

УДК 621.9.048.7

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2015-4-40-44

## Упрочнение и наплавка волоконным лазером как способы целенаправленного формирования структуры и свойств титанового сплава VT6

© 2015 г. А.И. Горунов, А.Х. Гильмутдинов

Казанский национальный исследовательский технический университет (КНИТУ) им. А.Н. Туполева

Статья поступила в редакцию 13.11.14 г., доработана 24.04.15 г., подписана в печать 28.04.15 г.

Приведены результаты изучения микроструктуры и твердости поверхностных слоев наплавленного с использованием волоконного лазера никелевого сплава на титановый  $\alpha + \beta$ -сплав после их комбинированного упрочнения при воздействии лазерного излучения. Лазерная наплавка позволяет получать покрытия с высокой твердостью и закалочными структурами в поверхностных слоях титанового сплава. Твердость наплавленного металла после высокоскоростного охлаждения с температуры расплава на поверхности титановой подложки в 2,7 раза больше твердости мартенситного слоя, сформированного в титановом сплаве после закалки.

**Ключевые слова:** лазерная наплавка, лазерное упрочнение, титановый сплав, микроструктура, микротвердость.

**Горунов А.И.** – канд. техн. наук, доцент кафедры лазерных технологий КНИТУ (420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10). E-mail: gorunow.andrej@yandex.ru.

**Гильмутдинов А.Х.** – докт. физ.-мат. наук, проф., зав. этой кафедрой. E-mail: Albert.Gilmutdinov@kstu-kai.ru.

**Для цитирования:** Горунов А.И., Гильмутдинов А.Х. Упрочнение и наплавка волоконным лазером как способы целенаправленного формирования структуры и свойств титанового сплава VT6 // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2015. No. 4. С. 40–44. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2015-4-40-44.

Gorunov A.I., Gilmutdinov A.Kh.

### **Hardening and welding with a fiber laser as the methods of purposeful formation of the structure and properties of VT6 titanium alloy**

The results of studying microstructure and hardness of surface layers of nickel alloy welded on titanium  $\alpha + \beta$  alloy using fiber laser after their combined hardening under the effect of laser radiation are presented. Laser cladding makes it possible to form coatings with high hardness and quenching structures in surface layers of titanium alloy. Hardness of welded metal after the high-speed cooling from the melt temperature on the titanium substrate surface is larger than the density of martensite alloy formed in the titanium alloy after quenching.

**Keywords:** laser cladding, laser hardening, titanium alloy, microstructure, microhardness.

**Gorunov A.I.** – Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department «Laser Technology», Kazan National Research Technical University (KNRTU) n.a. A.N. Tupolev (420111, Russia, Kazan, K. Marx str., 10). E-mail: gorunow.andrej@yandex.ru.

**Gilmutdinov A.Kh.** – D. Sci. (Phys-Math.), prof., Department «Laser Technology», KNRTU. E-mail: Albert.Gilmutdinov@kstu-kai.ru.

**Citation:** Gorunov A.I., Gilmutdinov A.Kh. Uprochnenie i naplavka volokonnyim lazerom kak sposoby tselenapravlenogo formirovaniya struktury i svoystv titanovogo splava VT6. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2015. No. 4. P. 40–44. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2015-4-40-44.

## Введение

В изделиях современного авиа- и машиностроения широкое применение находят титановые  $\alpha + \beta$ -сплавы благодаря высоким прочностным и антикоррозионным свойствам, а также хорошей свариваемости. Они используются в крупногабаритных сварных конструкциях летательных аппаратов [1]. Однако из-за высокой склонности к схватыванию и задиранию при работе на трение скольжения их применение для изготовления

подвижных деталей машин и механизмов ограничено [2].

Анализ работ отечественных и зарубежных исследователей показывает, что повышение износостойкости титановых сплавов может быть достигнуто созданием функциональных покрытий [3–5], поверхностным легированием [6], термической [7, 8] и термомеханической обработкой [9, 10], а также комбинированными методами обработки [11].

Одним из перспективных и современных методов улучшения физико-механических характеристик титановых сплавов является обработка поверхности концентрированными потоками энергии, в частности лазерная обработка [12]. При этом изменение физико-механических свойств упрочняемых материалов связано с образованием в поверхностных слоях высокодисперсной структуры. Лазерные методы поверхностной обработки используются для получения высокой твердости, увеличения сопротивления коррозии и повышения износостойкости деталей. Однако выбор режима лазерной обработки выбирается индивидуально для каждого сплава в зависимости от исходного структурного состояния материала, его химического состава и многих других параметров. В работах современных исследователей установлена связь между условиями облучения, формирующимися при этом структурами и свойствами обрабатываемых материалов. Наиболее подходящим для рассматриваемого процесса является волоконный лазер, поскольку его КПД в 2,5 раза выше, чем у других лазеров для этой технологии. По сравнению с классическими  $\text{CO}_2$ -лазерами у него также выше яркость лазерного пучка (в 3–5 раз) и ресурс (в 2 раза).

Не менее привлекательным способом восстановления старых или повышения прочности новых деталей машин и механизмов является лазерная наплавка [13]. Ее технология характеризуется минимальным тепловым вложением в наплавляемую деталь, что позволяет сохранить без изменений структуру сердцевины детали и получить высокодисперсную структуру наплавленного металла [14].

Совершенствование технологии создания покрытий на поверхности конструкционных материалов, в том числе титановых сплавов, привело к появлению набирающих популярность в последние годы методов селективного лазерного плавления и прямого лазерного нанесения материалов [15, 16].

В этой связи актуальной становится задача комбинированной лазерной поверхностной обработки конструкционных титановых сплавов. Целью настоящей работы являлось изучение микроструктуры и твердости поверхностных слоев наплавленного с использованием волоконного лазера никелевого сплава на титановый  $\alpha + \beta$ -сплав после их комбинированного упрочнения при воз-

действии лазерного излучения. Установлено, что эффект упрочнения никелевого покрытия на поверхности титанового  $\alpha + \beta$ -сплава достигается за счет его мгновенного разогрева сканирующим лазерным излучением и последующего скоростного охлаждения.

## Методика проведения исследований

Объектом исследования являлись образцы из титанового  $\alpha + \beta$ -сплава ВТ6, химический состав которого следующий, мас. %: 86,485–91,2 Ti; 5,3–6,8 Al; 3,5–5,3 V; до 0,1 C; до 0,3 Fe; до 0,15 Si; до 0,3 Zr; до 0,2 O; до 0,05 N; до 0,015 H.

В исходном состоянии ВТ6 имеет пластинчатую  $\beta$ -превращенную структуру (рис. 1). Толщина пластин  $\alpha$ -фазы составляет  $b = 3 \div 5$  мкм, размер колоний  $d = 140 \div 160$  мкм, а ширина прослоек  $\beta$ -фазы не превышает 0,2–0,3 мкм.

Лазерное упрочнение проводили с помощью волоконного лазера с длиной волны 1064 нм, мощностью до 2 кВт и различными скоростями

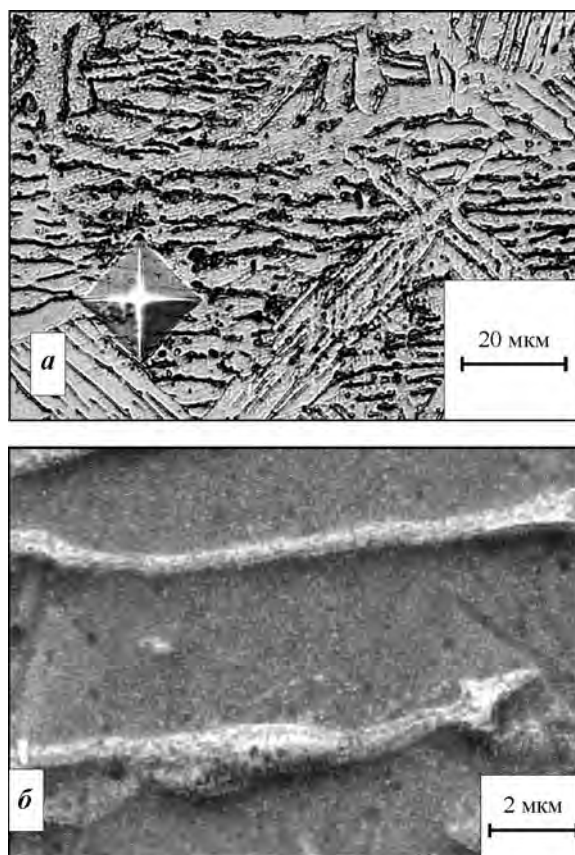


Рис. 1. Исходная микроструктура титанового сплава ВТ6

движения луча лазера. В состав установки лазерного упрочнения входит оптическая головка, работа которой основана на скоростном последовательном сканировании лазерного излучения в направлении, нормальном к линии движения, и скоростном смещении строк вдоль линии сканирования посредством гальванических дефлекторов. На этой же установке осуществляли лазерную наплавку на поверхность образцов из титанового сплава порошка на основе никеля состава, мас. %: 0,75 С; 14,8 Cr; 4,3 Si; 3,7 Fe; 3,1 В, ост. Ni. Размеры частиц порошка составляли 45–125 мкм.

Подготовка поверхности образца включала шлифование, грубое и тонкое полирование. Осуществляли химическое травление микрошлифов в подготовленном реактиве состава, см<sup>3</sup>: HF — 15, HNO<sub>3</sub> — 35, H<sub>2</sub>O — 200, глицерин — 100. Для измерения твердости применяли твердомер НХ-1000ТМ. Структуру поверхности металлографических образцов анализировали при помощи универсального инвертированного микроскопа «Axiovert-200М». Электронно-микроскопическое изображение поверхности образцов получено на рабочей станции «Aurig CrossBeam».

## Результаты исследований

Лазерное упрочнение осуществлялось по двум механизмам с оплавлением поверхности и без оплавления за счет полиморфного превращения. Фрагменты структур титанового сплава ВТ6 после лазерного упрочнения приведены на рис. 2.

В обоих случаях упрочнение достигалось за счет мгновенного разогрева минимального объема поверхности металла излучением волоконного лазера и последующего скоростного охлаждения.

В процессе лазерного упрочнения без оплавления (рис. 3, а) можно наблюдать две зоны. Первая (I) — высокодисперсный мартенсит, формируемый в результате скоростного нагрева и последующего охлаждения, находится возле подложки, или структуры основного металла (O) титанового сплава ВТ6. Вторая область (II) — это тонкая оксидная пленка, возникающая на самой поверхности в результате взаимодействия титана с атмосферой воздуха. Эта зона имеет повышенные значения твердости, а ее толщина не превышает 2 мкм.

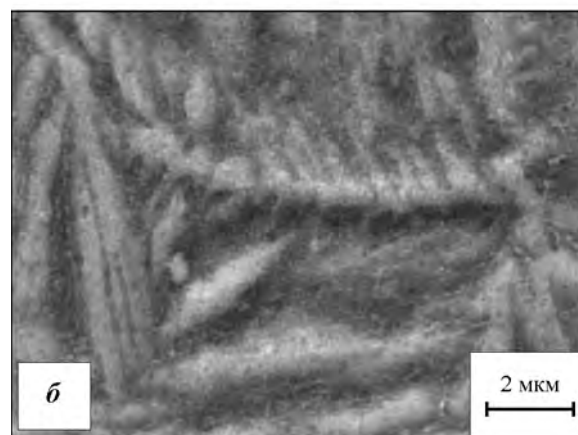
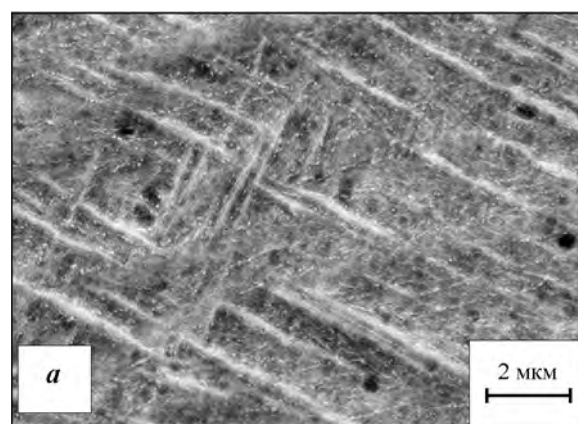


Рис. 2. Фрагменты микроструктуры титанового сплава ВТ6 после лазерного упрочнения а — с оплавлением поверхности, б — без оплавления

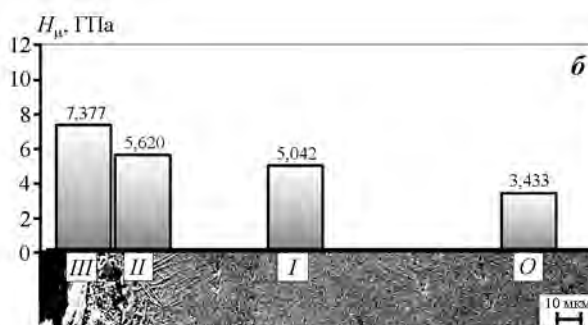
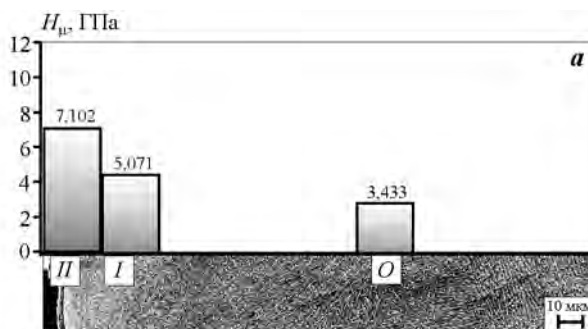


Рис. 3. Твердость структурных зон после лазерного упрочнения сплава ВТ6 без оплавления (а) и с оплавлением (б)

По мере продвижения в глубь металла размер мартенситных пластин увеличивается.

В случае лазерного упрочнения с оплавлением (рис. 3, б) можно различить в поверхностном слое три характерных зоны, в которых микроструктура отличается от основного материала (*O*). Первая зона (*I*) характеризуется мартенситной микроструктурой  $\alpha'$ . Так же, как и в случае упрочнения без оплавления, здесь наблюдается повышение твердости относительно исходной в 1,5 раза.

Далее эта область трансформируется в промежуточную зону *II* с дендритной структурой. Зона *III*, лежащая близко к поверхности, содержит хорошо развитые дендриты, направленные от основного металла к поверхности. Однако повышенная твердость этого дендритного слоя, расположенного в приповерхностных слоях, достигается окисидированием в воздушной среде.

Кристаллизация происходит за счет высокого температурного градиента, она приводит к образованию высокодисперсных столбчатых или дендритных структур, вытянутых вдоль теплового потока. Такая картина наблюдается в результате наплавки никелевого сплава с использованием самофлюсующегося порошка (рис. 4).

Наплавка никелевого сплава обуславливает формирование закалочных структур в поверхностных слоях титанового сплава (зона *I* на рис. 4).

Большинство дендритов в поверхностном слое титанового сплава ориентированы в направлении поверхность—подложка, в то время как некоторые кончики дендритов (зона *II* на рис. 4), имеют направленность под углом к поверхности.

Установлено (рис. 5), что с возрастанием мощности излучения размер дендритных осей может сильно меняться — от 1 до 30 мкм. Направлен-

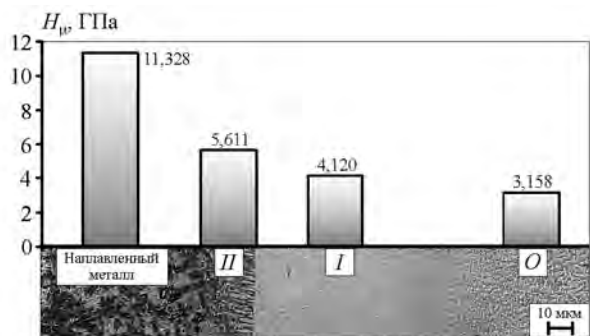


Рис. 4. Твердость структурных зон титанового сплава ВТ6 и никелевого наплавляемого металла

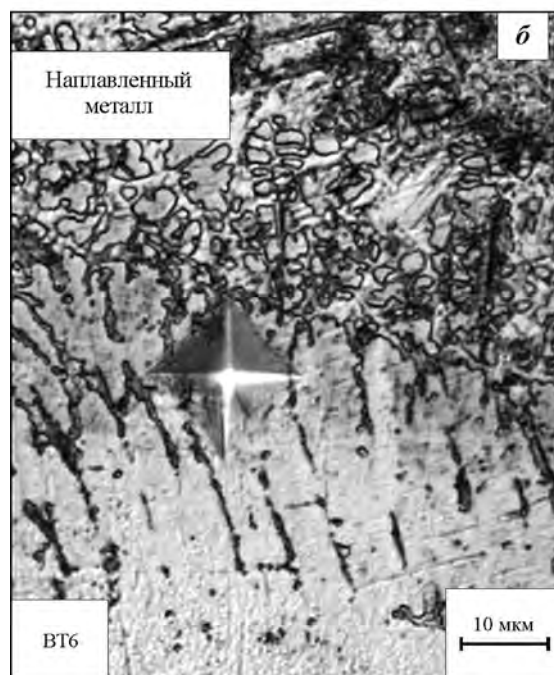
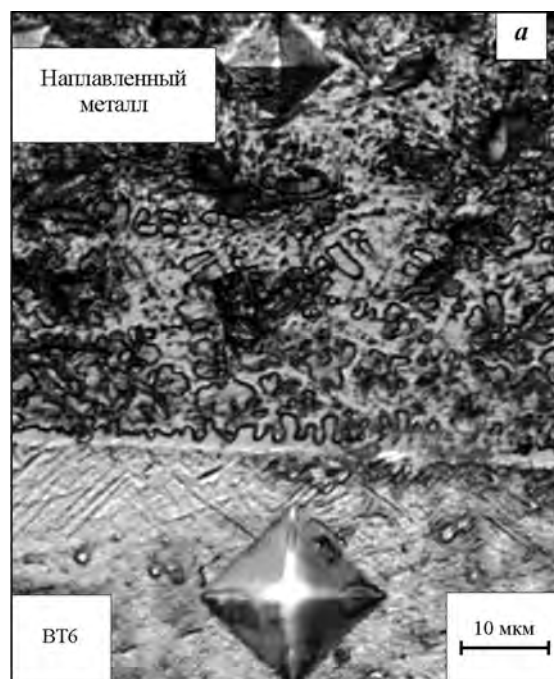


Рис. 5. Структура переходной зоны сварного соединения «титановый сплав ВТ6 – никелевый сплав» при различных значениях мощности лазерного излучения  
а –  $P = 700$  Вт, б –  $1200$  Вт

ность дендритных осей определяется температурным градиентом.

В результате наплавки на поверхности титанового сплава образуется слой с высокой твердостью. Твердость наплавленного металла после лазерной

наплавки и резкого охлаждения на поверхности титановой подложки в 2,7 раза больше упрочненного мартенситного слоя, сформированного в титановом сплаве после закалки. При повышенных значениях мощности лазерного излучения на границе сплавления «титан — наплавленный металл» (рис. 5, б) наблюдается значительное увеличение размера дендритных осей титанового слоя. Прирост микротвердости титанового сплава у границы условной линии сплавления объясняется его легированием углеродом, входящим в состав присадочного порошка, образующим карбид TiC. В этой связи наплавка с оплавлением позволяет добиться повышения твердости титанового сплава не только за счет образования мартенситной структуры, аналогично случаю без оплавления, но и посредством легирования поверхностных слоев титанового сплава.

## Заключение

Установлено, что лазерная наплавка порошковой смеси на основе никеля на поверхность титанового сплава позволяет получить покрытие с твердостью 11300 МПа.

Лазерная наплавка волоконным лазером на малой мощности приводит к формированию мартенситной структуры в поверхностном слое титановых сплавов.

При высокой мощности лазерного излучения происходят расплавление поверхности титанового сплава и образование развитой дендритной структуры на границе покрытие—подложка. При этом твердость титанового сплава повышается за счет образования мартенситной структуры в приповерхностных слоях и их легирования элементами, входящими в состав наплавочного покрытия.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (постановление № 220 от 9.04.2010 г., госконтракт № 14.з50.31.0023) и РФФИ (грант № 14-08-31712 мол\_а, 14-29-10281 офи\_м).*

## Литература/References

1. Boyer R.R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Mater. Sci. Eng. A*. 1996. Vol. 213. P. 103—114.
2. Santecchia E., Hamouda A.M.S., Musharavati F., Zalnezhad E., Cabibbo M., Spigarelli S. Wear resistance investigation of titanium nitride-based coatings. *Ceram. Int.* 2015. Vol. 41. Iss. 9. Pt. A. P. 10349—10379.
3. Li H.C., Wang D.G., Chen C.Z., Weng F. Effect of CeO<sub>2</sub> and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on microstructure, bioactivity and degradability of laser cladding CaO—SiO<sub>2</sub> coating on titanium alloy. *Colloids Surf. B. Biointerfaces*. 2015. Vol. 127. P. 15—21.
4. Gharbi M., Peyre P., Gorny C., Carin M. Influence of various process conditions on surface finishes induced by the direct metal deposition laser technique on a Ti—6Al—4V alloy. *J. Mater. Process. Technol.* 2013. Vol. 213. P. 791—800.
5. Yinghua Lin, Yongping Lei, Hanguang Fu, Jian Lin. Mechanical properties and toughening mechanism of TiB<sub>2</sub>/NiTi reinforced titanium matrix composite coating by laser cladding. *Mater. Design*. 2015. Vol. 80. P. 82—88.
6. Liu Y., Baker T.N. Deformation characteristics of IMI685 titanium alloy under β isothermal forging solutions. *Mater. Sci. Eng. A*. 1995. Vol. 197. P. 125—131.
7. Chen J., Li C., Ren Y.J., Li W., He J.J., Chen J.H. Effect of solution heat treatment on the stress-induced martensite transformation in two new titanium alloys. *J. Alloys Compd.* 2015. Vol. 641. P. 192—200.
8. Wang X., Jahazi M., Yue S. Substructure of high temperature compressed titanium alloy IMI 834. *Mater. Sci. Eng. A*. 2006. Vol. 434. P. 188—193.
9. Bagmutov V.P., Vodopunov V.I., Zaharov I.N., Gorunov A.I., Denisevich D.S. Effect of intense thermomechanical treatment on the structure and properties of titanium pseudo-α alloys during electromechanical treatment. *Russ. Metallurgy (Metally)*. 2013. Vol. 2013. No. 9. P. 712—715.
10. Nalla R.K., Altenberger I., Noster U., Liu G.Y., Scholtes B., Ritchie R.O. On the influence of mechanical surface treatments — deep rolling and laser shock peening — on the fatigue behavior of Ti—6Al—4V at ambient and elevated temperatures. *Mater. Sci. Eng. A*. 2003. Vol. 355. P. 216—230.
11. Guo Y. B., Caslaru R. Fabrication and characterization of micro dent arrays produced by laser shock peening on titanium Ti—6Al—4V surfaces. *J. Mater. Process. Technol.* 2011. Vol. 211. P. 729—736.
12. Hemmati I., Ocelík V., De Hosson J.Th.M. Effects of the alloy composition on phase constitution and properties of laser deposited Ni—Cr—B—Si coatings. *Phys. Procedia*. 2013. Vol. 41. P. 302—311.
13. Hemmati I., Ocelík V., De Hosson J.Th.M. Dilution effects in laser cladding of Ni—Cr—B—Si—C hardfacing alloys. *Mater. Lett.* 2012. Vol. 84. P. 69—72.
14. Yadroitsev I., Smurov I. Surface morphology in selective laser melting of metal powders. *Phys. Procedia*. 2011. Vol. 12. P. 264—270.
15. Karg M., Ahuja B., Kuryntsev S., Gorunov A., Schmidt M. Processability of high strength aluminium-copper alloys AW-2022 and 2024 by laser beam melting in powder bed. *25th Ann. Int. Solid FreeForm Fabrication Symp.* (Austin, Texas, USA). 2014. P. 420—436.
16. Amend P., Hentschel O., Scheitler K., Gorunov A.I., Schmidt M. Effect of additive manufactured metallic structures on laser-based thermal joining of thermoplastic metal hybrids. *Key Eng. Mater.* 2015. Vol. 651—653. P. 777—782.