

СТОЙКОСТЬ К ОКИСЛЕНИЮ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА И АЛЮМИНИЯ

А. Л. Старцева¹⁾, П. В. Литошик²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, StartsevaAlexandra@mail.ru

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, StartsevaAlexandra@mail.ru
Научный руководитель — В. В. Углов,
доктор физико-математических наук, профессор

В настоящей работе исследована стойкость к окислению титан-алюминиевого сплава после отжига в течение одного часа при температурах 300, 500, 700 и 900 °С. Фазовый анализ проводился методом рентгеноструктурного анализа (РСА), изменения элементного состава регистрировались с помощью рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), измерения микротвердости проводились на микротвердомере (метод Виккерса, нагрузки $P = \{0,49, 0,98\}$ Н), исследовалась трибология сплава в режиме сухого трения (нагрузка $P = 0,49$ Н, скорость движения образца – 4 мм/с).

Ключевые слова: титано-алюминиевый сплав; отжиг; микротвердость; коэффициент трения; износостойкость; TC25.

Сплавы системы Ti–Al–V–Zr–Mo являются одними из широко используемых титановых сплавов благодаря своим оптимальным комплексным механическим свойствам [1]. Однако основным недостатком титана является высокая склонность к поглощению кислорода при температурах, превышающих 500 °С, что приводит к охрупчиванию поверхности. На сегодняшний день разработка способов модификации Ti–Al сплавов с рабочей температурой более 600 °С является актуальной задачей, поскольку позволяет расширить диапазон применения титановых сплавов. Поэтому для дальнейших разработок необходимо более полное понимание механизмов окисления титановых сплавов.

Данное исследование было проведено с целью изучить стойкость к окислению и механико-трибологические свойства (МТС) сплавов на основе титана и алюминия на примере сплава марки TC25 с составом Ti-83.4Al-12.6V-2.1Zr-1.2Mo-0.7 ат. % (таблица 1).

Преобладающим легирующим элементом в сплаве TC25 является Al, концентрация других легирующих элементов не превышает 2,1 ат. %.

Фазовый анализ исследуемого сплава представлен на рис. 1.

Элементный состав исследуемого образца до термообработки и после часовых отжигов при 300, 500, 700 и 900 °С

T, °С	Элементный состав, ат. %					
	Ti	Al	V	Zr	Mo	O
24	83,4	12,6	2,1	1,2	0,7	—
300	75,5	8,9	1,7	1,0	0,7	12,2
500	60,6	7,7	1,3	0,8	0,6	29,0
700	49,9	6,1	0,6	0,7	0,6	42,1
900	23,9	14,4	0,5	0,1	—	61,1

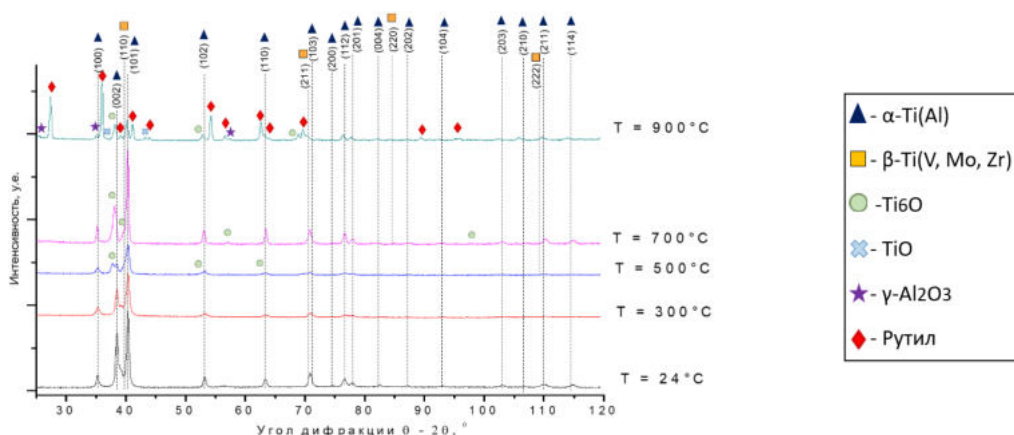


Рис. 1. Дифрактограмма сплава TC25 для $T = \{300, 500, 700, 900\}$ °С

После отжигов при 500 и 700 °С в приповерхностных слоях содержание кислорода увеличилось до 42 ат. %, что привело к формированию дополнительной оксидной фазы Ti_6O . После термической обработки при 900 °С увеличилось содержание алюминия до 14 ат. %, что свидетельствует об образовании оксидов алюминия Al_2O_3 . Наблюдается трансформация Ti_6O в оксид TiO_2 модификации рутил с тетрагональной кристаллической структурой и отслоение оксидного слоя от материала. Причиной разрушения могут являться сжимающие напряжения, возникающие в результате значительной разницы объемов оксида и металла.

Значения микротвердости TC25 в исходном состоянии составили 3,8 ГПа (рис. 2). После часовых отжигов при 300 и 500 °С значение микротвердости осталось неизменным, что свидетельствует о малости толщины оксидных пленок. После часового отжига при 900 °С значение микротвердости сплава TC25 увеличилось на 18% в сравнении с исходным состоянием из-за образования твердого оксидного слоя.

До 500 °С наблюдалось постоянство значения коэффициента трения (рис. 3), что говорит о стабильности трибологических свойств сплава при данной температуре. Увеличение коэффициента трения при 900 °С связано с частичным отслоением оксидной пленки.

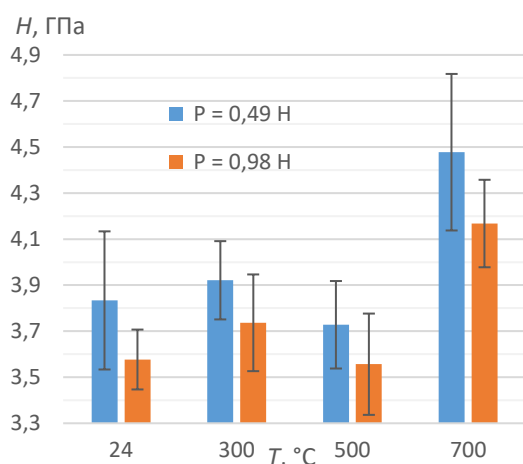


Рис. 2. Зависимость микротвердости H сплава TC25 от температуры отжига T в течение часа в воздушной среде, $P = \{0,49, 0,98\}$ Н

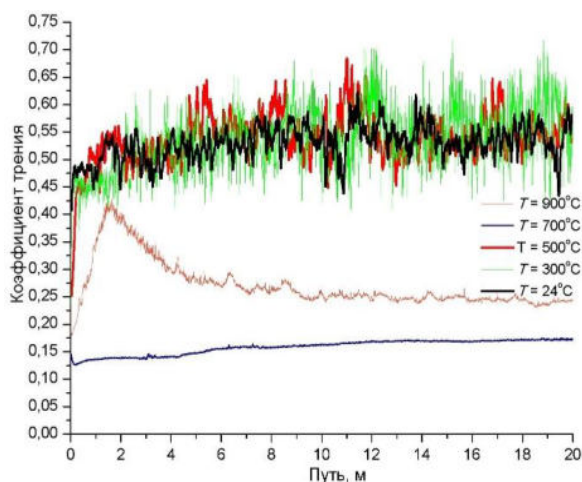


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения сплава TC25 от пути трения для $T = \{24, 300, 500, 700, 900\}$ °C, $P = 0,49$ Н

Глубина треков, образовывавшихся в результате снятия коэффициентов трения, уменьшается с повышением температуры отжига: $(6,6 \pm 0,9)$ мкм в исходном состоянии и $(5,0 \pm 0,7)$ мкм при 500 °C, что напрямую говорит о повышении износостойкости сплава вплоть до 700 °C.

На основе работ [2, 3] и собственных экспериментальных данных, нами была предложена следующая схема формирования оксидных пленок на титан-алюминиевых сплавах (рис. 4). До температуры 700 °C формируется стабильный в этом интервале температур слой субоксидов Ti_6O или Ti_3O . При содержании кислорода выше 50 ат. % образуются TiO и TiO_2 . Al_2O_3 расположен преимущественно во внутренней части оксидной пленки отдельными зёрнами в объеме, занимаемом рутилом.

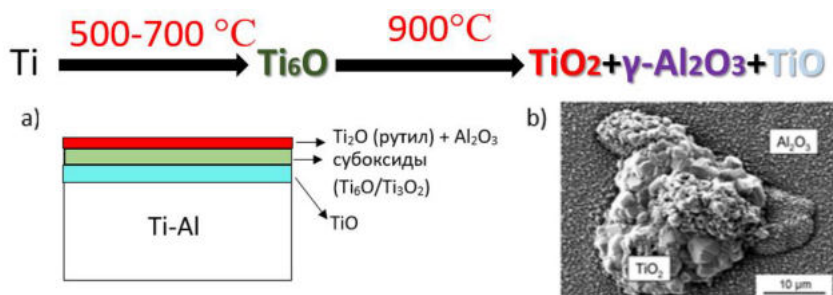


Рис. 4. Схематичное изображение образования многослойной оксидной пленки на сплаве Ti–Al в ходе окисления при 900 °C (а); поверхность γ -TiAl сплава после выдержки при высоких температурах [4] (б)

По мере приближения к поверхности раздела металл–оксидная пленка содержание алюминия в сплаве повышается, а титана — понижается. После часового отжига при 700 °С было зафиксировано образование оксидной пленки, включающей фазу Ti_6O , благодаря этому факту данная температура является оптимальной температурой отжига для улучшения МТС сплава TC25. При 900 °С наблюдалось частичное отслоение оксидной пленки вследствие нарушения баланса между растягивающими напряжениями в подоксидных альфированных слоях и сжимающими напряжениями в оксидных слоях.

Таким образом, сплав TC25 теряет свои механические свойства при температуре 900 °С и не может быть использован без предварительной защиты от окисления.

Библиографические ссылки

1. Wu D. et al. New high-strength Ti–Al–V–Mo alloy: from high-throughput composition design to mechanical properties //International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2019. Т. 26. С. 1151-1165.
2. Лазарев Э. М., Корнилова З. И., Федорчук Н. М. Окисление титановых сплавов //М: Наука. 1985.
3. Luthra K. L. Stability of protective oxide films on Ti-base alloys //Oxidation of metals. 1991.Т. 36. С. 475-490.
4. Leyens C. et al. Recent progress in the coating protection of gamma titanium-aluminides //Jom. 2006. Т. 58. С. 17-21.