

Влияние лазерной обработки на структуру и свойства поверхностных слоев деформируемого титанового сплава OT4, легированного В, Nb, С

Н. В. Минаков, А. М. Блощаневич, Н. Д. Рудык, А. И. Стегний,
Б. В. Шурыгин, Ю. Н. Подрезов

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН
Украины, Киев, e-mail: minakov@ipms.kiev.ua

Проведено исследование фазового состава и структуры приповерхностных слоев сплава OT4, подвергнутого лазерной обработке в исходном состоянии и после легирования С, В, Nb. Показано, что наличие карбидов и боридов титана в приповерхностном слое повышает микротвердость слоя подвергнутого обработке. Выполнен рентгеноструктурный анализ слоев, определен их фазовый состав.

Ключевые слова: лазерная обработка, покрытия, фазовый состав, дисперсные карбиды, твердость.

Введение

Использование титановых сплавов в оборудовании для добычи полезных ископаемых в открытом море делает актуальным вопрос о повышении их износостойкости. В работе [1] при нанесении на титан покрытий методом лазерного легирования в качестве легирующих элементов применяли порошки WC/W₂C и TiB₂.

Лазерное легирование позволяет создавать толстые покрытия с введением упрочняющих частиц, что обеспечивает повышение твердости, износостойкости и других свойств. Цель работы — исследовать микроструктуру и свойства лазерных покрытий.

Формирование защитного слоя сочетается с химико-термической обработкой приповерхностной зоны. Лазерная обработка существенно увеличивает прочность, износостойкость, твердость и коррозионную стойкость поверхностного слоя за счёт фазовых и структурных превращений, оплавления, плакирования [1—4]. Ранее нами проведено исследование влияния лазерной обработки в среде азота на процессы формирования структуры и величину микротвердости поверхностного слоя технически чистого титана. Обработка лазером образцов технически чистого титана в среде азота приводит к увеличению микротвердости до 1,6 ГПа [2].

Настоящая работа посвящена исследованию влияния лазерного легирования С, В, Nb титанового сплава OT4 на структуру и свойства приповерхностных слоев. Легирование осуществляли путем оплавления соответствующей порошковой обмазки. Легирующие добавки С, В выбраны для повышения твердости, Nb — является β-стабилизатором и увеличивает коррозионную стойкость, что может быть использовано в дальнейших исследованиях.

© Н. В. Минаков, А. М. Блощаневич, Н. Д. Рудык, А. И. Стегний,
Б. В. Шурыгин, Ю. Н. Подрезов, 2018

Материалы и методы исследования

Для лазерной обработки использован деформированный псевдо- α -титановый сплав ОТ4 следующего состава (% (мас.)) (ГОСТ 19807-91): Fe — 0,3; C — 0,1; Si — 0,12; Mn — 0,8—2; N — до 0,05; Ti — 91,83—95,4; Al — 3,5—5; Zr — до 0,3; O — до 0,15; H — до 0,012; прочие примеси — 0,3.

Поверхности образцов перед лазерной обработкой шлифовали и электролитически полировали. Лазерную обработку проводили в режиме оплавления поверхности на исходных образцах и на образцах с обмазкой порошками бора, углерода, ниобия ($d_{\text{п}} < 10$ мкм) на клеевой основе. После сушки поверхность образца с порошковым покрытием механически полировали до толщины слоя 50—70 мкм. Для лазерной обработки образцов использована лазерная установка Квант-15, работающая в импульсном режиме с энергией в импульсе 5,9—6,1 Дж, длина волны излучения — 1,06 мкм, длительность импульса — $5 \cdot 10^{-3}$ с, диаметр лазерного пятна — 0,1 см и коэффициент перекрытия пятен — 0,75, что обеспечивает равномерную обработку поверхности. Для поверхностной обработки образца применялся объектив с фокусным расстоянием 100 мм.

Для анализа влияния лазерной обработки на свойства обрабатываемого материала с помощью оптического микроскопа МИМ-7 исследована микроструктура, на твердомере ПМТ-3 измерена микротвердость при нагрузке 0,2 Н. Для определения среднего значения микротвердости в сечении зоны оплавления для каждого образца проведено порядка 40 измерений по всей глубине этого слоя. Кроме того, проанализирована зависимость микротвердости в зоне оплавления как функция расстояния от поверхности образца. На дифрактометре ДРОН-3М выполнен сравнительный рентгеноструктурный анализ для этих образцов. Съёмки осуществляли с нанесением на поверхность образцов порошкового кремния в качестве эталона. Анализ рентгенограмм по Ритвелду проведен с помощью ПО Powder cell 2.3.

Результаты эксперимента

Выбор оптимального режима лазерной обработки проводили в диапазоне мощностей 6,9—9,7 10^4 Вт/см². Обнаружено, что при мощности 6,9 Вт/см² не образуется трещины и формируется упрочненный слой глубиной 120—180 мкм. На рис. 1 показана микроструктура в поперечном сечении образца (лазерное легирование бором и углеродом). Видно сечение дорожек, по которым шло оплавление обмазки, в оплавленном слое наблюдаются иглы боридов.

В табл. 1 приведены фазовый состав покрытий и диапазон изменения твердости по сечению. Обработанный лазером α' -титан продемонстрировал твердость приповерхностного слоя 540—444 МПа. Рентгенограммы показали только наличие линии ГПУ титана. Покрытие, легированное бором, содержит ГПУ титан, карбид титана и борид титана TiB₂. Твердость приповерхностного слоя изменяется в диапазоне $H_{\mu} = 3000—900$ МПа. Покрытие, легированное ниобием и углеродом, обнаруживает линию мартенсита α'' -Ti, линии β -титана и карбид TiC, $H_{\mu} = 1220—730$ МПа.

В табл. 2 приведены параметры решетки исследованных фаз, полученные в результате анализа по Ритвелду рентгенограмм, снятых с эталоном (Si). В обработанном лазером легированном ниобием слое

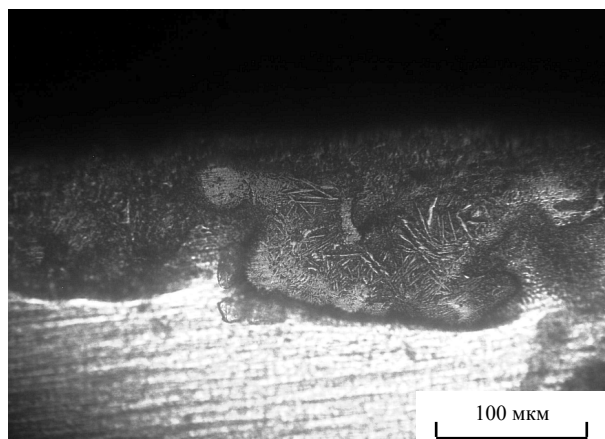


Рис. 1. Микроструктура поперечного сечения зоны оплавления сплава ОТ4, легированного бором и углеродом.

Т а б л и ц а 1. Фазовый состав поверхности покрытий, изменение твердости по сечению

Образец		Фазовый состав	Твердость, МПа
Материал	Обработка		
ОТ4	Исходное состояние	α' -Ti	488 (540—444)
ОТ4 + В + С	Поверхность	α' -Ti + TiC + TiB ₂ + Ti ₃ B ₄	1450 (1840—1130)
	Сечение		1500 (3000—900)
ОТ4 + Nb + С	Поверхность	α'' -Ti + β -Ti + TiC	870 (1150—690)
	Сечение		945 (1220—730)

формируется мартенсит (α'' -фаза). По международной классификации мартенсит в системе титан—ниобий относится к пространственной группе 63 (*Стст*, прототип — αU), орторомбической, с четырьмя атомами на ячейку. Координаты атомов в элементарной ячейке по данным работы [5]: $(0, \bar{Y}, \frac{3}{4})$, $(\frac{1}{2}, Y + \frac{1}{2}, \frac{1}{4})$ и $(\frac{1}{2}, \bar{Y} + \frac{1}{2}, \frac{3}{4})$. При этом координата Y является плавающей и ее значение зависит от содержания ниобия и определяется в результате анализа Ритвельда. Значение координаты Y может изменяться от 0,181 для содержания 8% (объемн.) Nb до 0,193 — для 16% (объемн.) Nb [5]. В нашем случае обработка рентгенограммы по Ритвельду дает значение $Y = 0,22$. Это позволяет утверждать, что в слое, полученном лазерным легированием, содержится более 16% (объемн.) Nb.

Результаты измерения твердости по глубине обработанного слоя представлены на рис. 2. За пределами обработанного лазером слоя твердость матрицы сплава ОТ4 составляла 500 МПа. На рис. 2 видно, что толщина карбидно-боридного покрытия составляет 180 мкм, карбидно-ниобиевого — 120 мкм. Лазерная обработка поверхности титанового сплава ОТ4 без обмазки практически не приводит к изменению микротвердости (488 МПа) и фазового состава α' -Ti. Это свидетельствует о том, что

Т а б л и ц а 2. Результаты анализа по Ритвельду образцов ОТ4 после лазерного легирования и в исходном состоянии

Покрытие	Фаза	Символ Пирсона	Объем, %	Параметры решетки, нм		
				<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
ОТ4, л. о	α' -Ti	hP2	100	0,2953	0,4683	
ОТ4 + С + В	α' -Ti	hP2	43,3	0,2920	0,4682	
	TiC	cF8	49,7	0,4279		
	TiB ₂	hP3	3,3	0,3028	0,3211	
	Ti ₃ B ₄	oI14	3,7	0,3329	1,3830	0,3011
ОТ4 + С + Nb	β -Ti	cI2	11,9	0,3224		
	TiC	cF8	22,7	0,4294		
	α'' -Ti	hP2	65,4	0,3064	0,5000	0,4672

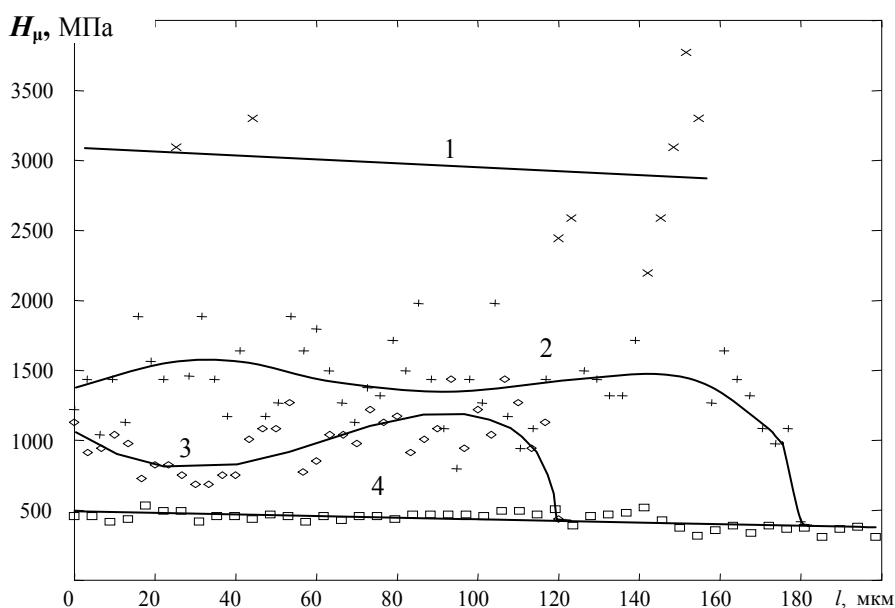


Рис. 2. Изменение микротвердости по глубине зоны оплавления: 1 — TiB₂ + Ti₃B₄; 2 — α' -Ti + β -Ti + TiC; 3 — α'' -Ti + β -Ti + TiC; 4 — без обмазки.

используемый для эксперимента инертный газ Ar не содержит примесей С, N, O, легирующих твердый раствор.

Представленные данные подтверждают, что лазерное легирование поверхности бором и углеродом приводит к наибольшему росту микротвердости до 1500 МПа (рис. 2, кривая 2). При этом несколько отпечатков демонстрируют значения твердости 3000 МПа и более. Такая высокая твердость характерна для боридных стержней. На рис. 2 эти значения аппроксимированы линией 1. Количественный фазовый состав слоя (% (объемн.)): α' -Ti — 43,3; TiC — 49,7; TiB₂ (hP3) — 3,3; Ti₃B₄ (oI14) — 3,7.

Лазерное легирование поверхности ниобием и углеродом способствует практически двукратному повышению микротвердости по сравнению с исходным сплавом ОТ4 (870—945 МПа) (рис. 2, кривая 3). Наблюдается

характерное снижение микротвердости под поверхностью покрытия на глубине 40 мкм. Немонотонное изменение твердости по глубине может быть вызвано динамическими процессами тепломассопереноса в ванне расплава под лазерным пятном. Фазовый состав слоя (% (объемн.)): основа — мартенситная фаза α'' -Ti, 22,7TiC, 11,9 β -Ti.

Выводы

Выполнен комплекс работ по лазерному легированию поверхностного слоя деформируемого псевдо- α -сплава ОТ4. Выбраны составы обмазок, содержащих C, B, Nb. Лазерная обработка позволила повысить микротвердость легированной поверхности в зависимости от фазового состава приповерхностного слоя.

Данные рентгеноструктурного анализа показали наличие α' -Ti при обработке нелегированного сплава, наличие фаз α' -Ti + TiC + TiB₂ + Ti₃B₄ — в сплаве, легированном бором и углеродом, α'' -Ti + β -Ti + TiC — при легировании углеродом и ниобием.

В обработанном лазером легированном ниобием слое обнаружена фаза мартенсита α'' . Использована методика оценки содержания ниобия в α'' -мартенсите по данным рентгеновского анализа. Обработка рентгеновских линий α'' -мартенсита по Ритвельду дает значение плавающей координаты $Y = 0,22$, такое значение координаты Y характерно для содержания 16% (объемн.) ниобия.

Результаты эксперимента показали, что лазерное легирование поверхности бором и углеродом приводит к наибольшему росту микротвердости до 1500 МПа. Лазерное легирование поверхности ниобием и углеродом обеспечивает практически двукратное повышение микротвердости по сравнению с исходным сплавом ОТ4 (870—945 МПа).

Лазерная обработка поверхности титанового сплава ОТ4 без обмазки не изменяет микротвердость (488 МПа),

В ходе проведенного исследования оптимизирован режим лазерной обработки поверхностей образцов ОТ4: $6,9 \cdot 10^4$ Вт/см².

1. Farayibi P. K. Erosion resistance of laser clad Ti—6Al—4V/WC composite for waterjet tooling / [P. K. Farayibi, J. W. Murray, L. Huang et al.] // J. Mater. Processing Techn. — 2014. — **214** (3). — P. 710—721.
2. Минаков Н. В. Сравнительное исследование влияния лазерной обработки на структуру и твердость высокоэнтропийного сплава TiZrHfVNbTa и технически чистого титана / [Н. В. Минаков, А. М. Блощаневич, Н. Д. Крапивка и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2013. — № 11 (107). — С. 11—14.
3. Минаков Н. В. Влияние лазерной обработки на свойства чугуна ВЧ40 / [Н. В. Минаков, А. М. Блощаневич, Н. Д. Рудык и др.] // Там же. — 2011. — № 10. — С. 12—14.
4. Гринкевич К. Э. Влияние лазерной обработки на структуру и триботехнические свойства высокопрочных чугунов, легированных хромом / [К. Э. Гринкевич, И. В. Ткаченко, Н. В. Минаков и др.] // Электронная микроскопия и прочность материалов. — 2017. — Вып. 23. — С. 86—93.
5. Vanumathy S. Structure of orthorhombic martensitic phase in binary Ti—Nb alloys / S. Vanumathy, R. K. Mandall, A. K. Singh // J. Appl. Phys. — 2009. — **106**. — 093518-093518-1-093518-6.

Вплив лазерної обробки на структуру і властивості поверхневих шарів деформованого титанового сплаву ОТ4, легованого В, Nb, С

М. В. Мінаков, А. М. Блощаневич, М. Д. Рудик,
А. І. Стегній, Б. В. Шуригін, Ю. М. Подрезов

Проведено дослідження фазового складу та структури приповерхневих шарів ОТ4, підданого лазерній обробці в вихідному стані і після легування С, В, Nb. Показано, що наявність карбідів і боридів титану в поверхневому шарі підвищує мікротвердість шару, підданого обробці. Виконано рентгеноструктурний аналіз шарів, визначено їх фазовий склад.

Ключові слова: лазерна обробка, покриття, фазовий склад, дисперсні карбіди, твердість.

The effect of laser processing on the structure and properties of surface layers of a deformed titanium alloy OT4 doped with В, Nb, С

М. V. Minakov, A. M. Bloshanevich, M. D. Rudyk, A. I. Stegny,
B. V. Shurygin, Yu. M. Podrezov

The phase composition and structure of the surface OT4 layers subjected to laser treatment in the initial state and after doping of C, B, and Nb were studied. It is shown that the presence of carbides and borides of titanium in the surface layer increases the microhardness of the treated layer. X-ray structural analysis of the layers was performed, phase composition was determined.

Keywords: laser treatment, coatings, phase composition, dispersed carbides, hardness.