



УДК 669.187.2

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА ПОСЛЕ ЗОННОЙ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ

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

Исследовано влияние зонной перекристаллизации интерметаллидного сплава системы Ti–Al–Nb–Zr–Cr на его структуру и некоторые механические характеристики. Установлено, что зонный переплав способствует обеспечению направленной кристаллизации, уменьшению размера зерна интерметаллида, снижению его твердости и более равномерному ее распределению по сечению и объему слитка, в сравнении с интерметаллидом, полученным способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. Эти структурные изменения приводят к повышению прочности и пластичности интерметаллида.

The effect of zonal recrystallization of intermetallic alloy of Ti–Al–Nb–Zr–Cr system on structure and some mechanical characteristics of the alloy was investigated. It was found that the zonal remelting promotes the formation of directed crystallization, decrease in size of intermetallic grain, reduction in its hardness and more uniform its distribution in section and volume of ingot as compared with intermetallic, produced by the method of electron beam cold hearth melting (EBCHM). These structural changes lead to the increase in strength and ductility of intermetallic.

Ключевые слова: интерметаллид; алюминид титана; зонная перекристаллизация; направленная кристаллизация; структура; механические характеристики

Интерметаллидные сплавы системы Ti–Al отличаются уникальными конструкционными свойствами и считаются весьма перспективными для изделий аэрокосмической техники. Кроме высоких значений жаропрочности, жаростойкости и коррозионной стойкости, эти сплавы имеют низкую плотность (3,8... 4,0 г/см³), что позволяет удовлетворить одно-

из наиболее важных требований к изделиям аэрокосмической техники — значительно уменьшить массу конструкций.

Основным недостатком указанных сплавов считают низкую пластичность при комнатной температуре, что усложняет их технологическую обработку и промышленное использование. Поэтому создание сплавов системы Ti–Al и способов их получения с наилучшим сочетанием высокотемпературных и низкотемпературных свойств является весьма важной задачей.

Механические свойства алюминидов титана в значительной степени определяются их составом и структурой.

В данной работе исследовали структуру и некоторые механические свойства интерметаллидного сплава системы Ti–Al следующего состава, мас. %: Ti — 46,5; Al — 35; Nb — 12,5; Zr — 3; Cr — 3, разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона и полученного способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) [1].

На рис. 1 приведена микроструктура исходного материала, выплавленного способом ЭЛПЕ, которая состоит из крупных, слегка вытянутых зерен, не имеющих четкого очертания границ. Размер зерна равен 40... 45 мкм. В теле зерна зафиксирована

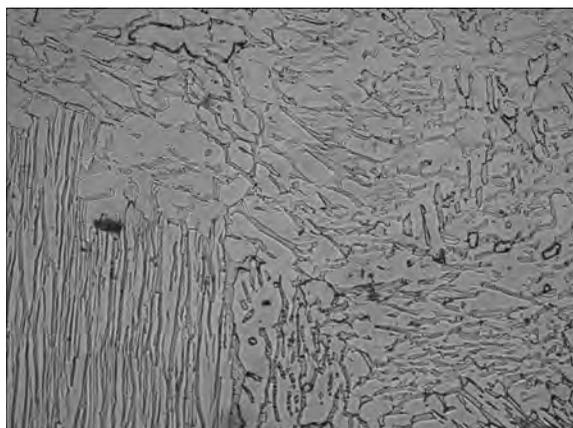


Рис. 1. Микроструктура (×320) интерметаллида после ЭЛПЕ

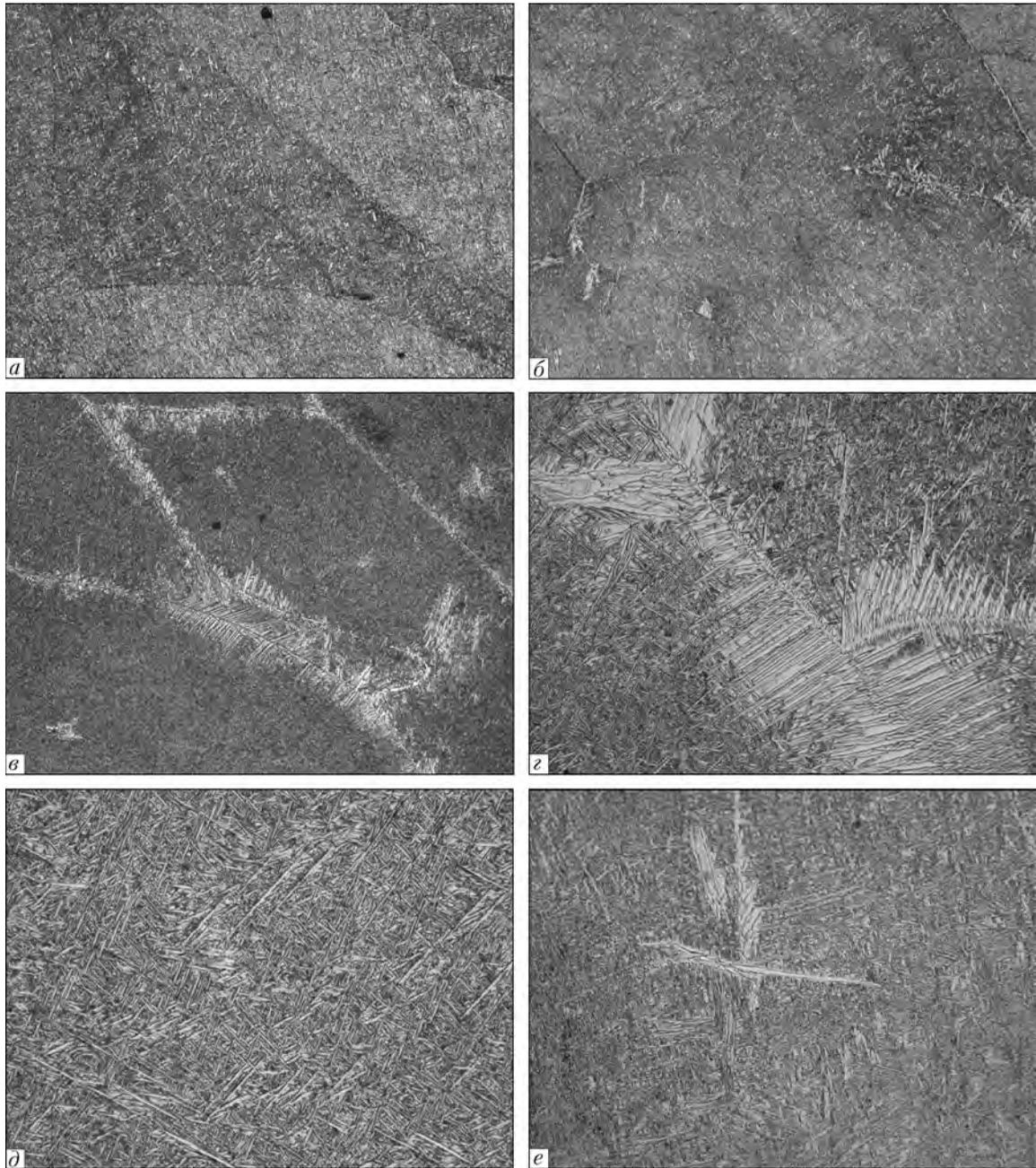


Рис. 2. Микроструктура интерметаллида после зонной перекристаллизации: *a* – начало, $\times 80$; *b* – середина, $\times 80$; *c* – конец процесса плавки, $\times 80$; *d* – фрагмент зерна с мартенситоподобными иглами, $\times 320$; *e* – трехфазная структура внутри зерна, $\times 500$; *f* – участок зерна с выделениями β - и γ -фазы, $\times 320$

ламельная структура γ -фазы и мелкая игольчатая α_2 -фазы. Твердость интерметаллида измеряли на приборе «Лесо» при нагрузке 25 г. Твердость матрицы зерна изменялась от 2370 до 3110 МПа. Участки с выделениями игольчатой фазы, которая по диаграмме состояния идентифицируется как $\gamma+\alpha_2$, имеют более высокое значение твердости (от 5140 до 6270 МПа).

На последующем этапе работы сплав подвергали зонной перекристаллизации. Применение зонной плавки дает возможность обеспечить направленную кристаллизацию [2]. В случае правильно подобранной технологии плавки фронт кристаллизации приближается к плоскому. При этом обеспечивается более равномерное распределение примесей по се-

чению и объему слитка, а также снижается уровень напряженного состояния и, соответственно, повышается пластичность материала.

Микроструктура образца после зонного переплава (рис. 2) состоит из вытянутых в одном направлении зерен со средним размером 31,5 мкм, которые также имеют внутреннюю ламельную структуру, состоящую из $(\gamma+\alpha_2)$ пластинчатых колоний. В центре образца (рис. 2, *a*) границы между зернами тонкие и имеют толщину 2 мкм. Чем ближе зона продвигается к верхней части образца, тем обнаруживается большее утолщение границ зерен (рис. 2, *b*), вдоль которых появляются выделения светлых слоев β -фазы с располагающимися на них крупными грубыми игольчатыми выделениями γ -фазы,

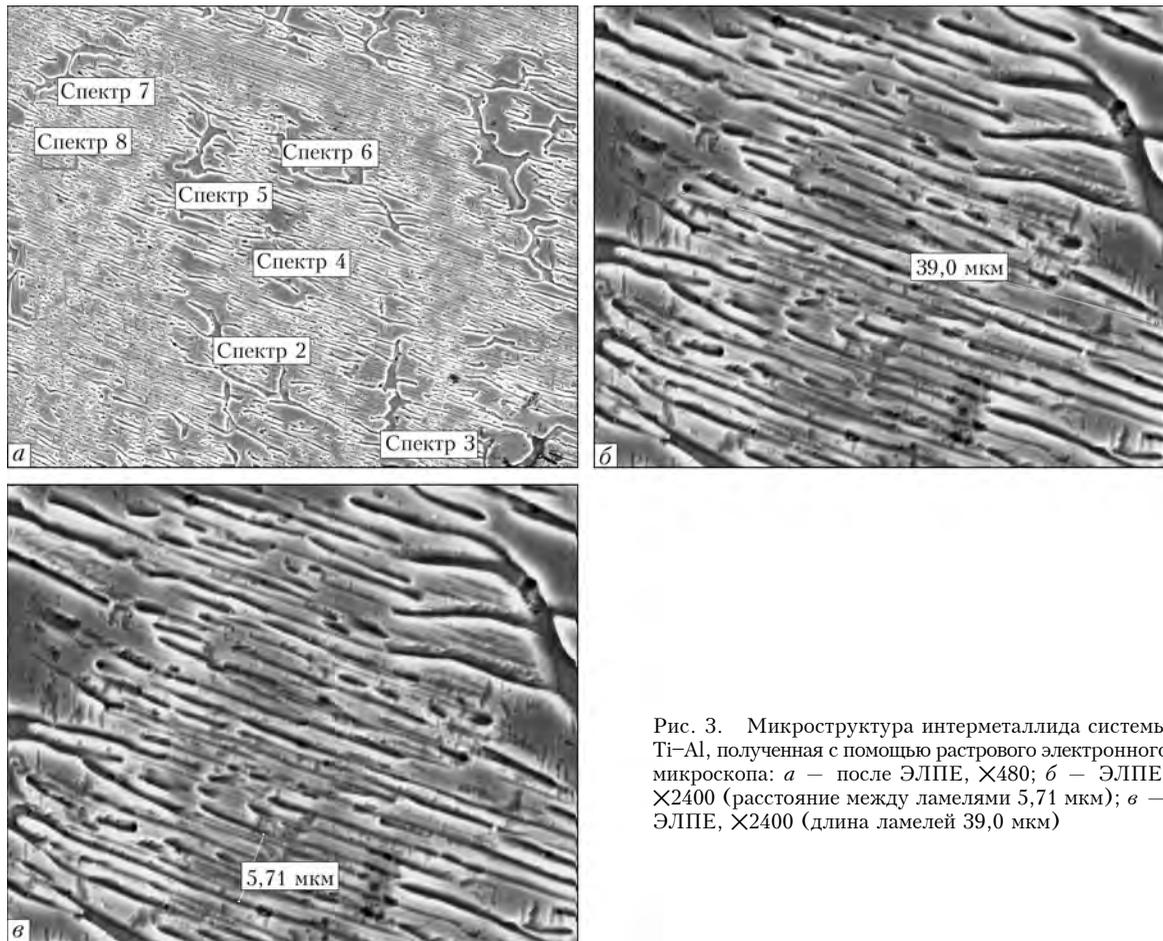


Рис. 3. Микроструктура интерметаллида системы Ti–Al, полученная с помощью растрового электронного микроскопа: а – после ЭЛПЕ, $\times 480$; б – ЭЛПЕ, $\times 2400$ (расстояние между ламелями 5,71 мкм); в – ЭЛПЕ, $\times 2400$ (длина ламелей 39,0 мкм)

прорастающими от границы в глубь образца. К моменту завершения процесса плавки толщина границ зерен с крупными мартенситоподобными иглами на светлой матрице (рис. 2, в) составляет 5... 12 мкм. Фрагмент указанной структуры представлен на рис. 2, г. Внутри зерна в конце плавки появляется трехфазная структура (рис. 2, д) [3], представляющая собой β -фазу с грубыми иглами, γ -фазу и мелкодисперсные частицы α_2 -фазы.

Таблица 1. Химический состав сплава алюминид титана после ЭЛПЕ, определенный методом количественного микрорентгеноспектрального анализа в различных точках исследуемого образца

№ спектра	Массовая доля элементов, %				
	Al	Ti	Cr	Zr	Nb
2	18,40	59,71	8,89	1,56	11,45
3	22,18	59,92	4,59	3,21	10,09
4	30,17	52,57	1,74	3,98	11,55
5	29,96	51,88	2,06	5,05	11,05
6	19,89	59,44	8,90	1,13	10,65
7	27,07	56,10	2,72	3,71	10,39
8	29,63	55,86	2,61	2,89	9,02

Кроме того, внутри некоторых зерен встречаются участки светлых выделений β -фазы с грубыми γ -иглами (рис. 2, е).

Исследовали распределение твердости на образцах интерметаллида после зонной перекристаллизации. Результаты исследования показали, что твердость, которую замеряли с шагом 1 мм вдоль шлифа, стабильна и в среднем составляет 4640 МПа, причем и внутри зерна, и на границе она одинакова. Это почти на 20 % меньше, чем у сплава, выплавленного способом ЭЛПЕ.

Проведено исследование на электронном растровом микроскопе JSM-840 и выполнен микрорентгеноспектральный анализ образцов в исходном состоянии после ЭЛПЕ и последующей зонной перекристаллизации.

На рис. 3, а представлена микроструктура данного сплава. В некоторых, наиболее характерных, точках проведен количественный микрорентгеноспектральный анализ (табл. 1). Из результатов анализа видно, что светлые области обогащены ниобием, который является β -стабилизатором [4]. Таким образом, можно предположить, что светлая фаза является β -фазой. Также определена средняя длина ламелей – 39,0 мкм (рис. 3, б) и расстояние между ними – 5,7 мкм (рис. 3, в).

На рис. 4, а представлена микроструктура образцов интерметаллида, подвергнутых зонной перекристаллизации. Из рисунка видно, что после

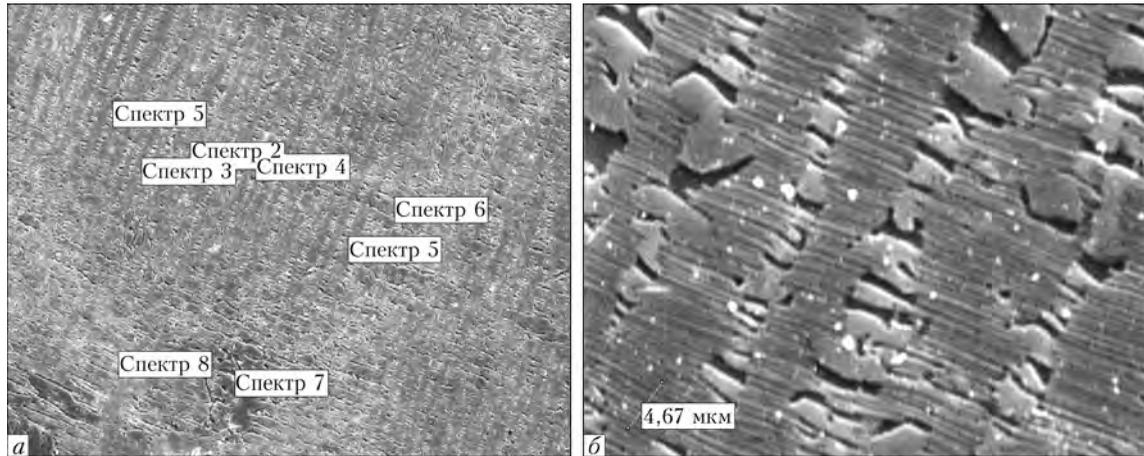


Рис. 4. Микроструктура интерметаллида Ti–Al после зонной перекристаллизации: а – $\times 480$ (растровый электронный микроскоп); б – $\times 2400$ (растровый электронный микроскоп; расстояние между ламелями 4,67 мкм)

Таблица 2. Химический состав сплава алюминид титана после зонной перекристаллизации, определенный методом количественного микрорентгеноспектрального анализа в различных точках исследуемого образца

№ спектра	Массовая доля элементов, %				
	Al	Ti	Cr	Zr	Nb
1	29,81	52,81	1,66	3,62	12,10
2	28,36	54,68	2,64	3,01	11,31
3	26,46	54,77	4,22	2,76	11,79
4	28,07	55,60	2,11	2,50	11,71
5	27,88	53,27	2,68	3,09	13,09
6	27,84	55,76	2,56	3,40	10,43
7	23,51	55,97	6,23	4,36	9,94
8	25,70	55,46	4,00	3,59	11,25

зонного переплава получается структура, вытянутая в сторону движения зоны, что должно способствовать повышению пластичности материала [5]. Распределение элементов по полю образца довольно равномерное и соответствует стехиометрическому составу сплава (табл. 2).

При увеличении $\times 2400$, как и для образцов исходного материала, было определено расстояние между ламелями (рис. 4, б). Поскольку материал после зонного переплава имеет lamellarную структуру, состоящую из вытянутых вдоль направления движения зоны длинных непрерывных ламелей, то определить их размер не представлялось возможным. Расстояние между ламелями составляло 4,67 мкм, что на 18 % меньше, чем у основного материала.

В работе [6] показано, что значения пластичности наиболее сильно зависят от типа структуры, а механические характеристики интерметаллидных сплавов, имеющих lamellarную структуру, — в боль-

шей степени от соотношения между длиной ламелей и расстоянием между ними. При оптимальных сочетаниях параметров пластинчатой структуры пластичность таких сплавов может быть не хуже, чем у глобулярной.

Механические испытания на одноосное растяжение при комнатной температуре позволили установить, что прочность интерметаллида после зонной плавки равняется 580 МПа, а относительное удлинение — 2,2 %, в то время как прочность основного материала достигает 524 МПа, а относительное удлинение — 0,8 %.

Таким образом, проведенные исследования показали, что зонная перекристаллизация интерметаллида системы Ti–Al–Nb–Zr–Cr, полученного способом ЭЛПЕ, обеспечивает направленную кристаллизацию, уменьшение размера зерна интерметаллида, снижение твердости и более равномерное ее распределение по сечению и объему слитка, что способствует повышению прочности и пластичности интерметаллида и подтверждается результатами механических испытаний.

1. Жук Г. В., Тригуб Н. П., Замков В. Н. Получение слитков γ -алюминид титана методом ЭЛПЕ // Современ. электрометаллургия. — 2003. — № 4. — С. 20–22.
2. Пфанн В. Зонная плавка. — М.: Мир, 1970. — 368 с.
3. Имаев В. М., Имаев Р. М., Хисматуллин Т. Г. Механические свойства литого интерметаллидного сплава Ti–43Al–7(Nb,Mo)–0,2В (ат. %) после термической обработки // Физика металлов и металловедение. — 2008. — 105, № 5. — С. 516–522.
4. Структура и некоторые свойства литых сплавов на основе TiAl, легированных V, Nb, Ta, Hf, Zr / К. Б. Поварова, О. А. Баньных, И. В. Бузов и др. // Металлы. — 1998. — № 3. — С. 31–41.
5. Кузнецов А. В., Имаев В. М., Имаев Р. М. Микроструктурный контроль и механические свойства интерметаллидных сплавов на основе γ -TiAl + α_2 -Ti₃Al // Там же. — 2002. — № 6. — С. 102–110.
6. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. — М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. — С. 466–468.

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

Поступила 24.03.2011