



УДК 669.187.2

## ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЛАВА Ti–Al–(ЛЭ) ПОСЛЕ ЗОННОЙ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ

В. А. Костин, И. И. Статкевич, Е. А. Аснис,  
Г. М. Григоренко, В. В. Лакомский,  
Н. В. Пискун, Р. В. Козин, В. А. Березос

Приведены результаты фрактографических исследований алюминидов титана Ti–Al–(ЛЭ) в исходном состоянии и после зонной перекристаллизации.

Results of fractographic examinations of titanium aluminide Ti–Al–(LE) in initial state and after zonal recrystallization are given.

**Ключевые слова:** интерметаллидные сплавы; алюминид титана; фрактографические исследования; зонная перекристаллизация; характер разрушения; излом

Интерметаллидные сплавы на основе алюминидов титана благодаря высокой жаропрочности, жаростойкости и коррозионной стойкости являются весьма перспективными для использования при производстве турбин авиационных двигателей и других изделий аэрокосмической техники.

Основным недостатком указанных сплавов является низкая пластичность при комнатной температуре. Это значительно усложняет их технологическую обработку и промышленное использование. Работы, направленные на увеличение пластичности этих сплавов связаны как с созданием новых сплавов на основе алюминидов титана, так и с разработкой различных технологических процессов, повышающих их пластичность [1].

Улучшить пластические характеристики литого интерметаллидного сплава можно путем зонной перекристаллизации. Применение зонной плавки дает возможность обеспечить направленную кристаллизацию [2]. При правильно подобранной технологии плавки фронт кристаллизации приближается к плоскому. При этом обеспечивается более равномерное распределение примесей по сечению и объему слитка, а также снижается уровень напря-

женного состояния, что должно содействовать повышению пластичности материала.

Фрактографические исследования проводили на образцах интерметаллидного сплава системы TiAl следующего состава, мас. %: 46,5 Ti; 35 Al; 12,5 Nb; 3 Zr; 3 Cr, полученного способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) [3].

Фрактографические исследования осуществляли на сканирующем электронном микроскопе JSM-35F, снабженном системой анализа INCA-450. Исследовали образцы, изготовленные способом ЭЛПЕ в исходном состоянии и после зонной перекристаллизации.

Исследования показали, что характер разрушения образцов исходного материала — смешанный. В основном отмечен ярко выраженный транскристаллитный ручейстый излом по механизму скола, характерному для хрупкого разрушения (рис. 1, а).

Кроме того, на поверхности излома видны элементы вязкого разрушения — светлые волнистые гребни, указывающие на изменение движения трещины. Поскольку на эту процедуру уходит часть энергии разрушения, то можно считать, что материал в определенной степени оказывает сопротивление разрушению, а следовательно, содержит некоторый процент пластичности.

Помимо того, в изломе обнаружены микропоры. Скол в сочетании с микропорами является характерным механизмом разрушения титановых  $\alpha_2$  и

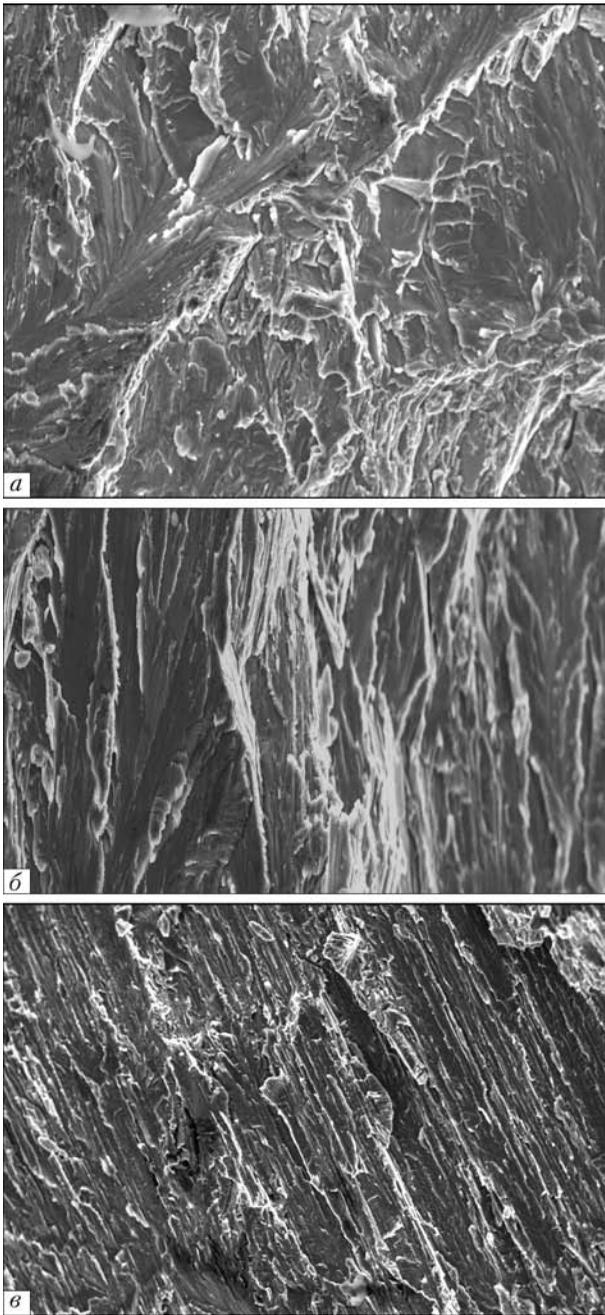


Рис. 1. Поверхность различных участков излома сплава в исходном состоянии; *a, в* –  $\times 200$ ; *б* –  $\times 480$

( $\gamma + \alpha_2$ ) сплавов. В однофазной области зерна, ориентированные осями параллельно оси действующего напряжения, характеризуются высокими значениями напряжения, нормальными к плоскости скола, и поэтому они разрушаются сколом [4]. На зерна с другой ориентировкой действуют меньшие напряжения. Такие зерна подвергаются пластической деформации и разрушаются по вязкому механизму.

На рис. 1, *б* представлена картина излома другого участка исходного материала. Здесь, как и на рис. 1, *а*, обнаружено хрупкое транскристаллитное разрушение материала по механизму скола. На этом же образце зафиксированы и чистые протяженные участки, свидетельствующие о том, что трещины идут по границе фазы.

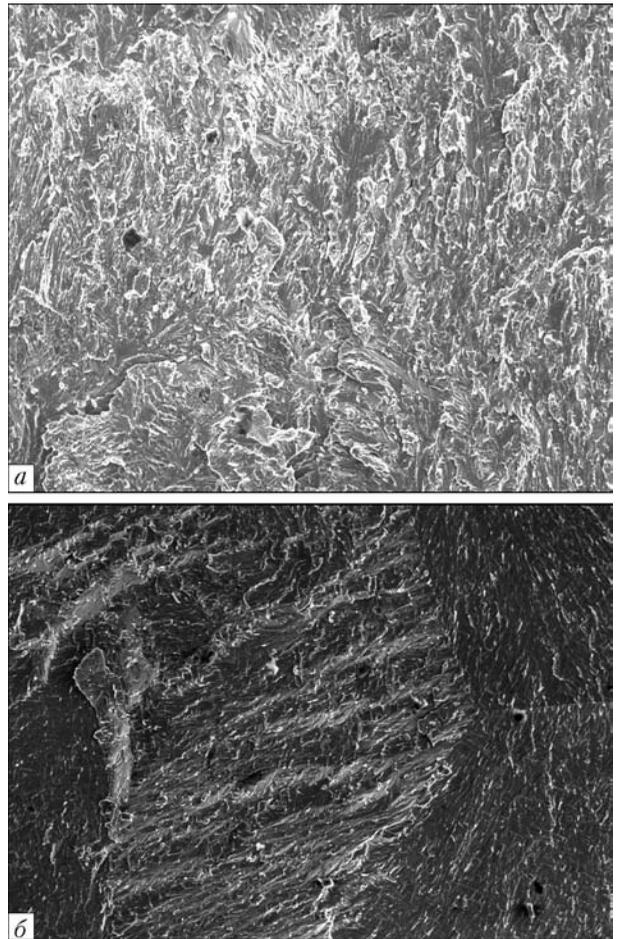


Рис. 2. Поверхность участков излома сплава после зонной перекристаллизации,  $\times 200$

На рис. 1, *в* показан еще один участок излома исходного материала. Здесь обнаружен ряд пластинчатых ступенек, параллельных друг другу. Такая картина является типичной для хрупкого разрушения интерметаллида  $Ti_3Al$  ( $\alpha_2$ ). Эти ступеньки и идут в одном направлении. Обычно при разрушении такие пластинчатые параллельные ступеньки образуются на игольчатых пластинках  $\alpha_2$ -фазы.

Фрактографические исследования образцов, переплавленных в высокочастотном электромагнитном поле, показали, что поверхности изломов отличаются от таковых исходного материала.

В изломе (рис. 2, *а*) появляется чешуйчатая структура с гребешками отрыва, характерными для вязкой составляющей. После зонного переплава в изломе зафиксированы изогнутые волнистые ступеньки, хаотично расположенные по полю излома. Именно появление чешуйчатых ступенек в изломе способствует развитию вязкого разрушения, чем объясняется повышение пластичности.

Возникновение крупных гладких фасеток, по видимому, обусловлено пластическим сдвигом.

Анализ результатов проведенных фрактографических исследований показал, что в образцах интерметаллида, подвергнутых зонному переплаву, отмечен смешанный характер разрушения – тран- и интеркристаллитный. В отличие от исходных образ-

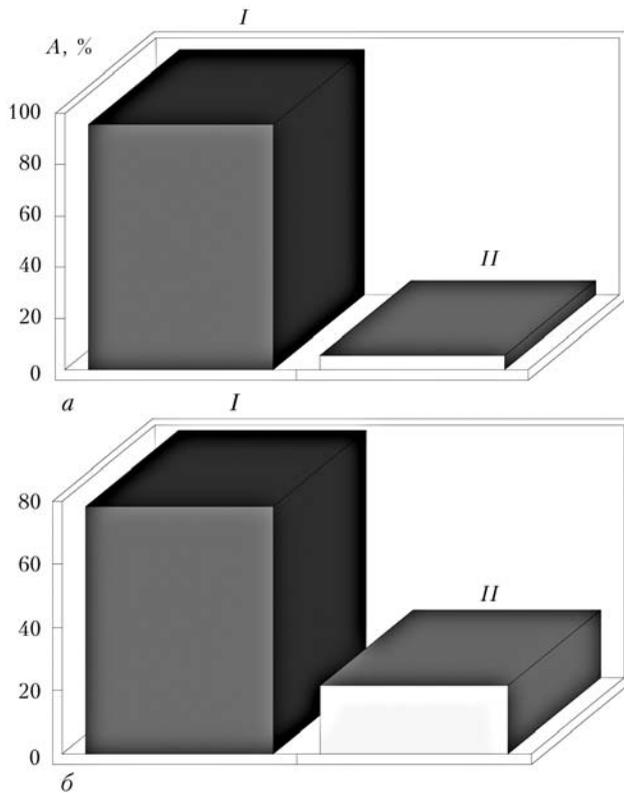


Рис. 3. Диаграммы распределения вязкой и хрупкой составляющих в поле образца в исходном состоянии (а) и после зонной перекристаллизации (б); А – область всего образца; I – область хрупкой составляющей (соответственно 95,6 и 78,3 %); II – область вязкой составляющей (соответственно 5,5 и 21,6 %)

цов, здесь в картине разрушения выявлены значительные участки вязкой составляющей.

Кроме того, анализ результатов выполненных фрактографических исследований показал (рис. 2, б) наличие участков, где в разных зернах характер разрушения одинаков, имеются бороздки хрупкого разрушения с параллельным направлением, резко меняющимся в соседнем зерне. Чем чаще меняется направление разрушения, тем более пластичен материал. Ветвистые ступеньки на изломах исследованных образцов также свидетельствуют о пластичности материала.

Наличие вязкой составляющей в изломе можно также объяснить стабильностью  $\alpha_2$ -фазы за счет пересыщенности ее ниобием, который является сильным стабилизатором  $\beta$ -фазы. Кроме того, в данном сплаве имеются и другие  $\beta$ -стабилизаторы, в частности церий и хром, способствующие образованию  $\beta$ -фазы. Наличие в сплаве этой фазы вызывает развитие вязкого разрушения и повышение характеристик пластичности [5].

Наличие участков интеркристаллитного разрушения сплавов может быть обусловлено также вы-

делением по границам  $\beta$ -зерен  $\alpha_2$ -фазы различной дисперсности [6].

С помощью анализатора INCA-450 по порогу яркости вычислили долю вязкой составляющей в образцах до зонной перекристаллизации и после нее (рис. 3).

В образцах, подвергнутых зонной перекристаллизации, вязкая составляющая на 16 % превышала таковую исходных образцов, полученных способом ЭЛПЕ (количество вязкой составляющей материала в исходном состоянии – 5,5, а после зонного переплава – 21,6 %).

Структурные изменения, происходящие в процессе зонной перекристаллизации, положительно влияют на повышение пластичности при комнатной температуре. При испытании на растяжение образцов данного сплава при 20 °С пластичность увеличилась примерно в 3 раза (от 0,8 исходного материала до 2,2 % после зонной перекристаллизации).

## Выводы

1. Фрактографические исследования поверхности изломов образцов интерметаллида показали, что для исходного материала характерно хрупкое транскристаллитное разрушение по механизму скола.

2. Установлено, что изломы образцов интерметаллида после зонной перекристаллизации имеют смешанный характер с преобладанием пластического разрушения.

3. Определено, что зонная перекристаллизация алюминидов титана системы Ti–Al–Nb–Zr–Cr способствует увеличению вязкой составляющей в изломе на 16,1 %, по сравнению с исходным материалом.

1. *Анаташов В. Г., Ночовная Н. А., Иванов В. И.* Тенденция развития жаропрочных титановых сплавов для авиационного строительства // *Технология легких сплавов.* – 2002. – № 4. – С. 72–76.
2. *Зонная перекристаллизация алюминидов титана* / Г. М. Григоренко, В. В. Лакомский, И. И. Статкевич и др. // *Тр. конф. «Титан в СНГ 2010»* (Екатеринбург, май 2010 г.). – Екатеринбург, 2010. – С. 132–139.
3. *Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В.* Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорекреационных металлов. – Киев: Наук. думка, 2008. – 311 с.
4. *Бочвар А. Г., Саленков В. С., Файнброн А. С.* Фрактографические исследования сплавов системы Ti–Al–Nb с высоким содержанием ниобия // *Металловед. и терм. обраб. металлов.* – 2008. – № 3. – С. 30–40.
5. *Поварова К. Б., Банных О. А.* Принципы создания конструкционных сплавов на основе интерметаллидов // *Материаловедение.* – 1999. – № 2. – С. 27–32.
6. *Структура и некоторые свойства литых сплавов на основе TiAl, легированных V, Nb, Ta, Hf, Zr* / К. Б. Поварова, О. А. Банных, И. В. Бузов и др. // *Металлы.* – 1998. – № 3. – С. 31–41.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 24.03.2011