

УДК 621.793.6

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-2-297-35-38

*В. П. Кулевич, А. И. Богданов, В. Г. Шморгун, Д. Э. Седов
И. А. Соколенко, Е. И. Голубева, А. Н. Кириченко*

**ОЦЕНКА АДГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ
НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДОВ ТИТАНА,
АРМИРОВАННЫХ АЛЮМООКСИДНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ***

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: kulevich.vp@gmail.com

Методом царапания оценена когезионная и адгезионная прочность алюминидных покрытий, сформированных на поверхности технически чистого титана в расплаве алюминия после термической обработки при 850 °С. Показано, что покрытие, внешний слой которого имеет каркасную структуру, состоящую из частиц TiAl_3 , окруженных сеткой $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$, а внутренний сплошной слой, прилегающий к титану, состоит из слоев интерметаллидов TiAl_2 , TiAl и Ti_3Al , не имеет адгезионных и когезионных трещин в вплоть до нагрузки в 3 Н.

Ключевые слова: титан, алитирование, термообработка, покрытия, адгезия, когезия

*V. P. Kulevich, A. I. Bogdanov, V. G. Shmorgun, D. E. Sedov
I. A. Sokolenko, E. I. Golubeva, A. N. Kirichenko*

**EVALUATION OF ADHESION PROPERTIES OF TITANIUM ALUMINIDE
COATINGS REINFORCED WITH ALUMINUM OXIDE FILLER**

Volgograd State Technical University

The cohesive and adhesive strength of aluminide coatings formed on the surface of commercially pure titanium in molten aluminum after heat treatment at 850°C was estimated by the scratching method. It is shown that the coating, the outer layer of which has a framework structure consisting of TiAl_3 particles surrounded by an $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ net, and the inner continuous layer adjacent to titanium consists of TiAl_2 , TiAl and Ti_3Al intermetallic compounds layers, does not have adhesive and cohesive cracks up to a load of 3 N.

Keywords: titanium, aluminizing, heat treatment, coatings, adhesion, cohesion

Введение

Использование покрытий на основе алюминидов титана, армированных алюмооксидным наполнителем целесообразно для увеличения их высокотемпературных показателей. Работы в направлении создания подобных материалов, включающих тугоплавкие соединения, ведутся уже давно как в нашей стране, так и за рубежом. Однако основной проблемой таких материалов является недостаточная связь на границе раздела «матрица–армирующий компонент» и технологическая сложность по обеспечению равномерного распределения упрочнителя в материале матрицы [1].

Известно, что при использовании метода горячего алитирования с последующей термообработкой при температуре выше температуры плавления алюминия происходит формирование алюминидного покрытия на основе TiAl_3 с высоким уровнем оксидной фазы, распределенной по объему покрытия [2, 3].

Целью настоящей работы являлось исследование адгезионных и когезионных показателей покрытий, полученных на поверхности титана ВТ1-0 после его алитирования погружением в расплав и последующей термообработки.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились на образцах из технически чистого титана ВТ1-0 с покрытием, сформированным после горячего алитирования и термической обработки.

Алитирование образцов из технического титана ВТ1-0 размером 10×10×2 мм осуществляли при их погружении в расплав алюминия. Для получения расплава навеску АД1 нагревали в печи SNOL 8.2/1100 до температуры 740 °С в графитовом тигле. Титановые образцы предварительно зачищали на наждачной бумаге зернистостью до 800 и обезжиривали. Подготовленные образцы погружали в ванну с расплавом на 2 мин, а затем извлекали из тигля

© Кулевич В. П., Богданов А. И., Шморгун В. Г., Седов Д. Э., Соколенко И. А., Голубева Е. И., Кириченко. А. Н., 2025.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00231, <https://rscf.ru/project/24-29-00231/>

и охлаждали на воздухе. Таким образом все титановые образцы были покрыты однородным слоем алюминия толщиной около 40 мкм.

Термическую обработку алитированных образцов проводили в печи SNOL 8.2/1100 по режиму 850 °С, 5 ч.

Изучение процессов адгезионного/когезионного разрушения покрытий, а также определение их твердости царапанием производили на базе микротвердомера ПМТ-3М. В качестве индентора использовали четырехгранную алмазную пирамиду Виккерса с углом при вершине 136°. Горизонтальная движущая сила прикладывалась через микровинт к вращающейся платформе микротвердомера. Нанесение

царапин длиной 500 мкм проводили в плоскости металлографического шлифа из подложки через покрытие с выходом за его пределы. Скорость равномерного перемещения столика составляла 20 мкм/с. Вертикальная нагрузка на индентор варьировалась в пределах 0,1–5 Н. Определение геометрических параметров царапины (рис. 1) проводилось с помощью оптической микроскопии (Olympus BX61).

В качестве параметра, характеризующего когезионное разрушение покрытия, использовали критическое расстояние (L_k) – расстояние от начала конического уширения царапины, формирующегося при выходе индентора из покрытия, до поверхности покрытия (рис. 1).

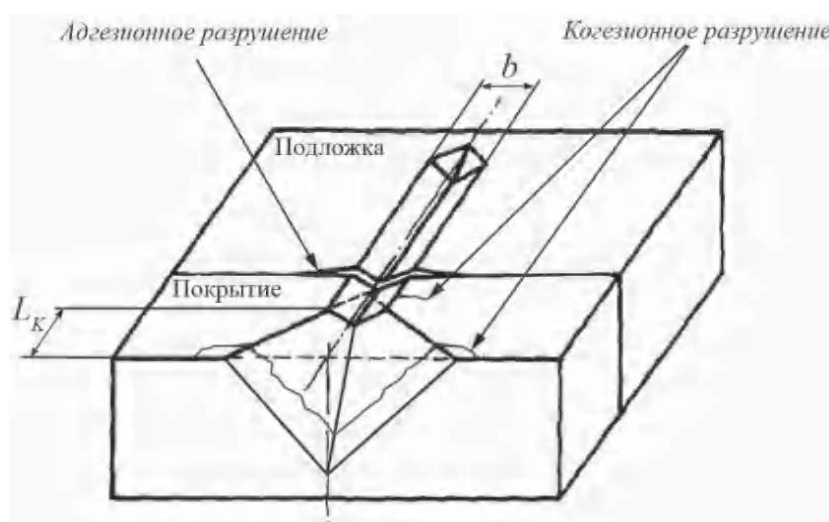


Рис. 1. Схематическое изображение определения ширины царапины и критического расстояния

Значение твердости (МПа) при царапании, характеризующее истинное сопротивление разрушению, определяли по формуле:

$$H = (0,3782 \cdot F) / b^2,$$

где F – сила вдавливания, Н; b – ширина царапины, мм.

Результаты и их обсуждение

После алитирования в расплаве и термообработки при 850 °С было получено покрытие, по своему химическому и фазовому составу соответствующее полученному в работе [3]. Внешний слой покрытия имел каркасную

структуру, состоящую из частиц $TiAl_3$, окруженных сеткой Al_2O_3 , а внутренний сплошной слой, прилегающий к титану, состоял из слоев интерметаллидов $TiAl_2$, $TiAl$ и Ti_3Al .

Прохождение индентора по покрытию сопровождалось выкрашиванием отдельных включений интерметаллида и оксидов и последующим их удалением из царапины. При переходе от титановой подложки к покрытию, несмотря на высокую твердость алюминидов и оксидов, ширина царапины практически не изменялась. Адгезионные и когезионные трещины в покрытии не наблюдались до нагрузки 3 Н (рис. 2).

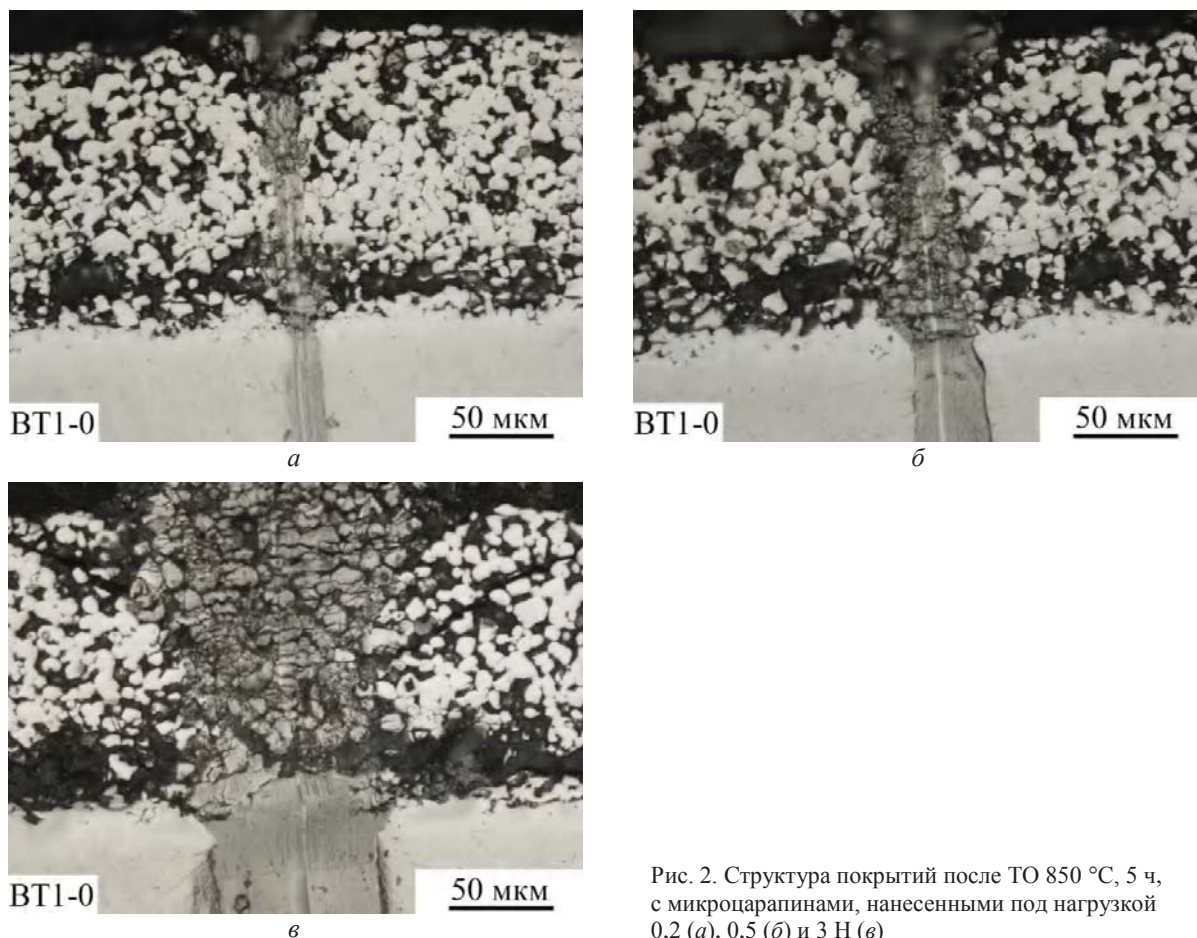


Рис. 2. Структура покрытий после ТО 850 °С, 5 ч, с микроцарапинами, нанесенными под нагрузкой 0,2 (а), 0,5 (б) и 3 Н (в)

Анализ полученных графических зависимостей позволил установить влияние прикладываемой нагрузки на твердость при царапании (рис. 3) и критическое расстояние L_c (рис. 4). При малых значениях нагрузки до 0,5–1 Н наблюдаются отклонения значений твердости царапания от установившихся значений, что в случае подложки может быть связано с погрешностью измерений, а в покрытых образцах – недоста-

точностью такой нагрузки для разрушения межфазных связей оксид–интерметаллид. С ростом нагрузки межфазные связи разрываются, твердость снижается до ~200 МПа и далее уже не зависит от прикладываемой нагрузки. Критическое расстояние и максимальное уширение царапины у поверхности покрытия плавно увеличиваются с ростом нагрузки на индентор.

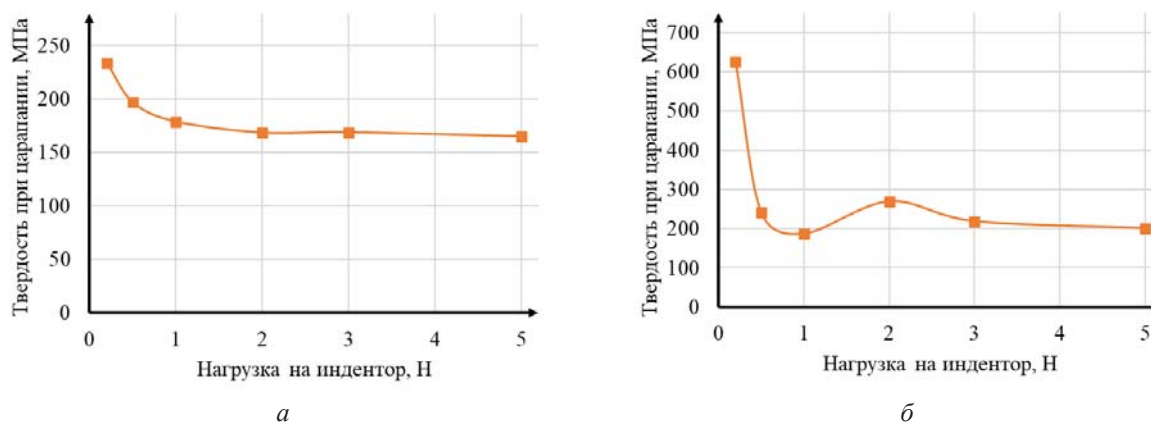


Рис. 3. Твердость при царапании подложки BT1-0 (а) и покрытия (б)

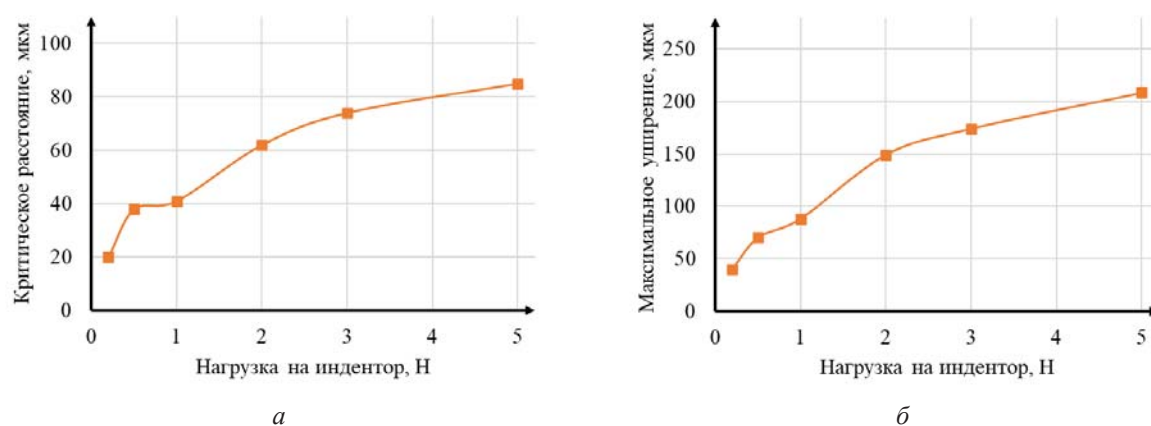


Рис. 4. Критическое расстояние, характеризующее когезионное разрушение покрытия (а) и максимальное уширение царапины на поверхности покрытия (б) (см. рис. 1)

Вывод

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что в покрытии на титане ВТ1-0, внешний слой которых имеет каркасную структуру, состоящую из частиц $TiAl_3$, окруженных сеткой Al_2O_3 , а внутренний сплошной слой, прилегающий к титану, состоит из слоев интерметаллидов $TiAl_2$, $TiAl$ и Ti_3Al , реализуется механизм так называемого вязкого разрушения, при котором отслоение и скалывание покрытий может происходить только при очень больших нагрузках, либо в случае слабой адгезии. Основным для такого покрытия является механизм когезионного разрушения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Surface Modification of TiAl Intermetallics by Liquid Aluminizing/ I.C.Hsu, S.K.Wu, R.Y.Lin // Materials Chemistry and Physics, Vol.49, p. 184-190, The Netherland. (SCI) (CS83-0210-D002-003)
2. Deqing W., Ziyuan S., Yingli T. Microstructure and oxidation of hot-dip aluminized titanium at high temperature // Applied Surface Science. – 2005. – Т. 250. – №. 1-4. – С. 238-246.
3. Исследование влияния посттермообработки на структуру алитированного слоя на титане ВТ1-0 / А. И. Богданов, В. П. Кулевич, В. Г. Шморгун, М. А. Разуваев, И. А. Соколенко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 10 (293) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2024. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 10–14. – DOI: 10.35211/1990-5297-2024-10-293-10-14.