-5093(02)00821-3
26. Lee C.S., Oh J.C., 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
27. 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
28. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovsky M.G., Teplykh A.Y., 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

29. 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
30. Lenivtseva O.G., Bataev I.A., Ivancivsky V.V., Belousova N.S., Golovin E.D., Zimoglyadova T.A. Vne-vakuumnaya elektronno-luchevaya naplavka uglirodsoderzhashchikh poroshkovykh smesei na zagotovki iz titana VT1-0 [Atmospheric electron-beam overlay welding of carbon containing powder mixtures onto technically pure titanium VT1-0]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 4 (61), pp. 49–57.
31. Zhang X., Lü W., Zhang D., Wu R., Bian Y., Fang P. In situ technique for synthesizing (TiB+TiC)/Ti composites. *Scripta Materialia*, 1999, vol. 41, iss. 1, pp. 39–46. doi: 10.1016/S1359-6462(99)00087-1
32. Li J., Yu Z., Wang H., Li M. Microstructural characterization of titanium matrix composite coatings reinforced by in situ synthesized TiB + TiC fabricated on Ti6Al4V by laser cladding. *Rare Metals*, 2010, vol. 29, iss. 5, pp. 465–472. doi: 10.1007/s12598-010-0151-y
33. Liang J., Chen S., Liu C., Liu F. Study on microstructure of laser in situ formation of TiBX and TiC titanium composite coatings. *Materials Science Forum*, 2011, vol. 686, pp. 646–653. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.686.646
34. Zhang Y., Sun J., 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
35. Villars P., Prince A., Okamoto H., eds. *Handbook of ternary alloy phase diagrams*. Materials Park, Ohio, ASM International, 1994. ISBN 10: 0871705265. ISBN 13: 9780871705266.
36. Lu W., Zhang D., Zhang X., Wu R., Sakata T., Mori H. Microstructural characterization of TiB in in situ synthesized titanium matrix composites prepared by common casting technique. *Journal of Alloys and Compounds*, 2001, vol. 327, iss. 1–2, pp. 240–247. doi: 10.1016/S0925-8388(01)01445-1
37. Sahay S.S., Ravichandran K.S., Atri R., Chen B., Rubin J. Evolution of microstructure and phases in in situ processed Ti–TiB composites containing high volume fractions of TiB whiskers. *Journal of Materials Research*, 1999, vol. 14, iss. 11, pp. 4214–4223. doi: 10.1557/JMR.1999.0571
38. Ni D.R., Geng L., Zhang J., Zheng Z.Z. TEM characterization of symbiosis structure of in situ TiC and TiB prepared by reactive processing of Ti–B4C. *Materials Letters*, 2008, vol. 62, iss. 4–5, pp. 686–688. doi: 10.1016/j.matlet.2007.06.033
39. Kooi B.J., Pei Y.T., Hosson J.T.M. de. The evolution of microstructure in a laser clad TiB–Ti composite coating. *Acta Materialia*, 2003, vol. 51, iss. 3, pp. 831–845. doi: 10.1016/S1359-6454(02)00475-5
40. Tamirisakandala S., Bhat R.B., Tiley J.S., Miracle D.B. Grain refinement of cast titanium alloys via trace boron addition. *Scripta Materialia*, 2005, vol. 53, iss. 12, pp. 1421–1426. doi: 10.1016/j.scriptamat.2005.08.020

Funding

The reported study was funded by RFBR, according to the research project No. 16-33-60066 mol_a_dk

Article history

Received 12 October 2016

Revised 21 October 2016

Accepted 15 November 2016