

# ВЛИЯНИЕ ПРОКАТКИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СЛОЕВ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ТИТАНОВЫХ ЗАГОТОВКАХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ\*

*В. В. САМОЙЛЕНКО, аспирант*  
*Д. В. ЛАЗУРЕНКО, канд. техн. наук, доцент*  
*И. А. ПОЛЯКОВ, аспирант*  
*А. А. РУКТУЕВ, аспирант*  
*О. Г. ЛЕНИВЦЕВА, ассистент*  
*В. С. ЛОЖКИН, ассистент*  
(НГТУ, г. Новосибирск)

Поступила 6 апреля 2015

Рецензирование 6 мая 2015

Принята к печати 15 мая 2015

**Самойленко В.В.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: samoylenko.vitaliy@mail.ru

В работе проведены исследования, направленные на оценку влияния прокатки и отжига на структуру и свойства титана BT1-0, поверхностно легированного танталом методом вневакуумной электронно-лучевой обработки. Установлено, что электронно-лучевая обработка способствует формированию слоев, характеризующихся наличием дендритной ликвации, которая не устраняется при проведении последующих технологических процессов. Структурные исследования показали, что отжиг прокатанных композиций приводит к преобразованию закаленной игольчатой структуры наплавленных слоев в стабильную, представленную равноосными зернами и пластинами.

Уровень микротвердости поверхностных слоев титана после электронно-лучевой обработки повышается со 165 до 385 HV. Прокатка и отжиг не оказывают существенного влияния на твердость наплавленных слоев, однако влияют на твердость основного металла (титана). Предел прочности титановых образцов после электронно-лучевой обработки практически не изменяется и находится на уровне ~ 420 МПа. Прокатка композиций приводит к наклепу титановых пластин и повышению суммарной прочности материала до 610 МПа, которая снижается в процессе последующего отжига до ~ 450 МПа. При этом во всех случаях пластичность исследуемого материала оказалась ниже пластичности титана BT1-0. Наплавленный слой вызывает снижение уровня ударной вязкости титана BT1-0 до 55 Дж/см<sup>2</sup>, который еще более существенно снижается после прокатки (до ~ 40 Дж/см<sup>2</sup>). Последующий отжиг устраняет негативное влияние технологических операций на ударную вязкость материала и способствует ее повышению до ~ 100 Дж/см<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая наплавка, тантал, титан, коррозионная стойкость.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-55-63

## Введение

Во многих случаях задача повышения коррозионной стойкости оборудования, работающего

в условиях воздействия агрессивных сред, является весьма актуальной. Особенно опасным может быть выход из строя оборудования, предназначенного для переработки токсичных отхо-

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-38-20776 мол\_a\_вед.



дов и отработанного ядерного топлива, а также реакторов для производства растворов сильных кислот.

В современной промышленности в качестве материалов, способных противостоять коррозионному разрушению, наиболее широко используются хромоникелевые аустенитные стали [1–3], которые, кроме того, являются надежными конструкционными материалами. Однако в условиях воздействия кипящих концентрированных кислот и растворов на их основе уровень коррозионной стойкости сталей может оказаться недостаточным. В этом случае высоколегированные сплавы на основе железа могут быть заменены на титановые сплавы [4]. В работах [5–8] было показано, что особенно эффективным является использование сплавов системы «титан-тантал». Так, например, уровень коррозионной стойкости титанового сплава, содержащего 40 % тантала, сопоставим с уровнем коррозионной стойкости технически чистого тантала [2, 5]. Следует отметить, что высокая стойкость к воздействию агрессивных сред может быть также обеспечена сплавами с более низкой концентрацией тантала [6–10].

Несмотря на положительный эффект, который оказывает тантал на коррозионную стойкость титановых сплавов, его широкое применение весьма ограничено, что объясняется высокой стоимостью материала [11]. Кроме того, титановые сплавы, легированные большим количеством тантала, имеют высокую плотность. Таким образом, для обеспечения экономии дорогостоящего тантала без значительного увеличения плотности сплава рациональным решением является поверхностное легирование титана танталом.

В качестве технологии, позволяющей формировать высококачественные коррозионно-стойкие слои системы «титан-тантал», в работе [12] предлагается использовать вневакуумную электронно-лучевую наплавку. Данная технология обеспечивает получение поверхностно легированных слоев на большую глубину (1,5...2 мм) на толстолистовых титановых заготовках. Однако повышенный уровень коррозионной стойкости могут обеспечить и более тонкие покрытия. Снижения толщины легированного слоя можно достичь путем прокатки биметаллической композиции «титан-наплавленный слой». Для пони-

жения уровня напряжений и снятия деформации прокатанной заготовки целесообразно использовать последующий отжиг. Однако влияние данных процессов на наплавленные слои не изучено.

Таким образом, целью данной работы было исследовать структурные преобразования, протекающие в легированном слое и материале основы в процессе прокатки и термической обработки и определить их влияние на механические свойства композиции.

## Материалы и методы исследования

Электронно-лучевая обработка образцов проводилась на промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-6 (Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН). Перед наплавкой на пластины из титана BT1-0 размером 100×50×10 мм наносилась порошковая смесь с плотностью насыпки 0,45 г/см<sup>3</sup>. Легирующая порошковая смесь состояла из 51 % (вес.) *Ta* и 18 % (вес.) *Ti*, а также сварочного флюса (23 % (вес.)  $\text{CaF}_2$  и 8 % (вес.)  $\text{LiF}$ ). Далее пластины с нанесенным порошковым слоем устанавливались на подвижный стол, который поступательно перемещался относительно выпускного отверстия ускорителя со скоростью 10 мм/с. Для увеличения производительности метода на выходе электронного луча устанавливалась электромагнитная развертка, увеличивающая размах области сканирования до 50 мм [13]. Ток пучка составлял 24 мА. Энергия электронов была равна 1,4 МэВ.

После электронно-лучевой обработки титановые заготовки с коррозионно-стойкими слоями прокатывали в горячем состоянии [14]. Предварительный нагрев образцов под прокатку происходил в воздушной атмосфере при температуре 800 °С. Суммарная степень обжатия поверхностно легированных титановых пластин после четырех циклов прокатки и нагрева составила 80 %. Последующий отжиг прокатанных пластин проводился в вакууме при температуре 850 °С в течение одного часа.

Структурные исследования биметаллов были проведены на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer Z1m и на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP, оснащенном энергодисперсионным анализатором INCA X-ACT (Oxford Instruments). Микроструктура образцов выявлялась травлением смесью 40 %-го



водного раствора едкого калия, 30 %-й перекиси водорода и воды при температуре 80 °С, а также в смеси 2 %-го и 6 %-го водного раствора плавиковой и азотной кислоты соответственно.

Уровень твердости биметаллических композиций оценивался на микротвердомере Wolpert Group 402 MVD. Испытания в условиях одноосного растяжения проводились на универсальном измерительном комплексе Instron 3369. По результатам испытаний определялись показатели предела прочности ( $\sigma_b$ ) и относительного удлинения материалов ( $\delta$ ).

Испытания на ударный изгиб проводились на маятниковом копре Instron Ceast 9050 с максимальной энергией удара 25 Дж. Для испытаний были подготовлены образцы размерами 50×10×2 мм. Концентратор V-образной формы был нанесен в

направлении, перпендикулярном наплавленному слою. Образцы испытывались по схеме нагружения, представленной в работе [12].

## Результаты и обсуждение

Структурные исследования на оптическом микроскопе показали, что в процессе электроно-лучевой наплавки были сформированы слои толщиной ~1,3 мм. Наплавленные слои характеризуются высоким качеством. В них отсутствуют такие дефекты, как поры, микротрещины и нерастворившиеся частицы (рис. 1, *a*). Результаты микрорентгеноспектрального анализа свидетельствуют о том, что среднее содержание тантала в наплавленном слое составляет 27 % (вес.).

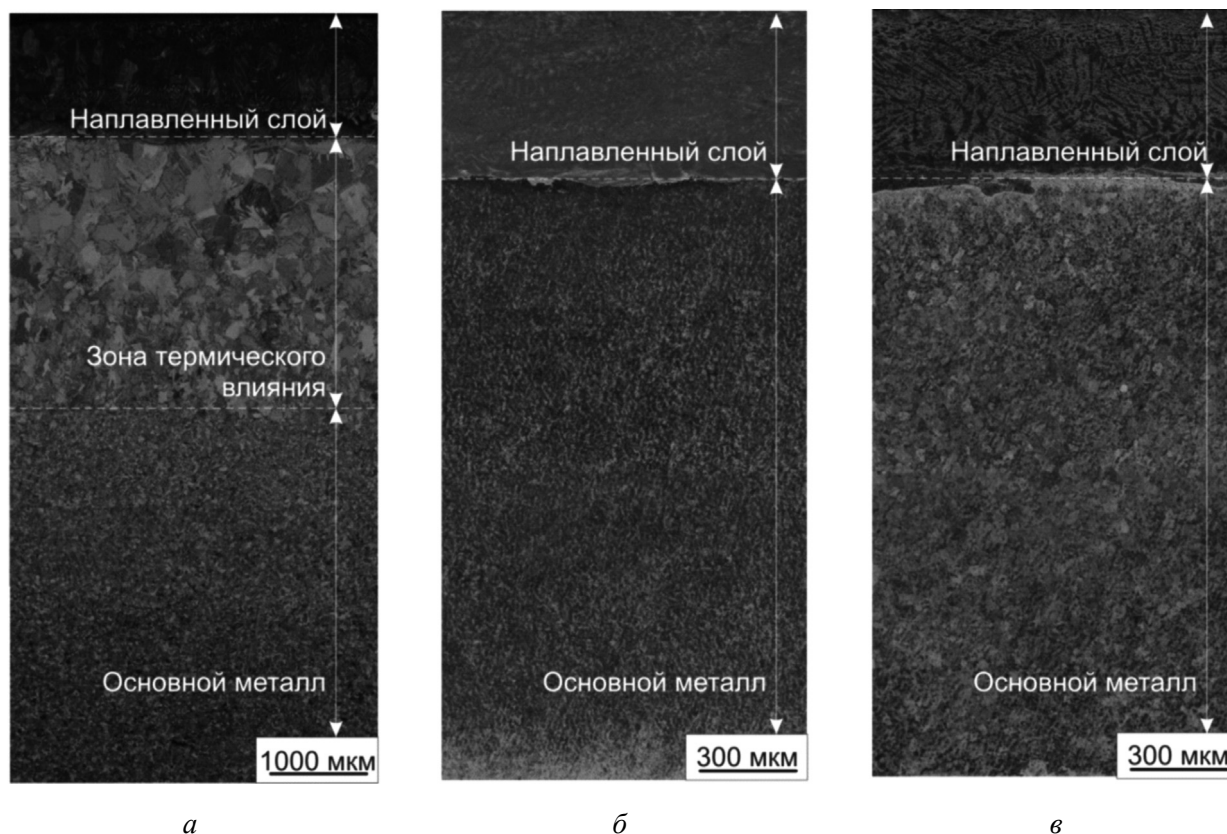


Рис. 1. Общий вид материалов с титан-танталовыми слоями:

*a* – после наплавки; *б* – после прокатки; *в* – после прокатки и отжига

Общий вид материала после наплавки представлен на рис. 1, *a*. В поперечном сечении композит представлен тремя зонами: зоной наплавленного слоя, зоной термического влияния, характеризующейся формированием крупнозернистой структуры, и зоной основного металла,

не подвергшегося в процессе наплавки термическому воздействию.

Металлографические исследования наплавленных слоев позволили выявить формирование в них структуры, типичной для первичной кристаллизации (рис. 3, *a*), о чем свидетельствует



появление дендритной ликвации (рис. 2). Наличие дендритной ликвации в наплавленном слое объясняется большой разницей в температурах плавления компонентов, входящих в состав сплава. В процессе кристаллизации обогащенные танталом кристаллы зарождаются раньше, при этом прилегающий к ним раствор обедняется тугоплавким компонентом. Таким образом, после завершения процесса кристаллизации формируется структура, которая характеризуется повышенной концентрацией тантала в ветвях дендритов, окруженных более легкоплавкой матрицей с повышенным содержанием титана.

На больших увеличениях в наплавленных слоях наблюдается формирование тонких мелкодисперсных структурных составляющих, за-

кономерно ориентированных относительно друг друга. На рис. 3, б представлена типичная для наплавленных слоев неравновесная структура закаленного сплава титана, которая, как правило, состоит из  $\alpha'$  или  $\alpha''$ -фаз титана [15, 16].

Общий вид поверхностно легированного материала после прокатки представлен на рис. 1, б. В его структуре можно выделить только две характерные зоны: поверхностно легированный слой и основной металл. Поскольку материал был деформирован в горячем состоянии, при 800 °С, нагрев до указанной температуры способствовал развитию рекристаллизационных процессов и выравниванию структуры титановой основы. Толщина наплавленного слоя после прокатки снизилась до 500 мкм. Характерной особенностью прокатанного материала является изменение соотношения толщины наплавленного слоя к основному металлу. Если в материале после наплавки на долю легированного слоя приходится ~ 15 %, то после прокатки легированный слой занимает 20 % от общей толщины материала. Это явление связано с различием в прочности между материалами основы и наплавленного слоя [17]. В результате легирования танталом, а также высокоскоростного охлаждения прочность наплавленного слоя существенно превышает прочность материала основы. Таким образом, более прочный материал наплавленного слоя деформируется в меньшей степени. Отмеченное явление неравномерности деформации наплавленного слоя и материала основы

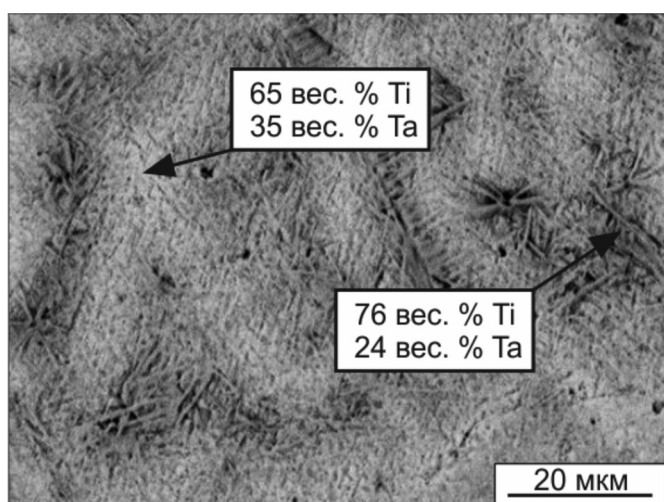
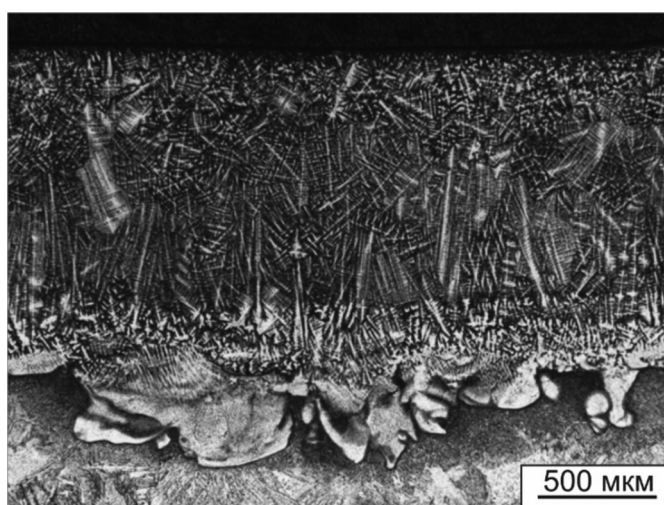
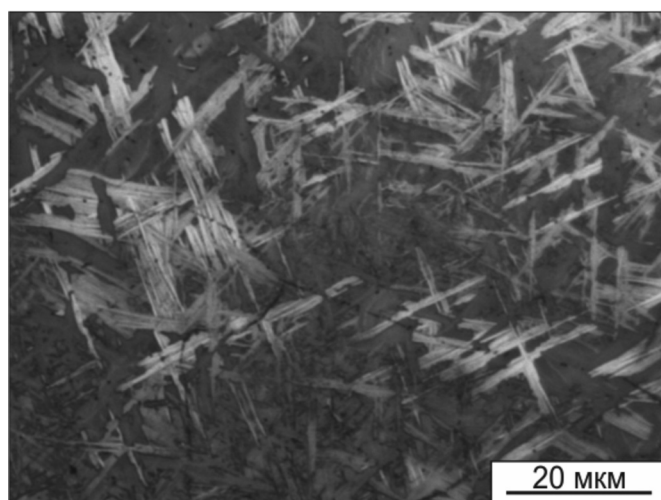


Рис. 2. Микрорентгеноспектральный анализ ветвей дендритов и междендритного пространства



а



б

Рис. 3. Структура слоев с содержанием 27 % (вес.) *Ta*, сформированных на титановой основе методом электронно-лучевой наплавки



приводит к заметному изгибу прокатанного образца в сторону меньшей вытяжки (т. е. в сторону наплавленного слоя).

Прокатка образцов при температуре 800 °С привела к частичному вытягиванию дендритных осей первого порядка вдоль направления прокатки (рис. 4, *а*), а также к деформации структурных составляющих пластинчатой формы (рис. 4, *б*).

После прокатки титановые заготовки с наплавленными слоями подвергались отжигу для снятия наклепа и внутренних напряжений. Общий вид образца представлен на рис. 1, *в*. Основными структурными составляющими являлись пластины  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазы и полиэдрические зерна (рис. 5). Формирование структурных

составляющих различной морфологии является следствием неравномерного распределения тантала в наплавленном слое (рис. 5, *б*), которое сохраняется в материале даже после термического воздействия. Структура пластинчатого типа образуется преимущественно в участках, обогащенных танталом, в то время как зоны с низким содержанием тантала имеют полиэдрическое строение. Согласно диаграмме состояния  $Ti - Ta$  [18] нагрев сплава, содержащего ~19 % (вес.)  $Ta$ , до 850 °С соответствует границе перехода из области  $\alpha + \beta$  в  $\beta$  область. Для сплава с содержанием ~32 % (вес.)  $Ta$  нагрев до указанной температуры соответствует  $\beta$ -области. Очевидно, что охлаждение сплавов из различных структур

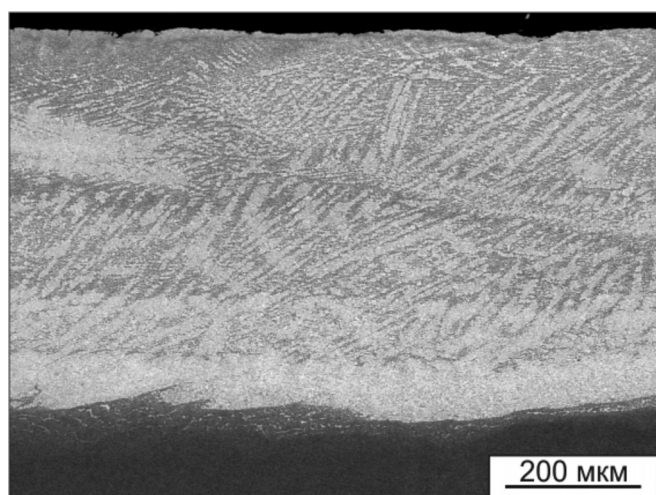
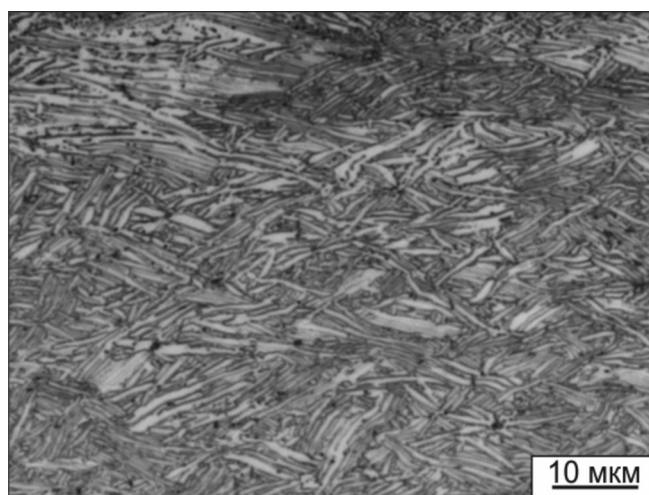
*а**б*

Рис. 4. Структура наплавленных слоев после прокатки

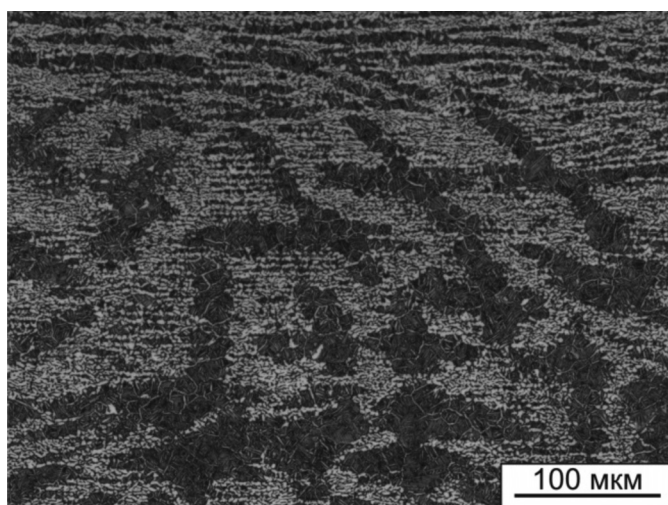
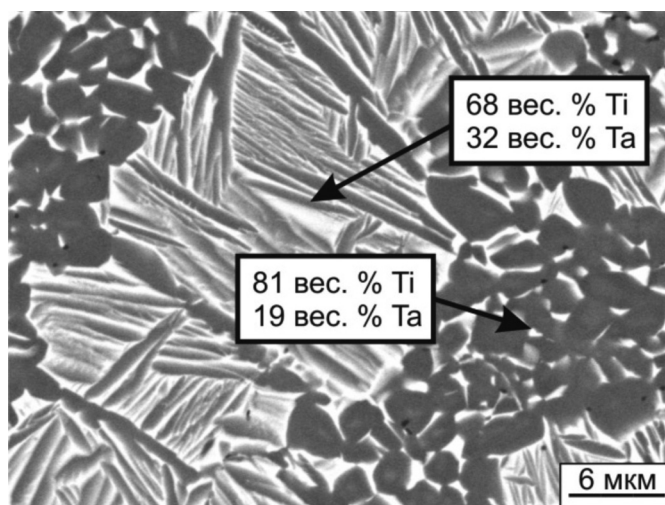
*а**б*

Рис. 5. Структура наплавленных слоев после прокатки и отжига (*а*) и результаты микрорентгено-спектрального анализа отдельных участков (*б*)



ных состояний влияет на конечную структуру сплава после охлаждения.

Различие в механических свойствах легированного слоя и материала основы после различных этапов механического и термического воздействия оценивалось методом микроиндентирования. Характер распределения микротвердости образцов в поперечном сечении отражен на рис. 6. Средний уровень микротвердости легированного слоя после электронно-лучевой наплавки составил 385 HV, при этом микротвердость материала основы находилась на уровне 165 HV. Прокатка образцов привела к повышению микротвердости титановой основы до 210 HV, однако на твердость наплавленного слоя прокатка повлияла незначительно. Отжиг материала после прокатки способствовал снижению микротвердости титана до исходного уровня за счет снятия наклепа, обусловленного рекристаллизацией металла. Максимальное значение микротвердости соответствовало приповерхностной зоне и составило 430 HV для слоев после электронно-лучевой наплавки и 500...550 HV для образцов, подвергнутых последующей прокатке и отжигу. Упрочнение данной зоны связано с насыщением приповерхностного слоя ванны расплава газами атмосферы и, в частности, кислородом [19].

Определение механических свойств материала, в том числе прочности и ударной вязкости, позволяет оценить его эксплуатационные характеристики и технологичность, т. е. возможность изготовления из него реальных конструктивных элементов.

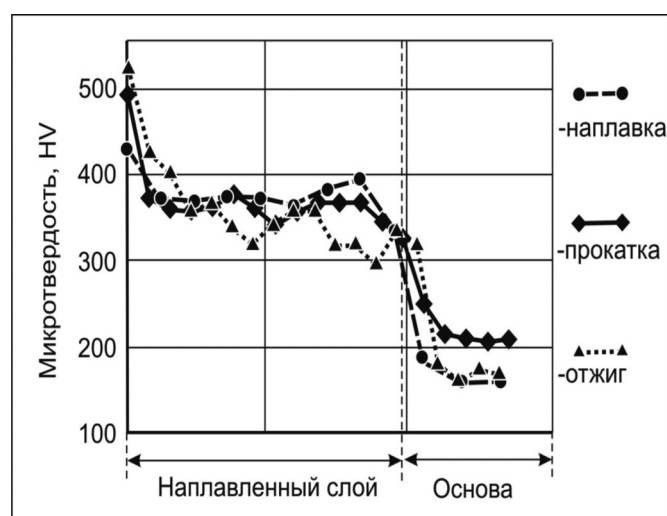


Рис. 6. Микротвердость титановых основ с обогащенным танталом поверхностным слоем

Прочностные свойства оценивались по результатам испытаний на растяжение титановой основы с наплавленным слоем. Предел прочности материала после наплавки составляет 425 МПа. При этом предел прочности технически чистого титана находится на уровне 415 МПа, т. е. наплавка практически не влияет на прочностные характеристики титана BT1-0. Однако формирование наплавленных слоев приводит к резкому снижению показателей пластичности. Относительное удлинение упало с 40 % (для титана BT1-0) до 3 % (для BT1-0 после электронно-лучевой наплавки). Прокатка материала с наплавленными слоями привела к его значительному упрочнению за счет наклепа ( $\sigma_b = 610$  МПа), но при этом не оказала влияния на его пластичность. Отжиг способствует снижению предела прочности материала до уровня, близкого к прочности чистого титана (~450 МПа), и повышению его относительного удлинения до 9 %.

Испытания материалов с коррозионно-стойкими слоями на ударный изгиб показали, что после наплавки ударная вязкость образца почти в два раза ниже ударной вязкости исходного титана (55 и 125 Дж/см<sup>2</sup> соответственно) [12]. Минимальное значение ударной вязкости было зафиксировано для образцов после прокатки (~40 Дж/см<sup>2</sup>). Отжиг прокатанных композиций приводит к росту ударной вязкости до 95...100 Дж/см<sup>2</sup>.

## Выводы

Проведенные исследования показали, что электронно-лучевая наплавка позволяет формировать танталсодержащие поверхностные слои высокого качества на заготовках из технического чистого титана. Наплавленные слои имели дендритное строение; распределение легирующего элемента в наплавленном слое не является равномерным. Съемка при больших увеличениях позволила зафиксировать наличие в наплавленных слоях закаленных структур. Прокатка и отжиг не устраняют дендритную ликвацию, однако способствуют развитию рекристаллизационных процессов в зоне термического влияния и переходу наплавленного слоя в более равновесное состояние. Неравномерность химического состава в наплавленных слоях приводит к форми-



рованию после прокатки и отжига структурных составляющих двух типов: равноосных зерен и пластин.

ДюрOMETрические исследования показали, что твердость поверхностных слоев титана после наплавки повышается со 165 до 385 HV. По этой причине в процессе последующей прокатки поверхностные слои и титановая основа деформируются неравномерно. Прокатка и отжиг не оказывают существенного влияния на твердость наплавленных слоев, однако твердость титановой основы изменяется при проведении указанных технологических операций.

Прочностные характеристики композиции «титан – наплавленный слой» обеспечиваются главным образом титановой основой и, следовательно, находятся примерно на одном уровне с технически чистым титаном (~420 МПа). Однако пластичность материала после электронно-лучевой обработки существенно снижается. Прокатка повышает прочность композиции до 610 МПа за счет наклепа, который снимается в процессе последующего отжига. Уровень прочности материала после прокатки и отжига находится на уровне ~450 МПа.

Электронно-лучевая наплавка способствует снижению уровня ударной вязкости титана ВТ1-0 со 125 до 55 Дж/см<sup>2</sup>. Прокатка приводит к дальнейшему снижению указанной характеристики (до ~40 Дж/см<sup>2</sup>), однако последующий отжиг устраняет негативное влияние наклепа на уровень ударной вязкости материала. После термической обработки он возрастает до ~100 Дж/см<sup>2</sup>.

### Список литературы

1. Talbot D., Talbot J. Corrosion science and technology. – Boca Raton, Florida: CRC Press, 1998. – 390 p. – ISBN 0-8493-8224-6.
2. Corrosion: vol. 1: Metal/Environment Reactions / ed. by L.L. Shreir, R.A. Jarman, G.T. Burstein. – 3<sup>rd</sup> ed. – London: Butterworth-Heinemann, 2000. – 1432 p. – ISBN 0-7506-1077-8.
3. The corrosion handbook / ed. by H.H. Uhlig. – New York: John Wiley & Sons, 1948. – 1188 p.
4. Raj B., Mudali U.K. Materials development and corrosion problems in nuclear fuel reprocessing plants // Progress in Nuclear Energy. – 2006. – Vol. 48, iss. 4. – P. 283–313. – doi: 10.1016/j.pnucene.2005.07.001.
5. De Souza K.A., Robin A. Influence of concentration and temperature on the corrosion behavior of titanium, titanium-20 and 40 % tantalum alloys and tanta-

lum in sulfuric acid solutions // Materials Chemistry and Physics. – 2007. – Vol. 103, iss. 2–3. – P. 351–360. – doi: 10.1016/j.matchemphys.2007.02.026.

6. Structure of the oxide film on Ti–6Ta alloy after immersion test in 8 mol/L boiling nitric acid medium / D. Guo, Y. Yang, J. Wu, B. Zhao, H. Zhao, H. Su, Y. Lu // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. – 2013. – Vol. 189. – P. 122–126. – doi: 10.1016/j.elspec.2013.08.013.

7. Corrosion resistance and biocompatibility of Ti–Ta alloys for biomedical applications / Y.L. Zhou, M. Niinomi, T. Akahori, H. Fukui, H. Toda // Materials Science and Engineering: A. – 2005. – Vol. 398, iss. 1–2. – P. 28–36. – doi: 10.1016/j.msea.2005.03.032.

8. Effect of heat treatment on the corrosion behavior of Ti–5Ta–1.8Nb alloy in boiling concentrated nitric acid / A.R. Shankar, R.K. Dayal, R. Balasubramaniam, V.R. Raju, R. Mythili, S. Saroja, M. Vijayalakshmi, V.S. Raghunathan // Journal of Nuclear Materials. – 2008. – Vol. 372, iss. 2–3. – P. 277–284. – doi: 10.1016/j.jnucmat.2007.03.216.

9. Effect of metal ions in a heated nitric acid solution on the corrosion behavior of a titanium-5% tantalum alloy in the hot acid condensate / Y. Sano, M. Takeuchi, Y. Nakajima, H. Hirano, G. Uchiyama, Y. Nojima, S. Fujine, S. Matsumoto // Journal of Nuclear Materials. – 2013. – Vol. 432, iss. 1–3. – P. 475–481. – doi: 10.1016/j.jnucmat.2012.08.009.

10. Gamma-ray irradiation effect on corrosion rates of stainless steel, Ti and Ti–5Ta in boiling 9N nitric acid / T. Yamamoto, S. Tsukui, S. Okamoto, T. Nagai, M. Takeuchi, S. Takeda, Y. Tanaka // Journal of Nuclear Materials. – 1996. – Vol. 228, iss. 2. – P. 162–167. – doi: 10.1016/S0022-3115(95)00227-8.

11. De Souza K.A., Robin A. Preparation and characterization of Ti–Ta alloys for application in corrosive media // Materials Letters. – 2003. – Vol. 57, iss. 20. – P. 3010–3016. – doi: 10.1016/S0167-577X(02)01422-2.

12. Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum / M.G. Golkovski, I.A. Bataev, A.A. Bataev, A.A. Ruktuev, T.V. Zhuravina, N.K. Kusanov, R.A. Salimov, V.A. Bataev // Materials Science and Engineering: A. – 2013. – Vol. 578. – P. 310–317. – doi: 10.1016/j.msea.2013.04.103.

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

14. Титан и его сплавы в химическом машиностроении / Б.А. Галицкий, М.М. Абелев, Г.Л. Шварц, Б.Н. Швелкин. – М.: Машиностроение, 1968. – 340 с.

15. Структурные исследования покрытий системы «титан-тантал», полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки / И.А. Батаев,



Т.В. Журавина, А.А. Руктуев, О.Г. Ленивцева, Ю.Н. Ромашова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 3 (56). – С. 56–59.

16. Многослойная электронно-лучевая наплавка танталсодержащих порошковых смесей на заготовки из титана VT1-0 / М.Г. Голковский, В.В. Самойленко, А.И. Попелюх, А.А. Руктуев, Н.В. Плотнокова, Н.С. Белоусова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 4 (61). – С. 43–48.

17. Голованенко С.А., Меандров Л.В. Производство биметаллов. – М.: Металлургия, 1966. – 153 с.

18. Microstructure and mechanical properties of Ti-40 Wt Pct Ta (Ti-15 At. Pct Ta) / J.D. Cotton, J.F. Bingert, P.S. Dunn, R.A. Patterson // Metallurgical and Materials Transactions A. – 1994. – Vol. 25, iss. 3. – P. 461–472. – doi: 10.1007/BF02651588.

19. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошков системы титан-тантал-ниобий на титан VT1-0 / Т.В. Журавина, И.А. Батаев, А.А. Руктуев, А.П. Алхимов, О.Г. Ленивцева, О.А. Бутыленкова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 1 (54). – С. 90–95.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(67), April – June 2015, Pages 55–63

### Influence of rolling and heat treatment on the structure and properties of the coatings fabricated on the titanium substrates by electron beam cladding

Samoylenko V. V., Ph.D. student, e-mail: samoylenko.vitaliy@mail.ru

Lazurenko D.V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: pavlyukova\_87@mail.ru

Polyakov I.A., Ph.D. student, e-mail: status9@mail.ru

Ruktuev A.A., Ph.D. student, e-mail: alex47@211.ru

Lenivtseva O.G., Assistant, e-mail: lenivtseva\_olga@mail.ru

Lozhkin V.S., Assistant, e-mail: logkaa@mail.ru

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

#### Abstract

The influence of rolling and annealing on the structure and properties of VT1-0 titanium with cladded tantalum-containing coatings is estimated. It was found that electron beam treatment contributes to the formation of coatings characterized by the presence of dendritic segregation which is not neutralized by subsequent technological processes. However, the structural investigations revealed that annealing of the rolled material induces transformation of the quenched needlelike structure to the stable one, which is represented by equiaxial grains and lamination.

A microhardness level of titanium surface layers after electron beam treatment increased from 165 to 385 HV. Rolling and annealing had no significant effect on the hardness of cladded layers, but they had an impact on hardness of the titanium substrate. Ultimate tensile strength of titanium workpieces after electron beam treatment was approximately equal to tensile strength of commercially pure (cp) titanium (about 420 MPa). Rolling of the composites led to workhardening of the titanium plate and increase of strength up to 610 MPa which was subsequently reduced to about 450 MPa by annealing. Plasticity of investigated materials was lower than plasticity of cp-titanium after all kinds of treatment. Electron beam cladding also induced decreasing the titanium impact strength level to 55 J/cm<sup>2</sup>, which decreased to a greater extent (to 40 J/cm<sup>2</sup>) after rolling. However, subsequent annealing eliminated the negative effect of technological processes on impact strength of the material and contributed to its increase up to approximately 100 J/cm<sup>2</sup>.

#### Keywords:

electron beam cladding, tantalum, titanium, coating, corrosion resistance.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-55-63

#### References

1. Talbot D., Talbot J. *Corrosion science and technology*. Boca Raton, Florida, CRC Press, 1998. 390 p. ISBN 0-8493-8224-6
2. Shreir L.L., Jarman R.A., Burstein G.T. *Corrosion*. Vol. 1: *Metal/Environment Reactions*. 3<sup>rd</sup> ed. London, Butterworth-Heinemann Publ., 2000. 1432 p. ISBN 0-7506-1077-8



3. Uhlig H.H., ed. *The corrosion handbook*. New York, John Wiley & Sons Publ., 1948. 1188 p.
4. Raj B., Mudali U.K. Materials development and corrosion problems in nuclear fuel reprocessing plants. *Progress in Nuclear Energy*, 2006, vol. 48, iss. 4, pp. 283–313. doi: 10.1016/j.pnucene.2005.07.001
5. De Souza K.A., Robin A. Influence of concentration and temperature on the corrosion behavior of titanium, titanium-20 and 40% tantalum alloys and tantalum in sulfuric acid solutions. *Materials Chemistry and Physics*, 2007, vol. 103, iss. 2–3, pp. 351–360. doi: 10.1016/j.matchemphys.2007.02.026
6. Guo D., Yang Y., Wu J., Zhao B., Zhao H., Su H., Lu Y. Structure of the oxide film on Ti-6Ta alloy after immersion test in 8 mol/L boiling nitric acid medium. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 2013, vol. 189, pp. 122–126. doi: 10.1016/j.elspec.2013.08.013
7. Zhou Y.L., Niinomi M., Akahori T., Fukui H., Toda H. Corrosion resistance and biocompatibility of Ti-Ta alloys for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, vol. 398, iss. 1–2, pp. 28–36. doi: 10.1016/j.msea.2005.03.032
8. Shankar A.R., Dayal R.K., Balasubramaniam R., Raju V.R., Mythili R., Saroja S., Vijayalakshmi M., Raghunathan V.S. Effect of heat treatment on the corrosion behavior of Ti-5Ta-1.8Nb alloy in boiling concentrated nitric acid. *Journal of Nuclear Materials*, 2008, vol. 372, iss. 2–3, pp. 277–284. doi: 10.1016/j.jnucmat.2007.03.216
9. Sano Y., Takeuchi M., Nakajima Y., Hirano H., Uchiyama G., Nojima Y., Fu-jine S., Matsumoto S. Effect of metal ions in a heated nitric acid solution on the corrosion behavior of a titanium-5% tantalum alloy in the hot acid condensate. *Journal of Nuclear Materials*, 2013, vol. 432, iss. 1–3, pp. 475–481. doi: 10.1016/j.jnucmat.2012.08.009
10. Yamamoto T., Tsukui S., Okamoto S., Nagai T., Takeuchi M., Takeda S., Tanaka Y. Gamma-ray irradiation effect on corrosion rates of stainless steel, Ti and Ti-5Ta in boiling 9N nitric acid. *Journal of Nuclear Materials*, 1996, vol. 228, iss. 2, pp. 162–167. doi: 10.1016/S0022-3115(95)00227-8
11. De Souza K.A., Robin A. Preparation and characterization of Ti-Ta alloys for application in corrosive media. *Materials Letters*, 2003, vol. 57, iss. 20, pp. 3010–3016. doi: 10.1016/S0167-577X(02)01422-2
12. 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 and Engineering: A*, 2013, vol. 578, pp. 310–317. doi: 10.1016/j.msea.2013.04.103
13. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovsky M.G., Teplykh A. Yu., 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
14. Galitskii B.A., Abelev M.M., Shvarts G.L., Shevelkin B.N. *Titan i ego splavy v khimicheskoy mashinostroyeni* [Titanium and its alloys in chemical engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1968. 340 p.
15. Bataev I.A., Zhuravina T.V., Ruktuev A.A., Lenivtseva O.G., Romashova Yu.N. Strukturnye issledovaniya pokrytii sistemy «titan-tantal», poluchennykh metodom vnevakuumnoi elektronno-luchevoy naplavki [Structural investigation of “titanium-tantalum” coatings obtained by non-vacuum electron beam cladding]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2012, no. 3 (56), pp. 56–59.
16. Golkovski M.G., Samoilenko V.V., Popelyukh A.I., Ruktuev A.A., Plotnikova N.V., Belousova N.S. Mnogosloynaya elektronno-luchevaya naplavka tantalsoderzhashchikh poroshkovykh smesei na zagotovki iz titana VT1-0 [Multilayered electron-beam overlay welding of the tantalum-containing powder mixtures on the commercial pure titanium]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 4 (61), pp. 43–48.
17. Golovanenko S.A., Meandrov L.V. *Proizvodstvo bimetallov* [Bimetal production]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1966. 153 p.
18. Cotton J.D., Bingert J.F., Dunn P.S. Microstructure and mechanical properties of Ti-40 Wt Pct Ta (Ti-15 At. Pct Ta). *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1994, vol. 25, iss. 3, pp. 461–472. doi: 10.1007/BF02651588
19. Zhuravina T.V., Bataev I.A., Ruktuev A.A., Alkhimov A.P., Lenivtseva O.G., Butylenkova O.A. Vnevakuumnaya elektronno-luchevaya naplavka poroshkov sistemy titan-tantal-niobii na titan VT1-0 [Non-vacuum electron beam cladding of titanium, tantalum and niobium powders on titanium substrate]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2012, no. 1 (54), pp. 90–95.

## Funding

The reported study was partially supported by RFBR, research project No. 15-38-20776.

Received 6 April 2015

Revised 6 May 2015

Accepted 15 May 2015