

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-3-32-35

УДК (UDC) 669

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОНАСЫЩЕННОГО СЛОЯ В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ ПОСЛЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА

© Максим Сергеевич Калиенко^{1,2}, Анатолий Владимирович Волков¹,
Анна Владимировна Желнина^{1,2}

¹ ВСМПО-АВИСМА, г. Верхняя Салда, Россия.

² Уральский федеральный университет имени Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия; e-mail: kamak@yandex.ru

Статья поступила 11 июля 2017 г.

Титановые сплавы (BT8, BT18У, BT20, BT25У) и алюминиды титана широко используются в авиа- и двигателестроении, прежде всего благодаря их высокой удельной прочности. Жаропрочные титановые сплавы применяют при изготовлении деталей компрессора, дисков и лопаток газотурбинных двигателей. Способность длительно работать при повышенной температуре без изменения механических свойств определяется такими их важными характеристиками, как сопротивление окислению и скорость диффузии кислорода через окисел и в основном металле. Представлены результаты исследования образцов сплавов BT8, BT18У, BT20, BT25У, Ti6242S после изотермического отжига при 625 °С в течение 1000 ч в воздушной атмосфере. Глубину поверхностного газонасыщенного слоя оценивали рентгеноструктурным, металло- и фрактографическим методами и методом измерения твердости.

Ключевые слова: титановый сплав; окисление; дифрактограмма; хрупкие фасетки.

ESTIMATION OF OXYGEN INGRESS DEPTH IN TITANIUM ALLOYS AFTER ELEVATOR TEMPERATURE EXPOSURE

© Maksim S. Kalienko,^{1,2} Anatoly V. Volkov,¹ Anna V. Zhelnina^{1,2}

¹ VSMPO-AVISMA, Verkhnyaya Salda, Russia.

² Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia; e-mail: kamak@yandex.ru

Submitted July 11, 2017.

Titanium alloys are widely utilized for structural applications in aerospace, automotive, military, sport equipment and chemical engineering due to their high specific strength, excellent corrosion resistance and stable moderate temperature properties. In this work, samples from titanium alloys exposed to laboratory air at 625°C for 1000 h, which resulted in the formation of an oxide scale and a layer with higher oxygen concentration. The depth of oxygen-enriched layer after annealing was estimated by four methods: metallographic examination, fractography, hardness testing and XRD analysis. This paper summarizes an effort to estimate depth of oxygen-enriched layer in titanium alloys after elevated temperature exposure.

Keywords: Ti alloy; oxidation; X-ray diffraction pattern; cleavage facets.

Титановые сплавы и алюминиды титана широко применяют в авиа- и двигателестроении. В современных двигателях около трети их массы составляют титановые сплавы, занимая второе место среди используемых материалов после никелевых сплавов.

Двигателестроение развивается по пути постоянного повышения тягового КПД, что достигается за счет увеличения диаметра вентилятора, степени двухконтурности, а также термического КПД. Последнее в свою очередь приводит к повышению рабочей температуры и появлению новых требований к применяемым в двигателе и конструкции самолета материалам.

Ухудшение механических свойств титановых сплавов после длительной работы при повышенных температурах — одна из основных причин, ограничивающих их использование. При высокой температуре происходит взаимодействие титана с газами, образуются оксидный слой на поверхности, альфированный и газонасыщенный приповерхностные слои. Характеристики газонасыщенного слоя твердого раствора внедрения кислорода (высокие твердость и хрупкость, пониженные пластичность и вязкость) влияют на механические свойства изделия [1 – 7].

Цель работы — сравнительная оценка глубины газонасыщенного слоя на образцах титано-

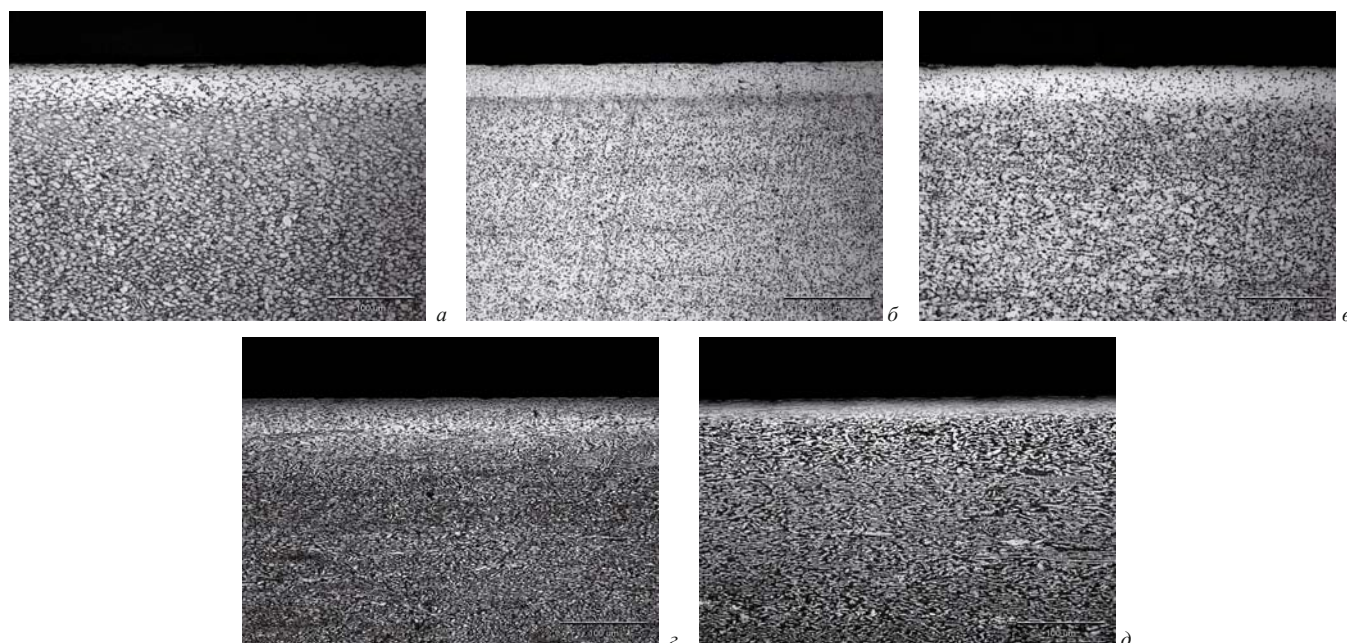


Рис. 1. Поверхностный газонасыщенный слой на образцах сплавов Ti6242S (а), VT20 (б), VT18У (в), VT8 (г) и VT25У (д) после отжига

вых сплавов после отжига методами оптической металло- и фрактографии, измерения твердости и рентгеноструктурного анализа.

Исследовали образцы титановых сплавов VT8, VT18У, VT20, VT25У, Ti6242S. Изотермический отжиг образцов проводили при температуре 625 °С с выдержкой 1000 ч в воздушной атмосфере, термообработку — в электрической лабораторной печи объемом 0,5 м³ с вентилятором для перемешивания воздуха (точность поддержания температуры — 5 °С). Для металлографического анализа использовали оптический микроскоп Olympus GX71. Микрошлифы травили в 5 %-ном водном растворе плавиковой кислоты. За глубину газонасыщенного слоя принимали среднюю глубину структуры у поверхности с более светлым фоном по сравнению с основным металлом (усреднение проводили по 60 – 70 измерениям в разных точках вдоль поверхности образца). Твердость по Виккерсу измеряли на твердомере Shtruers Duramin при нагрузке $P = 490$ мН с шагом, равным половине диагонали отпечатка, в направлении от поверхности по траектории, располагающейся под острым углом к ней. Рентгеноструктурный анализ проводили с использованием дифрактометра Bruker D8 Advance с детектором LynxEye. Дифрактограммы снимали в медном излучении (напряжение трубки — 40 кВ, ток трубки — 40 мА, шаг — 0,02°, выдержка — 0,5 с на точку). Параметры кристаллической решетки рассчитывали в программе TOPAS 3 (режим hkl phase — Pawley method) в угловом диапазоне $2\theta = 34 - 85^\circ$. Качество расчетных

дифрактограмм оценивали по взвешенному фактору недовосточности R_{wp} , а также визуально по разностной кривой. Дифрактограммы уточняли, минимизируя фактор недовосточности (для всех расчетных дифрактограмм он был на уровне ниже 10 %). Послойное удаление материала на образцах после отжига осуществляли следующим образом: сначала ручное шлифование с использованием наждачной бумаги (P240, P1000) для удаления окисла, затем послойное травление в кислотном растворе HF (300 мл) + HNO₃ (160 мл) + H₂O (40 мл).

Образцы на растяжение испытывали при комнатной температуре на разрывной машине Zwick Z600. Изломы анализировали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Quanta 3D FEG. Микроструктуру, твердость и фрактографию исследовали в продольном сечении образцов.

Выявленный при металлографическом исследовании поверхностный газонасыщенный слой представлен на рис. 1. Минимальную глубину слоя (24 ± 2 мкм) зафиксировали у сплава VT25У, максимальную (48 ± 7 мкм) — у VT8 (у сплава VT20 она составила 34 ± 4 , у VT18У и Ti6242S — 43 ± 3 мкм).

Как известно, после отжига концентрация кислорода с глубиной снижается с определенным градиентом. Полученные различия в глубине газонасыщенного слоя могут свидетельствовать о различном градиенте концентрации кислорода в сплавах.

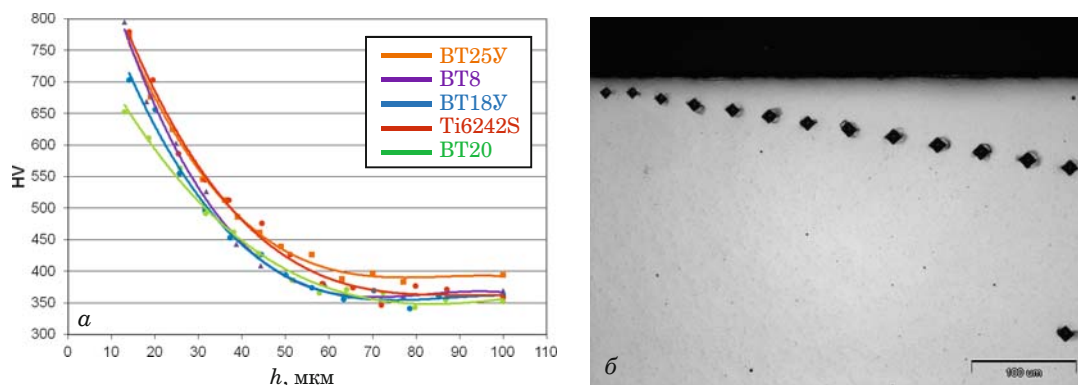


Рис. 2. Распределение твердости по глубине в газонасыщенном слое образцов после отжига (а) и отпечатки на микрошлифе сплава BT18У после индентирования (б)

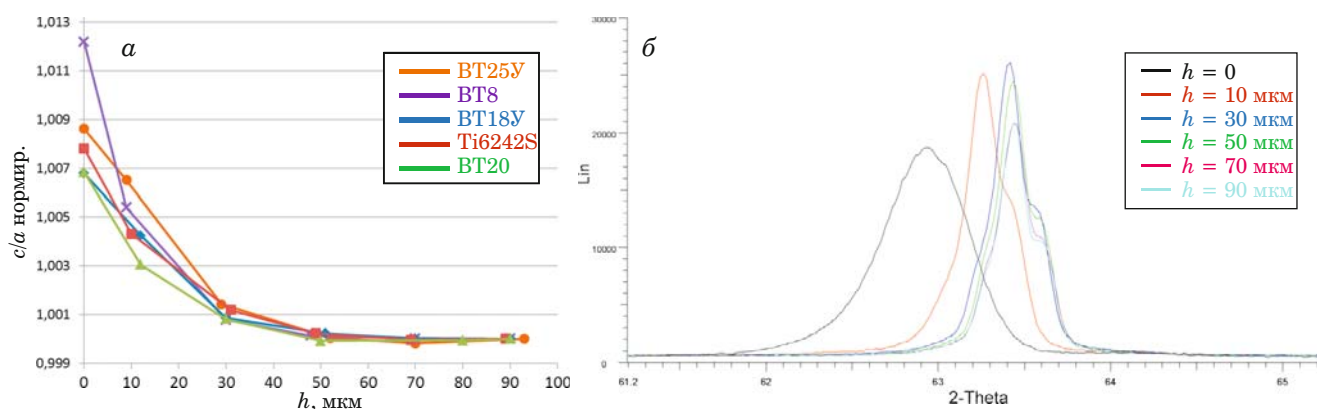


Рис. 3. Нормированное соотношение параметров кристаллической решетки α -фазы сплавов (а) и положение дифракционной линии α (11.0) сплава Ti6242S при послойном травлении (б)

Распределение твердости у поверхности образцов показано на рис. 2. Видно, что газонасыщенный слой составляет около 60 мкм.

Известно, что повышенная твердость объясняется механизмом твердорастворного упрочнения при растворении кислорода. Максимальную твердость основного металла наблюдали у BT25У, что связано с наибольшей степенью легированности сплава и, соответственно, самым большим эффектом от дисперсионного упрочнения, минимальную — у BT20, что может свидетельствовать о минимальной растворимости кислорода в поверхностном слое.

По результатам послойного рентгеноструктурного исследования на рис. 3 приведена зависимость отношения параметров кристаллической решетки (c/a) α -фазы титана от глубины. Видно, что глубина газонасыщенного слоя составляет порядка 50 мкм.

Кислород, проникая в титан, внедряется в междоузельное пространство его кристаллической решетки, увеличивает её параметры, что приводит к смещению дифракционных линий на дифрактограмме в область малых углов (см.

рис. 3, б). Сплавы BT20 и BT18У характеризуются минимальным изменением (увеличением) параметров кристаллической решетки α -фазы титана в газонасыщенном слое, что говорит о меньшей растворимости кислорода в них по сравнению с другими образцами.

При фрактографическом исследовании изломов после испытания образцов на растяжение выявили, что приповерхностную зону хрупкого разрушения с гребнями, направленными от поверхности вглубь, сменяют зона хрупких фасеток и основной вязкий ямочный излом (рис. 4). Область перехода к вязкому излому принимали за глубину газонасыщенного слоя, которая для сплавов BT8, BT18У, BT20, BT25У составила порядка 40 – 43, для Ti6242S — 49 мкм. Различия могут быть связаны как с различием в градиенте концентрации кислорода, так и со структурными отличиями образцов. Скорость диффузии кислорода по межзеренным границам существенно выше, чем в основном металле, что наряду с наличием градиента концентрации кислорода объясняет наличие двух зон в хрупкой приповерхностной области изломов [8].

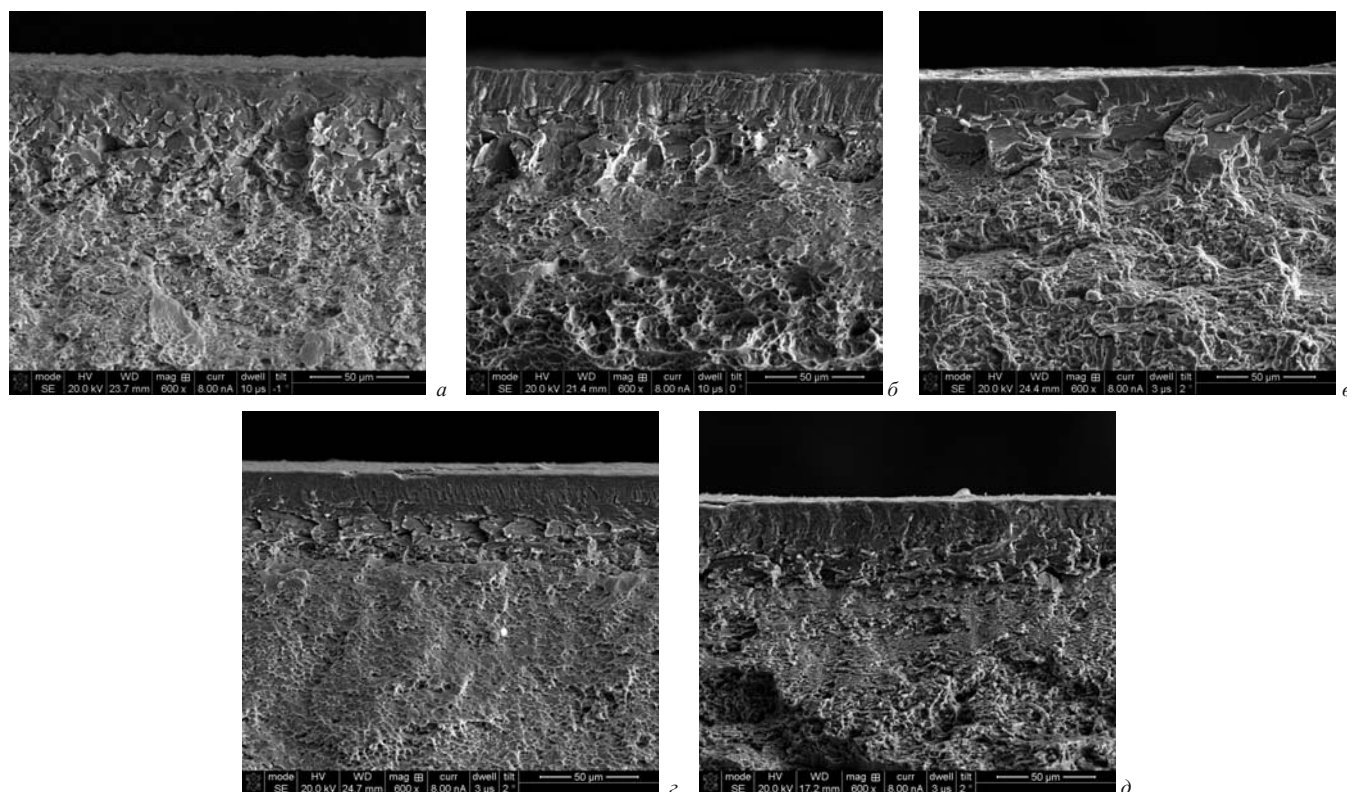


Рис. 4. Приповерхностная область изломов образцов сплавов Ti6242S (а), BT20 (б), BT18У (в), BT8 (г), BT25У (д) после отжига и испытания на растяжение

Таким образом, проведенные исследования образцов жаропрочных титановых сплавов Ti6242S, BT8, BT18У, BT20, BT25У после изотермического отжига позволили оценить глубину приповерхностной зоны, обогащенной кислородом. Полученные разными методами (оптической металлографии, дюраметрии, фрактографии и рентгеноструктурного анализа) значения глубины оказались различными, что связано с точностью и чувствительностью применяемых методик. Полученные результаты необходимо принимать во внимание при комплексном сравнительном исследовании сплавов. Использование нескольких методик при анализе газонасыщенного слоя повысит надежность оценки эксплуатационных свойств титановых сплавов, длительно работающих при повышенной температуре.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. **Shenoy R., Unnam J., Clark R.** Oxidation and embrittlement of Ti6242 alloy / *Oxidation of Metals*. 1986. Vol. 26. P. 105 – 123.
2. **Pilchak A., Porter W., John R.** Room temperature fracture processes of a near- α titanium alloy following elevated temperature exposure / *J. Mater. Sci.* 2012. N 47. P. 7235 – 7253.
3. **Geary B., Bolam V., Jenkins S., Davies D.** High temperature titanium sheet for helicopter exhaust applications / *8th World Conf. of Titanium / Titanium'1995: Science and Technology*. Proc. — Birmingham, 1995. P. 1638 – 1645.
4. **Bania P.** Next generation titanium alloys for elevated temperature service / *ISI International*. 1991. Vol. 31. N 8. P. 840 – 847.
5. **Sansoz F., Almesallmy M., Ghonem H.** Ductility exhaustion mechanisms in thermally exposed thin sheets of a near-titanium alloy / *Met. Mat. Trans. A*. 2004. Vol. 35A. P. 3113 – 3127.
6. **McReynolds K., Tamirisakandala S.** A Study on alpha-case depth in Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo / *Met. Mat. Trans. A*. 2011. Vol. 42. P. 1732 – 1736.
7. **Gaddam R., Sefer B., Pederson R., Antti M-L.** Oxidation and alpha-case formation in Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy / *Materials Characterization*. 2015. N 99. P. 166 – 174.
8. **Brockman R., Pilchak A., Porter W., John R.** Estimation of grain boundary diffusivity in near- α titanium polycrystals / *Scripta Materialia*. 2011. N 65. P. 513 – 515.