



# ВНЕВАКУУМНАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ НАПЛАВКА УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ НА ЗАГОТОВКИ ИЗ ТИТАНА VT1-01\*

*О.Г. ЛЕНИВЦЕВА, аспирант*

*И.А. БАТАЕВ, канд. техн. наук, доцент*

*В.В. ИВАНЦИВСКИЙ, доктор техн. наук, доцент*

*Н.С. БЕЛОУСОВА, канд. техн. наук, доцент*

*Е.Д. ГОЛОВИН, канд. техн. наук, доцент*

*Т.А. ЗИМОГЛЯДОВА, студент*

*(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 1 октября 2013

Рецензирование 30 октября 2013

Принята к печати 1 ноября 2013

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

Представлены результаты исследований структуры и свойств поверхностно легированных заготовок из титана VT1-0, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки углеродсодержащих порошковых смесей. В качестве наплавочных материалов использовалась смесь порошка титана и ниобия с графитом, порошок ниобия с графитом и порошок титана с графитом. Для защиты материалов от воздействия атмосферных газов в процессе наплавки в порошковую смесь добавляли 50 % флюса  $\text{CaF}_2$ . Применение вневакуумной электронно-лучевой наплавки позволяет получать покрытия, отличающиеся высоким качеством и толщиной до 1,7 мм. По данным рентгеноструктурного анализа легированный поверхностный слой состоит из карбида титана (TiC),  $\alpha$ -фазы титана. Микротвердость поверхностных слоев увеличивается с 1,8 до 4,8 ГПа. Полученные поверхностно легированные слои отличаются повышенной износостойкостью в условиях трения о нежестко закрепленные частицы абразива. При этом покрытия на титане не приводят к катастрофическому снижению ударной вязкости материала.

**Ключевые слова:** титан, карбид титана, электронно-лучевая обработка, износостойкость, микротвердость.

## Введение

Титановые сплавы обладают рядом недостатков, ограничивающих или затрудняющих их применение в некоторых отраслях промышленности. К таким недостаткам относятся, например, высокий коэффициент трения и низкая износостойкость. Экспериментально показано, что эффективными методами повышения триботехнических свойств титановых сплавов являются методы поверхностного упрочнения

[1–3]. На сегодняшний день активно развиваются технологии поверхностного легирования титановых сплавов, основанные на применении высокоэнергетических источников нагрева, таких как лазерный и электронный луч [4–13]. При обработке титановых сплавов необходимо использовать защитную атмосферу (например, аргон). Это связано с высокой химической активностью титана, которая в значительной степени проявляется при температурах выше 400 °С [14].

\* Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, соглашение № 14.В37.21.0051 от 16 июля 2012 года.

Для повышения твердости и износостойкости при легировании поверхностных слоев применяются порошки карбидов, нитридов и боридов металлов [4–6, 8, 9, 13]. Для повышения коррозионной стойкости титана возможна наплавка порошков тантала, ниобия, молибдена [10, 12].

В работе W.L. Wu [15] рассматривается технология получения покрытий на титановом сплаве Ti-6Al-4V. В качестве наплавочных материалов использовались порошки титана и карбида титана. Отмечается, что полученные покрытия обладают высокой твердостью и износостойкостью.

Для получения высокопрочных частиц карбида титана в работе [5] с использованием 2 кВт Nd-YAG лазера на титан наплавляли порошковые смеси, содержащие 5, 10, 15 и 20 % углеродных нанотрубок (УНТ). Было показано, что при добавлении 20 % УНТ в покрытия появляются трещины. При наплавке 5 и 10 % УНТ карбидные частицы представляют собой тонкие иглы. Увеличение содержания УНТ до 15 и 20 % приводит к росту размеров частиц, осей дендритов. Авторами было показано, что увеличение содержания УНТ повышает микротвердость покрытий.

В работе [16] наплавку порошков (TiC и Ti) производили CO<sub>2</sub>-лазером типа HL-2000. Было показано, что твердость уменьшается по мере приближения к подложке. При этом твердость вблизи поверхности покрытия составляет 1400 HV, что в 4,5 раза выше твердости подложки (300 HV).

Основным недостатком лазерных установок является их высокая стоимость и низкий КПД обработки. В данной работе для поверхностного легирования титановых сплавов была использована технология наплавки порошковых смесей электронным лучом, выведенным в атмосферу. Преимуществами данной технологии являются отсутствие вакуумных камер и высокая производительность процесса наплавки, что позволяет проводить обработку крупногабаритных деталей в атмосфере воздуха.

В работе исследовались структурные особенности и износостойкость поверхностно легированных слоев титана VT1-0, полученных методом электронно-лучевой наплавки углеродсодержащих порошковых смесей.

## 1. Материалы и методы исследования

При реализации технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки углеродсодержащих порошковых смесей в качестве основного материала использовались пластины титана VT1-0 размерами 100×50×10 мм. Для удаления окислы поверхность заготовок подвергалась шлифованию. Несмотря на кратковременность теплового воздействия в процессе электронно-лучевой обработки, атмосферные газы оказывают существенное влияние на качество получаемых покрытий. Поэтому для предотвращения окисления и обеспечения равномерного плавления порошков в наплавочную смесь добавляли 50 % (вес.) защитного флюса CaF<sub>2</sub>. В качестве легирующих компонентов использовались углерод и ниобий. В ряде случаев для улучшения смачивания порошков графита (C) и ниобия (Nb) в порошковую смесь добавлялся титан (Ti). В статье представлены результаты трех наиболее репрезентативных режимов, для обозначения которых в тексте используются аббревиатуры 1TNC (в наплавочной смеси использовали порошки Ti, Nb и C), 2NC (порошки Nb и C), 3TC (порошки Ti и C). Состав и доля каждого компонента в наплавочной смеси представлены в табл. 1.

Компоненты порошковой смеси равномерно перемешивались и наносились на заготовки из титана VT1-0 с плотностью насыпки 0,2 г/см<sup>2</sup>. Наплавка осуществлялась с использованием ускорителя ЭЛВ-6 в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Обработка титановых заготовок выполнялась по следующим технологическим режимам, основанным на предыдущих экспериментах [9–12, 10]: энергия пучка электронов – 1,4 МэВ, ток пучка электронов – 32 мА, расстояние от выпускного окна до заготовки – 90 мм, частота сканирования – 50 Гц,

Таблица 1

Состав и процентное содержание компонентов порошковой смеси

Номер образца	Процентное содержание элемента в исходной насыпке, % (вес.)			Процентное содержание флюса в исходной насыпке, % (вес.)
	Ti	Nb	C	CaF <sub>2</sub>
1TNC	23	21	6	50
2NC	0	40	10	50
3TC	40	0	10	50

скорость перемещения заготовок относительно пучка электронов – 25 мм/с.

Потери основного порошка в процессе обработки, определенные весовым методом, не превышали 3 %.

Исследование структуры поверхностно легированных материалов при увеличениях до 1000 крат проводилось на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer A1m. При больших увеличениях исследования были выполнены на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP.

Для выявления структуры поверхностно легированный слой травили раствором Кролля ( $H_2O$  – 18,4 мл,  $HNO_3$  – 1,2 мл и  $HF$  – 0,4 мл). Фазовый состав покрытий исследовали с использованием рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA. Дифракционные картины были получены в  $Cu K\alpha$ -излучении в пошаговом режиме.

Для определения микротвердости образцов использовался твердомер Wolpert Group 402 MVD. Индентором служила четырехгранная алмазная пирамида. Измерения микротвердости осуществлялись на поперечных шлифах в направлении от поверхности к основному металлу. Нагрузка на индентор при проведении испытаний составляла 0,98 Н.

Износостойкость поверхностно легированных слоев титана определялась при трении о жестко закрепленные абразивные частицы (ГОСТ

23.208-79). В качестве абразива выступали частицы речного песка размером до 0,3 мм. Подача песка в зону контакта «ролик – испытуемый образец» осуществлялась по лотку, установленному под углом  $45^\circ$ . В процессе испытаний резиновый ролик диаметром 50 мм вращался с постоянной скоростью. Усилие прижатия ролика к образцу было также постоянным. Для оценки степени износа использовали потерю массы образца. Длина пути трения при испытании составила 942,5 м. Поверхность образцов после изнашивания исследовалась на растровом электронном микроскопе.

Испытания на ударный изгиб проводились на маятниковом копре METROCOM в соответствии с ГОСТ 9454-78. На образцы размерами  $50 \times 10 \times 10$  мм перпендикулярно наплавленному слою наносился V-образный концентратор напряжения. В результате испытаний определяли ударную вязкость материала KCV. Подобная схема испытаний использовалась ранее в работе [18].

## 2. Результаты исследований и их обсуждение

Металлографический анализ структуры материалов, полученных при вневакуумной электронно-лучевой наплавке углеродсодержащих порошковых смесей с использованием методов оптической и электронной микроскопии свиде-

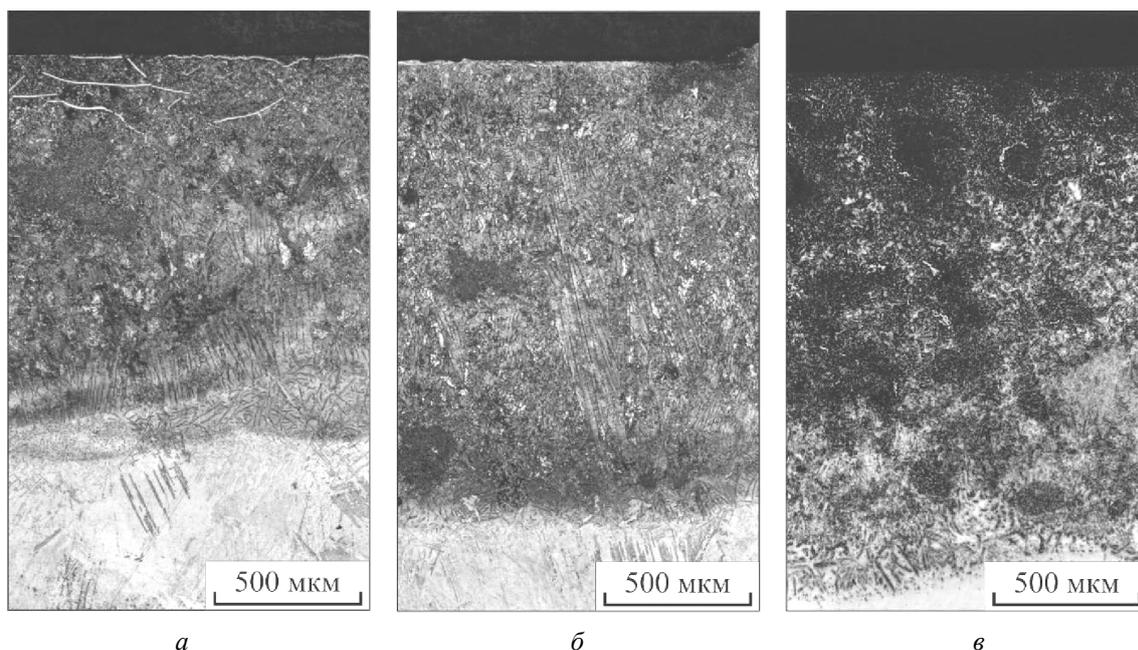


Рис. 1. Структура поверхностно легированного слоя, полученного методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки углеродсодержащих порошковых смесей:

*a* – режим 1TNC; *b* – режим 2NC; *v* – режим 3TC

тельствует о высоком качестве полученных слоев. На рис. 1 представлены панорамы поверхностно легированного слоя. Дефектов (микротрещин, крупных пор) в полученных покрытиях не зафиксировано.

Толщина поверхностно легированных слоев изменялась на различных участках образцов от 1,5 до 1,7 мм. Для электронно-лучевой наплавки характерным является образование градиента структур по сечению наплавленного слоя. Это обусловлено разностью температур и скоростей нагрева и охлаждения микрообъемов металла, находящихся на разном расстоянии от поверхности. При этом свойства полученных слоев также могут отличаться. Наплавленный материал принято разделять на четыре характерные зоны: зону переплавленного металла, переходную зону, крупнозеренную и мелкозеренную зону термического влияния (ЗТВ) и зону основного металла.

Наибольший интерес представляет зона переплавленного металла. Анализ дифрактограмм, полученных при исследовании поверхностно легированного слоя, указывает на наличие двух основных фаз (рис. 2): кубического карбида титана TiC и гексагонального Ti. На основании металлографического анализа можно предположить, что в процессе ускоренного охлаждения в поверхностном слое образуется мартенситная фаза  $\alpha'$ -Ti, что соответствует классическим представлениям [15]. Рентгенофазовый анализ не показал присутствия в наплавленном слое карбида ниобия, вероятность образования карбида титана выше [17]. Кроме этого ниобий неограниченно растворяется в титане. Методами EDX-анализа было зафиксировано присутствие ниобия как в матрице титана, так и в карбидных частицах. Поскольку рентгеновская дифракция не выявила изменения в симметрии кристаллической решетки образующихся карбидов, можно предположить, что ниобий в карбиде титана замещает некоторые атомы титана. Также было установлено, что при увеличении доли порошка ниобия в исходной насыпке происходит увеличение содержания ниобия на несколько процентов не только в матричном материале, но и в карбидных включениях.

Кроме отмеченных выше фаз в поверхностно легированном слое образцов 2NC и 3TC обнаружен слабый пик, соответствующий графиту

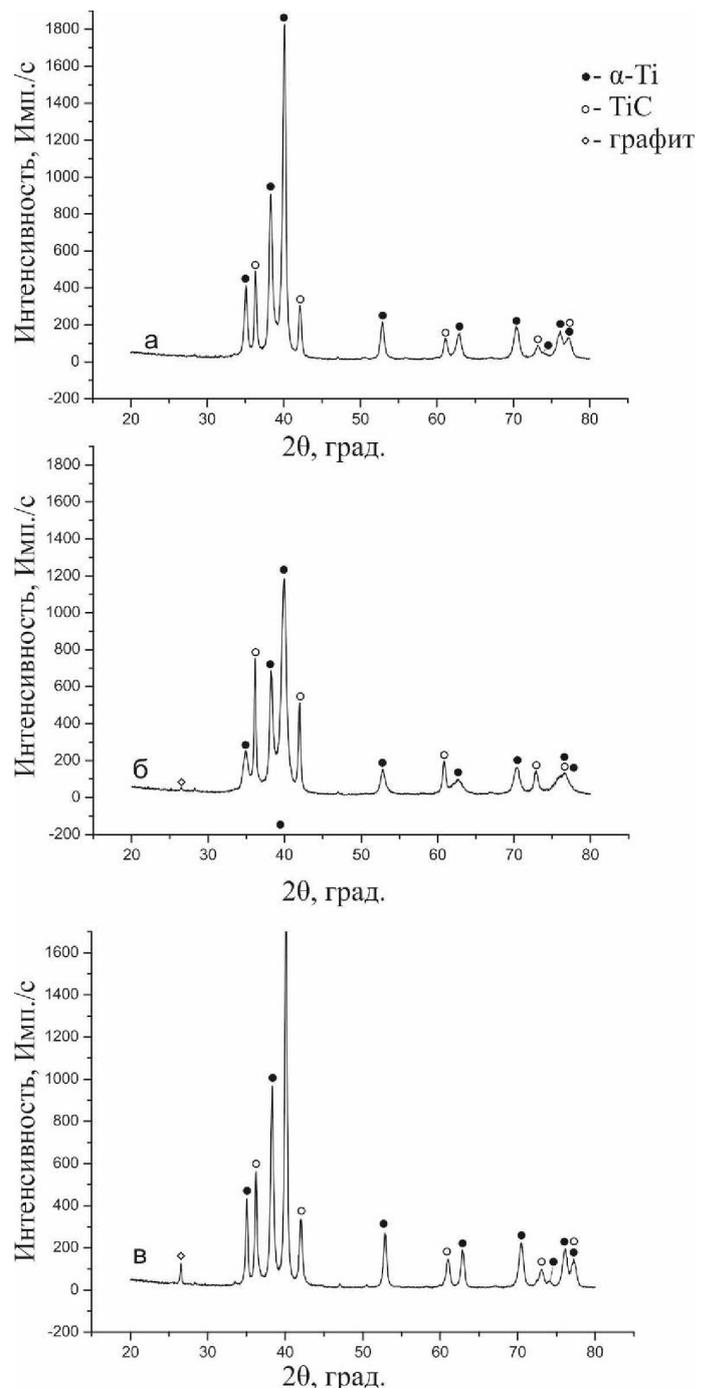


Рис. 2. Дифракционные картины, снятые с поверхностно легированного слоя титана:

а – образец 1TNC; б – образец 2NC; в – образец 3TC

(рис. 2, б, в). Присутствие нерастворившихся частиц графита в указанных выше образцах подтверждается также оптической металлографией. Присутствие графита может приводить как к нежелательному снижению твердости покрытий, так и положительно сказываться на некоторых триботехнических свойствах. Так, например, в работе [7] показано, что частицы графита, содержащиеся в матрице титана, могут оказать

положительный эффект на триботехнические свойства полученного материала и снизить коэффициент трения.

На рентгенограммах поверхностно легированных слоев обнаружено отклонение соотношений интенсивностей рефлексов 101 и 002  $\alpha$ -титана, а также 111 и 200 карбида титана от теоретически рассчитанных значений. Данный эффект, вероятно, обусловлен направленной ориентацией кристаллов указанных фаз. По результатам анализа,

выполненного в программе Maud, было определено направление оси текстуры для  $\alpha$ -Ti – [001], а для кристаллов карбида титана – [111].

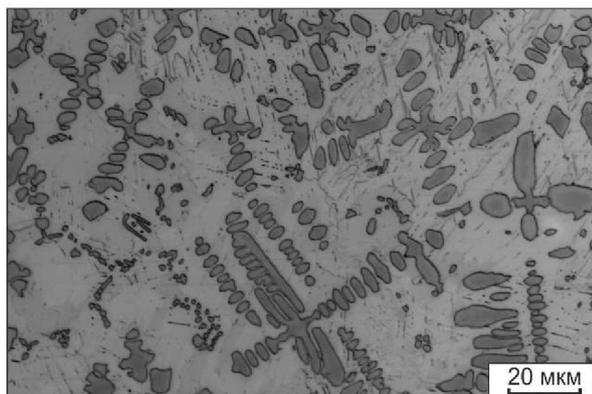
Особенности структуры наплавленных слоев представлены на рис. 3. Основными структурными составляющими являются карбиды различных размеров и формы, а также титановая матрица. Игольчатый (пластинчатый) характер титановой матрицы обусловлен быстрым охлаждением наплавленных слоев за счет теплоотвода



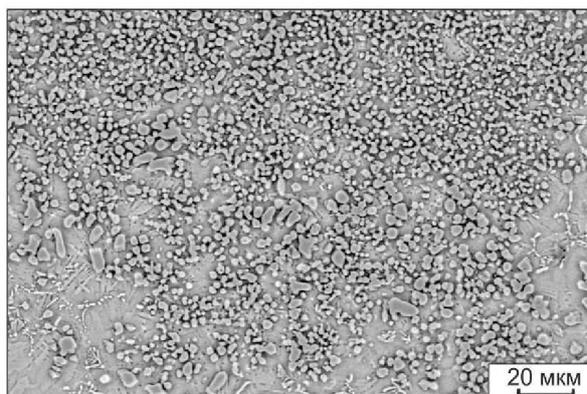
а



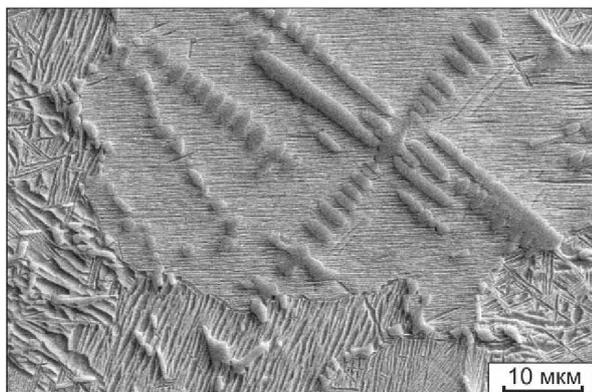
б



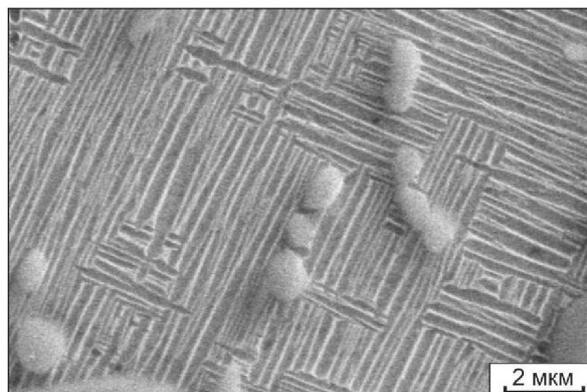
в



z



д



e

Рис. 3. Структура поверхностно легированного слоя:  
а – образец 1TNC; б, д, е – образец 2NC; в, z – образец 3TC

в объем заготовки. Кроме пластин  $\alpha'$ -фазы методами электронной микроскопии в образцах 1TNC и 2NC были обнаружены тонкие прослойки другой фазы (рис. 3, *d*, *e*). Данные пластины предположительно являются  $\beta$ -титаном, однако наличия пиков данной фазы на дифрактограммах не обнаружено. В работе [10] было показано, что при вневакуумной электронно-лучевой наплавке бета-изоморфного тантала на титановые пластины заметные пики  $\beta$ -Ti появлялись при концентрации легирующего элемента выше 17 %, что объяснялось влиянием текстуры кристаллизации.

Объемная доля и тип распределения карбидной фазы изменяются в направлении от поверхности в глубь покрытия. При этом доля карбидной фазы в покрытии 1TNC меньше, так как в исходной насыпке присутствовало меньшее количество углерода.

Вследствие малого времени выдержки металла в расплавленном состоянии до процесса кристаллизации проявляется градиент по составу покрытия. Во время охлаждения начинается кристаллизация из расплава за счет теплопередачи от наплавленного слоя в глубь материала [18].

Вблизи поверхности покрытия карбидная фаза представлена округлыми частицами (рис. 3, *z*). Часто карбидные частицы в этой зоне срастались между собой, образуя плотный слой. На глубине около 100 мкм от поверхности зафиксированы дендритные кристаллы TiC, образовавшиеся в процессе первичной кристаллизации (см. рис. 3). Дендриты растут хаотично вследствие сложного характера теплообмена в процессе обработки и в зоне, прилегающей к ЗТВ, практически не выявлены. Конвекция в жидком титане приводит к разориентации дендритов карбида титана и анизотропии микроструктуры [17, 19].

В связи с высокой объемной долей карбида титана, имеющего твердость выше 2800 HV, микротвердость покрытий увеличивается (рис. 4). Твердость наплавленных слоев всех исследованных образцов превышает твердость основного металла. Аналогичный эффект наблюдали авторы работ [20–21].

Наибольшее значение микротвердости достигается вблизи поверхности покрытия (4,8 ГПа). Значения твердости образца 2NC меньше по



Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине наплавленного слоя:

*a* – образец 1TNC; *б* – образец 2NC; *в* – образец 3TC

сравнению с другими образцами, так как доля карбидной фазы в покрытии меньше. Твердость покрытия снижается в направлении от поверхности к ЗТВ, что обусловлено уменьшением объемной доли твердых карбидных частиц. Твердость ЗТВ плавно снижается до уровня твердости основного металла (1,8 ГПа).

На рис. 5 приведены результаты испытаний на износостойкость поверхностно легированных слоев титана. На всех образцах с поверхностно легированным слоем наблюдалось уменьшение глубины лунки износа. Твердый карбид титана

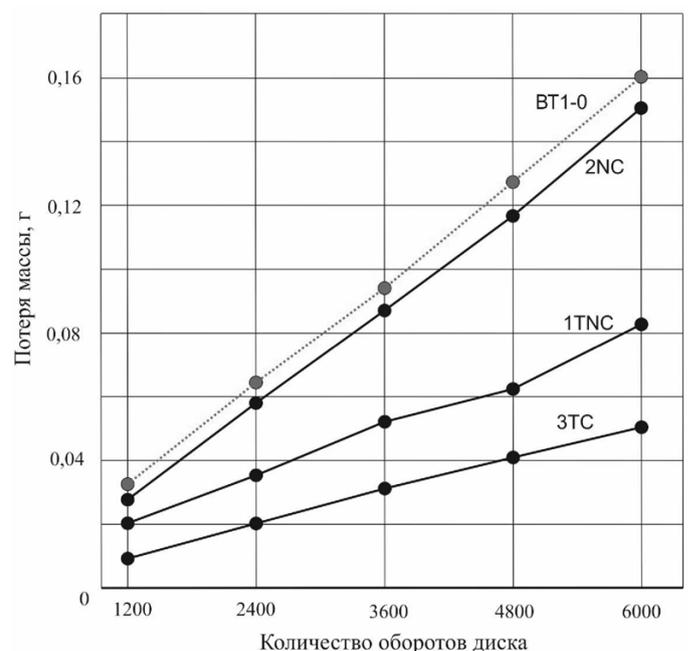


Рис. 5. Потеря массы образцов при воздействии нежестко закрепленных частиц абразива

играет роль жесткого барьера, предотвращающего образование бороздок и царапин, и, следовательно, повышает износостойкость покрытия.

Потеря массы образца ЗТС в 3,2 раза меньше по сравнению с потерей массы титана ВТ1-0. Прироста свойств у образца 2НС не обнаружено.

Наплавка высокопрочных слоев не приводит к катастрофическому снижению уровня ударной вязкости. Значения ударной вязкости для образцов 1ТНС и ЗТС снизились на 6 % по сравнению с ударной вязкостью технически чистого титана (143 Дж/см<sup>2</sup>). При этом уровень ударной вязкости образца 2НС снизился на 17 % по сравнению с титаном ВТ1-0. Следует отметить, что эффект снижения ударной вязкости тем меньше, чем больше соотношение между толщиной подложки и толщиной наплавленного слоя.

### Выводы

В работе показано, что технология вневакуумной электронно-лучевой наплавки углеродсодержащих порошковых смесей позволяет эффективно упрочнять поверхностные слои титановых сплавов. В качестве наплавочных материалов использовалась смесь порошка титана и ниобия с графитом, порошка ниобия с графитом и порошка титана с графитом. Полученные покрытия имеют толщину до 1,7 мм и отличаются отсутствием крупных дефектов в виде пор и трещин. Значения твердости поверхностно легированных слоев в два раза выше по сравнению с уровнем твердости исходного титана. Наибольшее влияние на повышение твердости оказывают высокопрочные частицы карбида титана. Поверхностно легированные слои обладают лучшей износостойкостью по сравнению с износостойкостью титана ВТ1-0 в условиях трения о нежестко закрепленные частицы абразива. При этом не происходит значительного снижения ударной вязкости образцов по сравнению с материалом основы.

### Список литературы

1. Лащенко Г.И. Плазменное упрочнение и напыление. – Киев: Екотехнология, 2003. – 65 с.
2. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление / пер. с яп., В.Н. Попова; под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

3. *ASM Handbook*. Vol. 5. Surface Engineering / eds.: C.M. Cotell, J.A. Sprague, F.A. Smidt. Jr.: ASM International, 1994. – 525 p.

4. Ettaqi S., Hays V., Hantzpergue J.J., Saindrenan G., Remy J.C. Mechanical, structural and tribological properties of titanium nitrided by a pulsed laser // *Surface and Coatings Technology*. – 1998. – Vol. 100/101. Iss. 1–3. – P. 428–432.

5. Savalani M.M., Ng C.C., Li Q.H., Man H.C. In situ formation of titanium carbide using titanium and carbon-nanotube powders by laser cladding // *Applied Surface Science*. – 2012. – Vol. 258. Iss. 7. – P. 3173–3177.

6. Courant B., Hantzpergue J.J., Benayoun S. Surface Treatment of titanium by laser irradiation to improve resistance to dry-sliding friction // *Wear*. – 1999. – Vol. 236. – P. 39–46.

7. Chehrghani A., Torkamany M.J., Hamed M.J., Sabbaghzadeh J. Numerical modeling and experimental investigation of TiC formation on titanium surface pre-coated by graphite under pulsed laser irradiation // *Applied Surface Science*. – 2012. – Vol. 258. Iss. 6. – P. 2068–2076.

8. Oh J.Ch., Lee S., Golkovski M.G. Improvement of the hardness and wear resistance of (TiC, TiN)/Ti-6Al-4V surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron-beam irradiation // *Metallurgical and Materials Transactions: A*. – 2001. – Vol. 32. Iss. 2. – P. 2995–3005.

9. Golkovski M.G., Bataev I.A., Bataev A.A., Ruktuev A.A., Zhuravina T.V., Kuksanov N.K., Salimov R.A., Bataev V.A. Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum // *Materials Science & Engineering: A*. 2013. – Vol. 578. – P. 310–317.

10. Батаев И.А., Журавина Т.В., Руктуев А.А., Ленивецова О.Г., Ромашова Ю.Н. Структурные исследования покрытий системы «титан-тантал», полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*. – 2012. – № 3(56). – С. 56–59.

11. Golkovsky M.G., Zhuravina T.V., Bataev I.A., Bataev A.A., Veselov S.V., Bataev V.A., Prikhodko E.A. Cladding of tantalum and niobium on titanium by electron beam, injected in atmosphere // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vol. 314–316. – P. 23–27.

12. Farayibi P.K., Folkes J., Clare A., Oyelola O. Cladding of pre-blended Ti-6Al-4V and WC powder for wear resistant applications // *Surface and Coatings Technology*. – 2011. – Vol. 206. Iss. 2–3. – P. 372–377.

13. Глазунов С.Г., Мусеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 367 с.

14. Wu W.L. Dissolution precipitation mechanism of TiC/Ti composite layer produced by laser cladding //

Materials Science and Technology. – Vol. 2010. – P. 367–370.

15. Zhang K-M., Zou J-X., Li J., Yu Z-S., Wang H-P. Surface modification of TC4 Ti alloy by laser cladding with TiC+Ti powders // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2011. – Vol. 20. Iss. 11. – P. 2192–2197.

16. Kimura Y., Kaito C., Formation of carbon nanotubes from mixture film of carbon and titanium // Physica E: Low-Dimensional Systems & Nanostructures. – 2005. – Vol. 28. – P. 281–285.

17. Yang Y-L., Zhang D., Liu C.-S., Yang Y-R. Laser cladding of TiCN/Ti coatings on Ti6-Al4-V and the

calculation of the temperature field // Optical Engineering. – 2008. – Vol. 47(8). – P. 084301.

18. Covelli L., Pierdominici F., Smurov I., Tos-to S. Surface microstructure of titanium irradiated by Nd:YAG pulsed laser in presence of carbon and nitrogen // Surface and Coatings Technology. – 1996. – Vol. 78. – P. 196–204.

19. Hamed M.J., Torkamany M.J., Sabbaghzadeh J. Effect of pulsed laser parameters on in-situ TiC synthesis in laser surface treatment // Optics and Lasers in Engineering. – 2011. – Vol. 49. – P. 557–563.

20. Bahadur S. Friction and wear behavior of tungsten and titanium carbide coatings // Wear. – 1996. – Vol. 196. – P. 156–163.

## Obrabotka metallov

N 4(61), October–December 2013, Pages 49-57

### Atmospheric electron-beam overlay welding of carbon containing powder mixtures onto technically pure titanium VT1-0

O.G. Lenivtseva, I.A Bataev, N.S. Belousova, E.D. Golovin, T.A. Zimoglyadova

Novosibirsk State Technical University, Prospect K. Marksa, 20  
Novosibirsk, 630073, Russia

E-mail: lenivtseva\_olga@mail.ru

Received 1 October 2013

Revised 30 October 2013

Accepted 1 November 2013

#### Abstract

The results of structure and properties investigations of the surface alloyed titanium substrate layers are discussed in present work. Built-up layers are produced by the electron-beam overlay welding of carbon-containing powder mixtures in the air. The powder mixtures of titanium, niobium and graphite as well as “niobium – graphite” and “titanium - graphite” compositions are used as the alloying materials. To protect materials from the influence of atmospheric gases during overlay welding, 50 % of the flux (CaF<sub>2</sub>) was added to the powder mixture. The electron beam overlay welding allows to produce the high quality coatings with a thickness up to 1.7 mm. X-ray analysis of built-up layers revealed the presence of TiC,  $\alpha$ -Ti and residual graphite phase. As a result of the treatment microhardness of surface layers increased from 1.8 to 4.8 GPa. The coatings produced by the method of electron beam overlay welding showed enhanced wear resistance in conditions of friction against non-rigidly fixed abrasive particles. Wherein the formation of coatings on titanium surfaces doesn't cause the dramatically decrease of the material impact toughness.

Keywords: Cp titanium, titanium carbide, electron-beam cladding, wear resistance, microhardness.

## References

1. Lashhenko G.I. *Plazmennoe uprochnenie i napylenie* [Plasma hardening and coating]. Kiev, Ekotehnologija, 2003. 65 p.
2. Hasui A., Morigaki O. *Naplavka i napylenie* [Surfacing and spraying]. Trans. Japan. Moscow, Mashinostroenie, 1985. 240 p.

3. Cotell C.M., Sprague J.A., Smidt F.A. ASM Handbook Surface, Volume 5: Engineering. ASM International. 1994, 525 p.
4. Ettaqi S., Hays V., Hantzpergue J.J., Saindrenan G., Remy J.C. Mechanical, structural and tribological properties of titanium nitrided by a pulsed laser. Surface and Coatings Technology. 1998, Vol. 100/101. Iss. 1–3, pp. 428–432.
5. Savalani M.M., Ng C.C., Li Q.H., Man H.C. In situ formation of titanium carbide using titanium and carbon-nanotube powders by laser cladding. Applied Surface Science. 2012, Vol. 258, Iss. 7, pp. 3173–3177.
6. Courant B., Hantzpergue J.J., Benayoun S. Surface Treatment of titanium by laser irradiation to improve resistance to dry-sliding friction. Wear. 1999, Vol. 236, pp. 39–46.
7. Chehrghani A., Torkamany M.J., Hamed M.J., Sabbaghzadeh J. Numerical modeling and experimental investigation of TiC formation on titanium surface pre-coated by graphite under pulsed laser irradiation. Applied Surface Science. 2012, Vol. 258, Iss. 6, pp. 2068–2076.
8. Oh J.Ch., Lee S., Golkovski M.G. Improvement of the hardness and wear resistance of (TiC, TiN)/Ti-6Al-4V surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron-beam irradiation. Metallurgical and Materials Transactions: A. 2001, Vol. 32, Iss. 2, pp. 2995–3005.
9. Golkovski M.G., Bataev I.A., Bataev A.A., Ruktuev A.A., Zhuravina T.V., Kuksanov N.K., Salimov R.A., Bataev V.A. Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum. Materials Science & Engineering: A. 2013, Vol. 578, pp. 310–317.
10. Bataev I.A., Zhuravina T.V., Ruktuev A.A., Lenivceva O.G., Romashova Yu.N. *Obrabotka metallov: tehnologija, oborudovanie, instrumenty*, 2012, no. 3(56), pp. 56–59.
11. Golkovsky M.G., Zhuravina T.V., Bataev I.A., Bataev A.A., Veselov S.V., Bataev V.A., Prikhodko E.A. Cladding of tantalum and niobium on titanium by electron beam, injected in atmosphere. Advanced Materials Research. 2011, Vol. 314–316, pp. 23–27.
12. Farayibi P.K., Folkes J., Clare A., Oyelola O. Cladding of pre-blended Ti-6Al-4V and WC powder for wear resistant applications. Surface and Coatings Technology. 2011, Vol. 206, Iss. 2–3, pp. 372–377.
13. Glazunov S.G., Moiseev V.N. *Konstrukcionnye titanovye splavy* [Structural titanium alloys]. Moscow, Metallurgija, 1974. 367 p.
14. Wu W.L. Dissolution precipitation mechanism of TiC/Ti composite layer produced by laser cladding. Materials Science and Technology. 2010, Vol. 26, pp. 367–370.
15. Zhang K-M., Zou J-X., Li J., Yu Z-S., Wang H-P. Surface modification of TC4 Ti alloy by laser cladding with TiC+Ti powders. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2011. Vol. 20, Iss. 11, pp. 2192–2197.
16. Kimura Y., Kaito C., Formation of carbon nanotubes from mixture film of carbon and titanium. Physica E: Low-Dimensional Systems & Nanostructures. 2005, Vol. 28, pp. 281–285.
17. Yang Y.-L., Zhang D., Liu C.-S., Yang Y.-R. Laser cladding of TiCN/Ti coatings on Ti6-Al4-V and the calculation of the temperature field. Optical Engineering. 2008, Vol. 47, Iss. 8, 084301. doi: 10.1117/1.2969128
18. Covelli L., Pierdominici F., Smurov I., Tosto S. Surface microstructure of titanium irradiated by Nd:YAG pulsed laser in presence of carbon and nitrogen. Surface and Coatings Technology. 1996, Vol. 78, pp. 196–204.
19. Hamed M.J., Torkamany M.J., Sabbaghzadeh J. Effect of pulsed laser parameters on in-situ TiC synthesis in laser surface treatment. Optics and Lasers in Engineering. 2011, Vol. 49, pp. 557–563.
20. Bahadur S. Friction and wear behavior of tungsten and titanium carbide coatings. Wear. 1996, Vol. 196, pp. 156–163.