



УДК 669.187.2

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА СВАРКИ НА СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВАХ СИСТЕМЫ Ti-Si-X

С. В. Ахонин, М. П. Кругленко, И. К. Петриченко,
Э. Л. Вржижевский, Р. Н. Мищенко, Р. В. Селин

Рассматривается формирование структуры при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) опытных жаропрочных α -, псевдо α -, $\alpha+\beta$ -сплавов с массовыми долями кремния от 0,35 до 3,0 %. Несмотря на то, что в сплавах, отличающихся содержанием кремния, образуется неодинаковое количество частиц силицидов различных форм и размеров, обнаружены сходные тенденции в формировании структуры сварных соединений при ЭЛС. В участках зоны термического влияния (ЗТВ), где металл нагревался ниже температуры полиморфного превращения $T_{p,t}$ для всех сплавов зафиксированы строчечные скопления частиц силицидов, ориентированные вдоль проката. В участках ЗТВ, где металл нагревался выше $T_{p,t}$, можно отметить измельчение зерна не только в α -сплавах с высоким, но и в $\alpha+\beta$ -сплаве с низким содержанием кремния. В шве также можно обнаружить измельчение зерна как для α -сплавов с высоким содержанием кремния, так и для псевдо α -, $\alpha+\beta$ -сплавов с низким содержанием кремния. Таким образом, силициды кремния, содержащиеся в этих сплавах, способствуют измельчению зерна в металле шва и ЗТВ, блокируя границы растущих зерен силицидами и проявляя модифицирующий эффект.

Considered is the formation of structure in electron beam welding (EBW) of experimental heat-resistant α -, pseudo α -, $\alpha+\beta$ -alloys with mass fractions of silicon from 0.35 to 3.0 %. In spite of the fact that in alloys, different in silicon content, unequal amount of particles of silicides of different shapes and sizes are formed, the similar tendencies in formation of structure of welded joints in EBW were revealed. In areas of heat-affected zone (HAZ), where metal was heated below the temperature of a polymorphous transformation $T_{p,t}$ the line clusters of particles of silicides, oriented along the rolling, were observed for all the alloys. In HAZ areas, where metal was heated above $T_{p,t}$ the grain refinement can be observed not only in α -alloys with a high content of silicon, but also in $\alpha+\beta$ -alloy with a low content of silicon. In weld the grain refinement can be observed both for α -alloys with a high content of silicon, but also for pseudo α -, $\alpha+\beta$ -alloys with a low content of silicon. Thus, the silicon silicides, contained in these alloys, promote the grain refining in weld metal and HAZ, blocking the boundaries of growing grains by silicides and manifesting the modifying effect.

Ключевые слова: структурные превращения; силициды; термический цикл

Большинство жаропрочных титановых сплавов содержат кремний, являющийся наиболее эффективной добавкой для повышения длительной прочности и сопротивления ползучести. Даже небольшие отличия в содержании кремния и других элементов в промышленных жаропрочных сплавах Ti-1100, IMI-834, VT-18U приводят к получению разных свойств материалов и свариваемости.

В данной работе рассматривается формирование структуры при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) опытных жаропрочных α -, псевдо α -, $\alpha+\beta$ -сплавов с массовой долей кремния от 0,35 до 3,0 %. Химический состав опытных сплавов приведен в таблице.

Химический состав опытных сплавов										
№ сплава	Массовая доля элементов, %									
	Al	Sn	Zr	Mo	V	Nb	Si	[O+C+N]	[O]	[N]
1	—	—	—	—	—	—	3,38	0,17	—	—
2	—	—	3,41	—	—	—	2,23	0,22	—	—
3	1,40	2,87	5,95	—	—	—	3,37	0,16	—	—
4	5,64	2,20	3,53	0,43	0,95	—	0,56	—	0,09	0,02
5	5,22	3,33	4,24	0,13	0,61	0,77	0,57	—	0,10	0,02
6	4,29	4,39	5,95	1,57	0,68	4,26	0,35	—	0,24	0,02

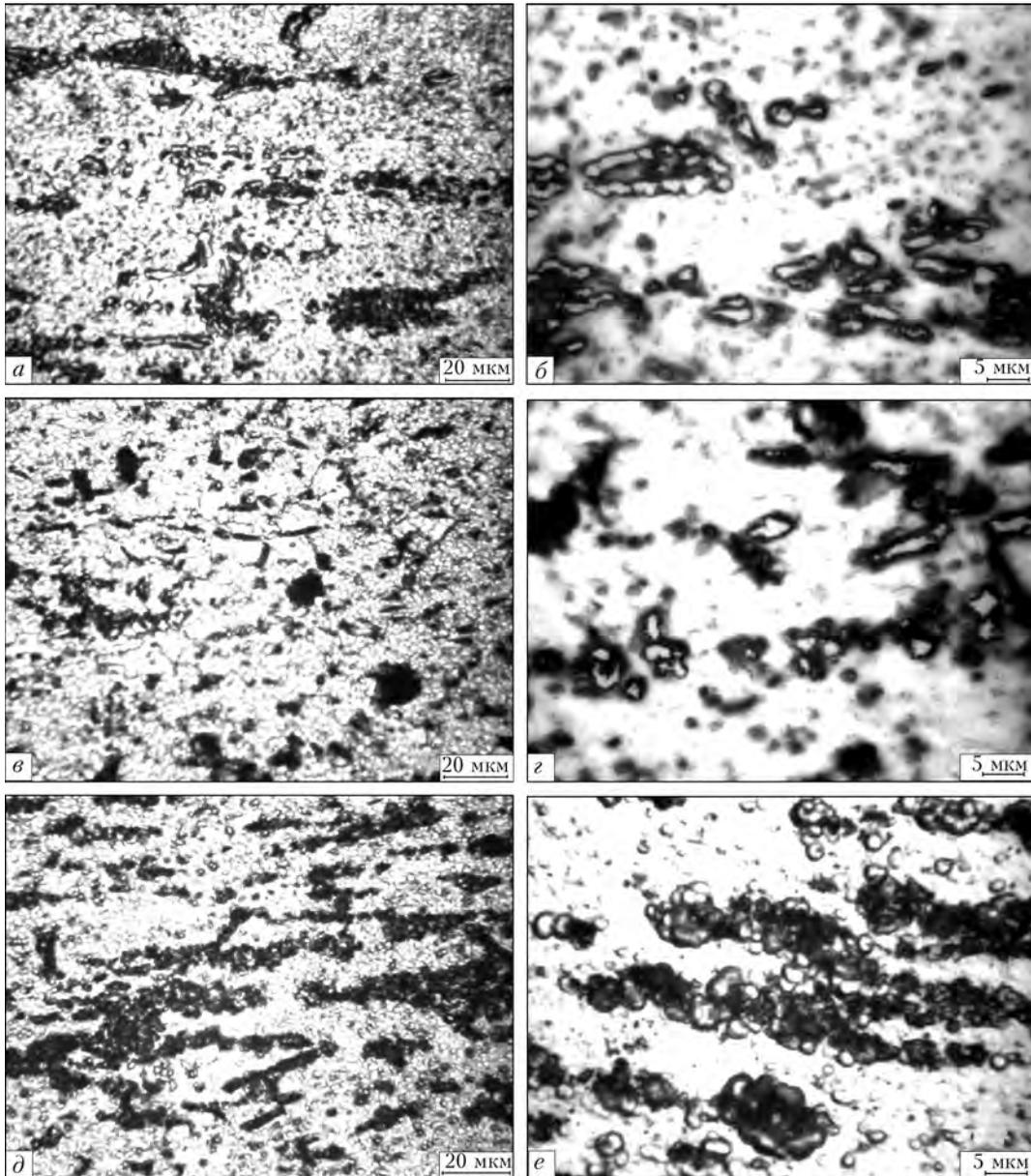


Рис. 1. Микроструктура ОМ сплавов Ti-3,4Si (а, б); Ti-3,4Zr-2,2Si (в, з); Ti-1,4Al-2,9Sn-6Zr-3,4Si (д, е)

Перед сваркой весь металл прокатали до толщин 6... 10 мм по стандартной методике и отожгли при 800 °С. Сварку проводили по режиму ($U_{св} = 60$ кВ, $I_{св} = 80$ мА, $v_{св} = 7$ мм/с), который является оптимальным с точки зрения предотвращения холодных трещин при сварке. При этом шов имел цилиндрическую форму.

Титановые α -сплавы Ti-3,4Si (№ 1), Ti-3,4Zr-2,2Si (№ 2), Ti-1,4Al-2,9Sn-6Zr-3,4Si (№ 3) с массовой долей кремния, превышающей термодинамически стабильное содержание, разработаны в Институте проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины для рабочих температур 20... 700 °С [1]. Эти α -сплавы имеют идентичные структуры не только основного металла (ОМ), но и сварных соединений в металле шва и зоны термического влияния (ЗТВ). В ОМ в α -матрице содержатся как равномерно распределенные точечные частицы силицидов, так и частицы силицидов более

крупного размера, расположенные в виде строчек, ориентированных вдоль направления проката (рис. 1). Все три сплава содержат примерно одинаковое количество точечных частиц размером менее 1,5 мкм. Наименьшее количество скоплений крупных частиц, достигающих 20 мкм, обнаружено в сплаве № 2 (рис. 1, в, з). Наибольшее количество скоплений зафиксировано в сплаве № 3 (рис. 1, д, е). Частицы, их составляющие, наиболее мелкие (3... 5 мкм) и правильной круглой формы.

Следует также отметить, что если в сплаве Ti-3,4Si силицидные частицы состоят только из Ti_5Si_3 , то остальные пять сплавов содержат цирконий и в них образуются сложные силициды с составом $(Ti, Zr)_xSi$, где x колеблется в пределах 1,67... 2,00 [2, 3].

Металл сварных швов α -сплавов Ti-3,4Si, Ti-3,4Zr-2,2Si, Ti-1,4Al-2,9Sn-6Zr-3,4Si имеет дендритную структуру (рис. 2). В междендритных про-

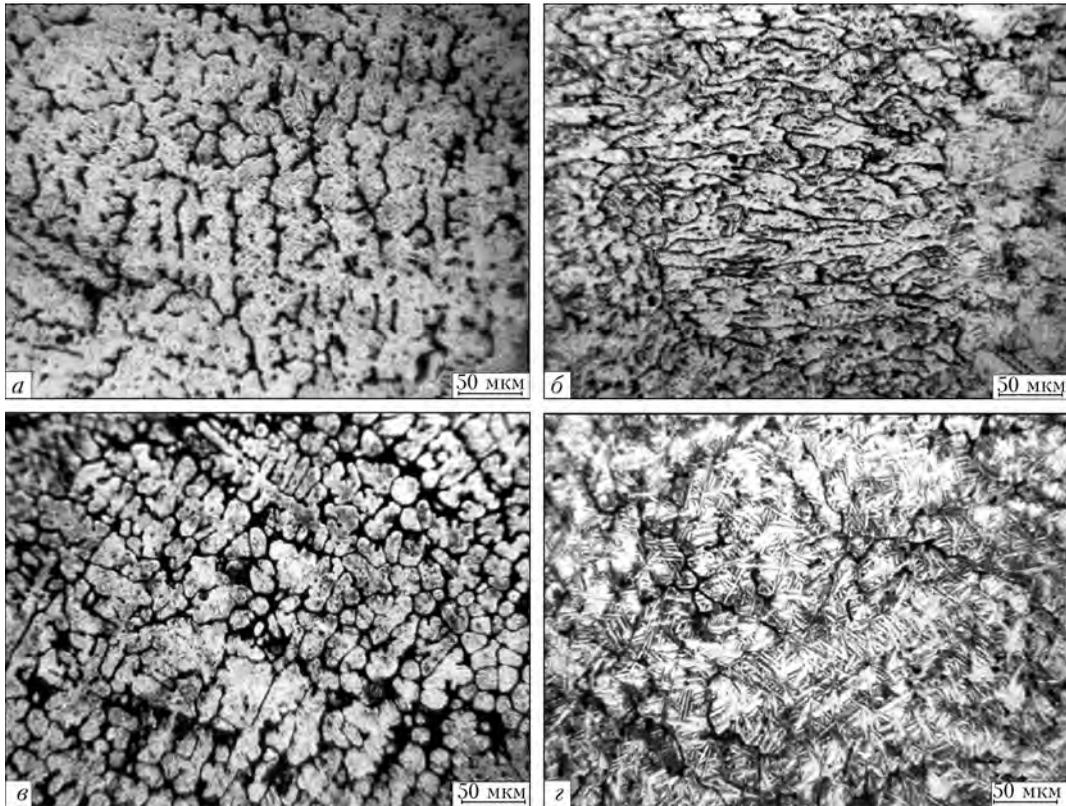


Рис. 2. Микроструктура металла шва α -сплавов Ti-3,4Si (а); Ti-1,4Al-2,9Sn-6Zr-3,4Si (б, в); Ti-3,4Zr-2,2Si (б)

межутках располагаются силициды (темная фаза). После охлаждения металла шва ниже температуры полиморфного превращения $T_{\text{п.п}}$ происходит $\beta \rightarrow \alpha'$ -превращение с образованием игольчатой структуры на фоне дендритов. В некоторых участках шва спла-

ва Ti-3,4Si отмечены единичные мелкие равноосные зерна размером 0,02... 0,03 мм, окруженные силицидами (рис. 2, а). В сплаве Ti-1,4Al-2,9Sn-6Zr-3,4Si таких зерен имеется большое количество (рис. 2, б). В сплаве Ti-3,4Zr-2,2Si в центральной

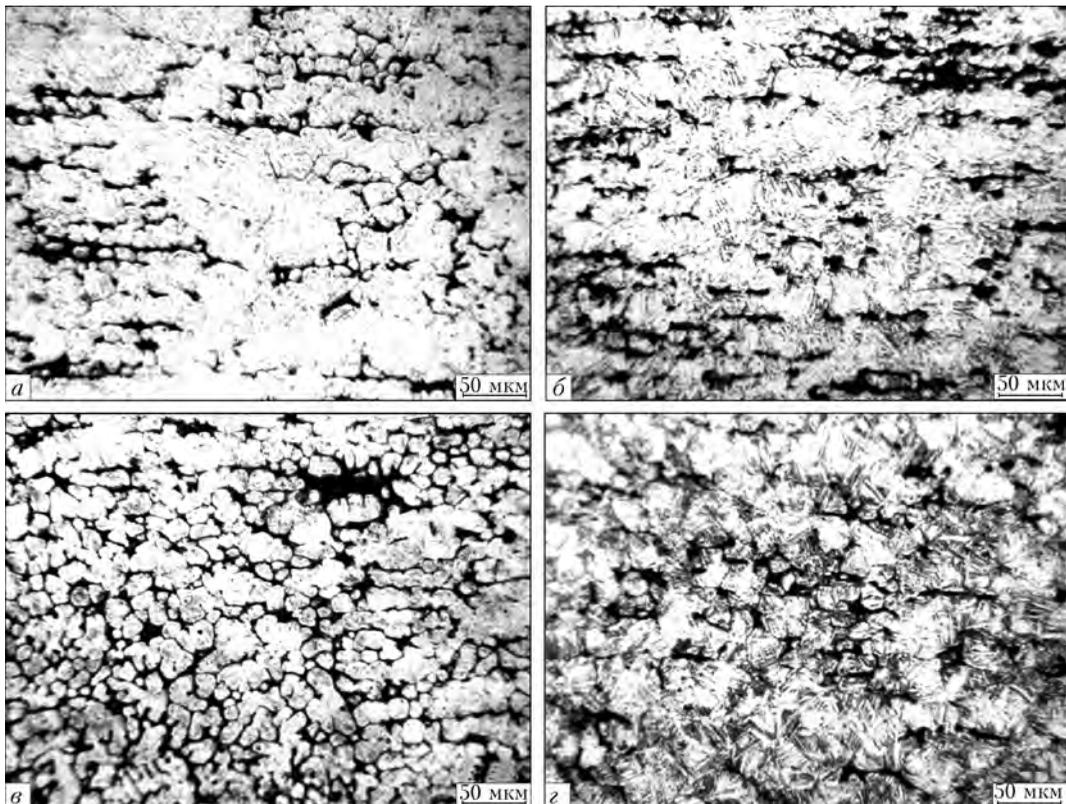


Рис. 3. Микроструктура металла ЗТВ в околошовном участке α -сплавов Ti-3,4Si (а); Ti-3,4Zr-2,2Si (б); Ti-1,4Al-2,9Sn-6Zr-3,4Si (в, в)

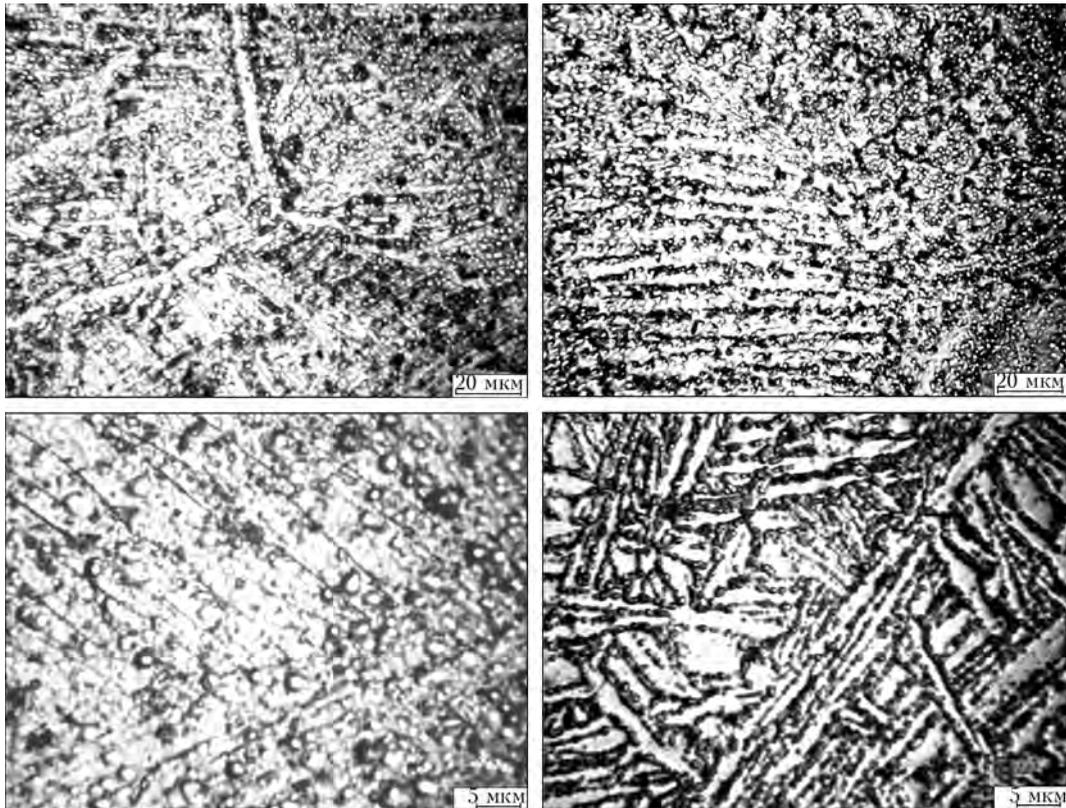


Рис. 4. Микроструктура ОМ сплавов Ti-5, 6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1V-0,6Si (a, б, г); Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-0,6Si (б)

части шва обнаружены вытянутые небольшие зерна, которые росли от зоны сплавления перпендикулярно оси шва (рис. 2, б). Отжиг сварных соединений при 800 °С в течение 1 ч приводит к обра-

зованию более четко выраженной пластинчатой структуры металла шва для трех сплавов (рис. 2, г).

В металле ЗТВ происходит перераспределение и коагуляция силицидов, зависящие от температуры, до которой нагревался участок ЗТВ в ходе свар-

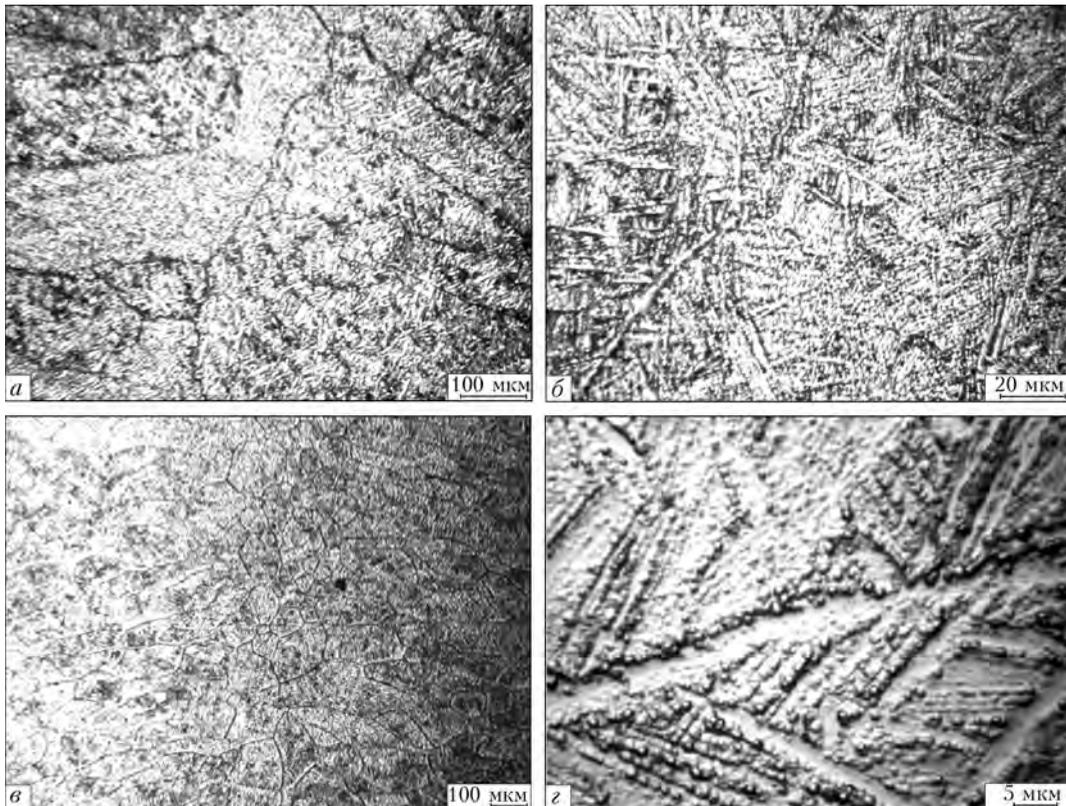


Рис. 5. Микроструктура металла шва сплава Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1V-0,6Si (a, б); Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-0,6Si (в, г)

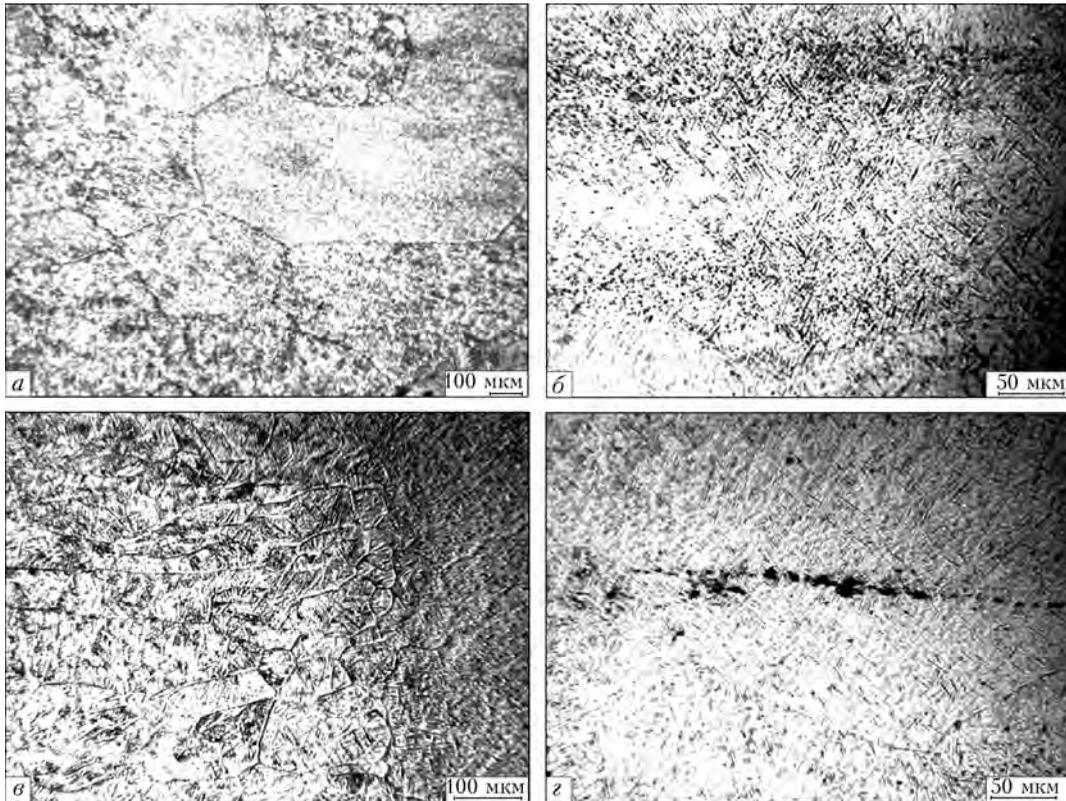


Рис. 6. Микроструктура ЗТВ сплавов Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1V-0,6Si (а, б); Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-0,6Si (в, г)

ки. При нагреве до температур ниже $T_{п.п}$ по мере удаления от ОМ плотность дисперсных точечных выделений силицидов уменьшается, в то время как размер образующих строчки частиц увеличивается, по сравнению с таковыми в ОМ.

В случае нагрева металла до температур, превышающих $T_{п.п}$, дисперсные точечные выделения силицидов в объеме зерен минимальны и располагаются в основном в виде строчек, вытянутых в направлении, совпадающем с направлением прокатки основного металла. В металле околшовного участка ЗТВ отмечено образование групп мелких равноосных зерен размером 0,02... 0,03 мм (рис. 3).

По мере приближения к шву происходит увеличение степени измельчения зерна, в отличие от сварных соединений большинства титановых сплавов, где максимальный размер зерна в металле ЗТВ зафиксирован вблизи зоны сплавления [4].

Из трех сплавов наименьшая степень измельчения зерна обнаружена в сплаве Ti-3,4Zr-2,2Si (рис. 3, в), наибольшая – в сплаве Ti-1,4Al-2,9Sn-6Zr-3,4Si (рис. 3, б). При остывании металла ЗТВ, нагретого до температур β -области, при температуре ниже $T_{п.п}$ происходит $\beta \rightarrow \alpha'$ -превращение с образованием игольчатой α' -фазы, как и в шве. После отжига сварных соединений в металле ЗТВ, аналогично металлу шва, более четко выражается пластинчатая структура (рис. 3, г).

Таким образом, силициды кремния, содержащиеся в этих сплавах, способствуют измельчению зерна в металле шва, особенно в ЗТВ, блокируя гра-

ницы растущих зерен силицидами и проявляя модифицирующий эффект.

Сплавы Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1V,0,6Si (№ 4), Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-0,6Si (5) относятся к группе псевдо α -сплавов титана.

Коэффициент стабилизации β -фазы k_{β} для сплава № 4 составляет 0,1, для сплава № 5 – 0,07. Сплав Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1V,0-6Si отличается от сплава Ti-1100 наличием небольшой добавки ванадия (0,95 мас. %), сплав Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-0,6Si от сплава IMI-834 – массовыми долями алюминия на 0,28 и молибдена на 0,12 % ниже минимальных значений, а также наличием ванадия (0,61 %).

В состоянии после проката сплавы № 4 и 5 имеют пластинчатую структуру, в которой частицы силицидов размещены довольно равномерно в границах первичных β -зерен (рис. 4, а-в). После отжига дисперсные частицы силицидов расположены в основном вдоль границ α -пластин (рис. 4, г).

Микроструктура металла шва сплава Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1V-0,6Si состоит из вытянутых в направлении теплоотвода первичных β -зерен с пластинчатой α' -фазой в объеме зерен. После сварки частицы силицидов хаотически локализуются как по границам β -зерен, так и в объеме зерен (рис. 5, а, б).

Сплав Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-0,6S также состоит из вытянутых в направлении теплоотвода первичных β -зерен с пластинчатой α' -фазой в объеме зерен. Однако в нем вдоль оси шва образуются равноосные зерна (рис. 5, в). После отжига этих псевдо α -сплавов титана частицы си-

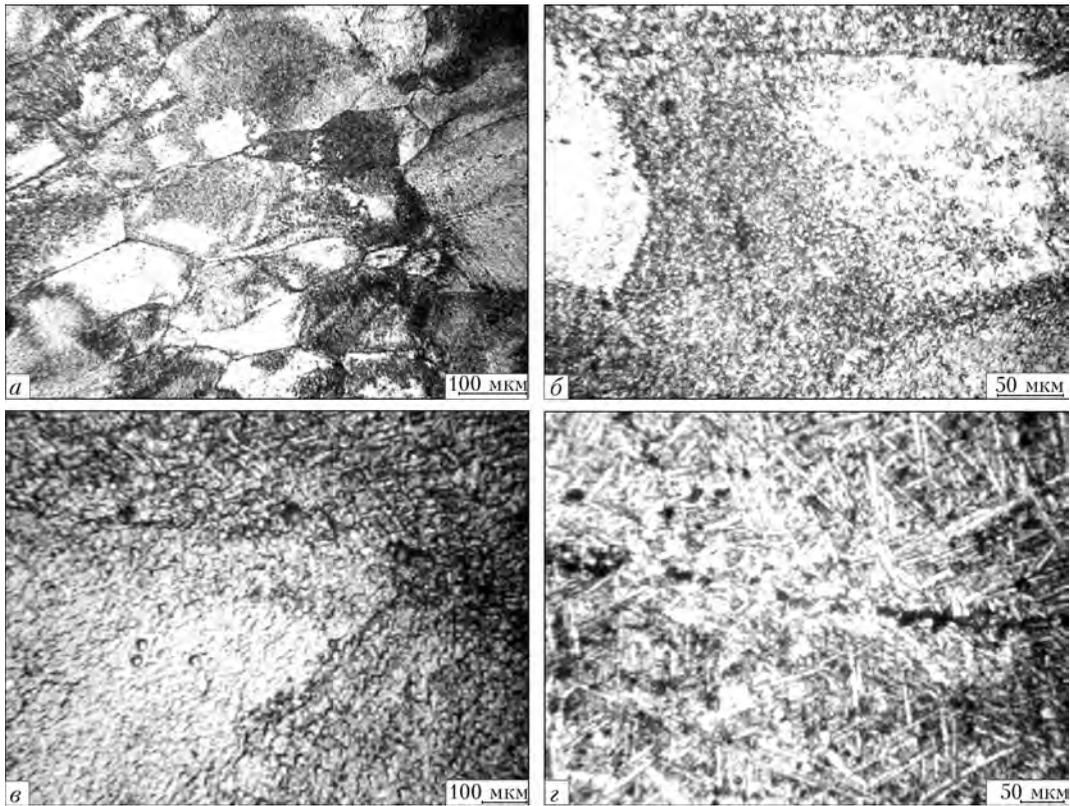


Рис. 7. Микроструктура опытного сплава Ti-4,3Al-4,4Sn-6Zr-1,6Mo-0,7V-4,3Nb-0,4Si (здесь и на рис. 8, 9 обозн. а-г см. в тексте)

лицидов локализуются в основном на границах α -пластин либо первичных β -зерен (рис. 5, г).

Микроструктуры металла ЗТВ сварных соединений опытных сплавов Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1V-0,6Si и Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-

-0,6Si не отличаются. В металле околосшовной зоны ЗТВ после нагрева до температур выше $T_{п.п}$ образуются большие равноосные β -зерна (рис. 6, а).

При охлаждении до температур ниже $T_{п.п}$ в объеме первичных β -зерен, как и в металле шва,

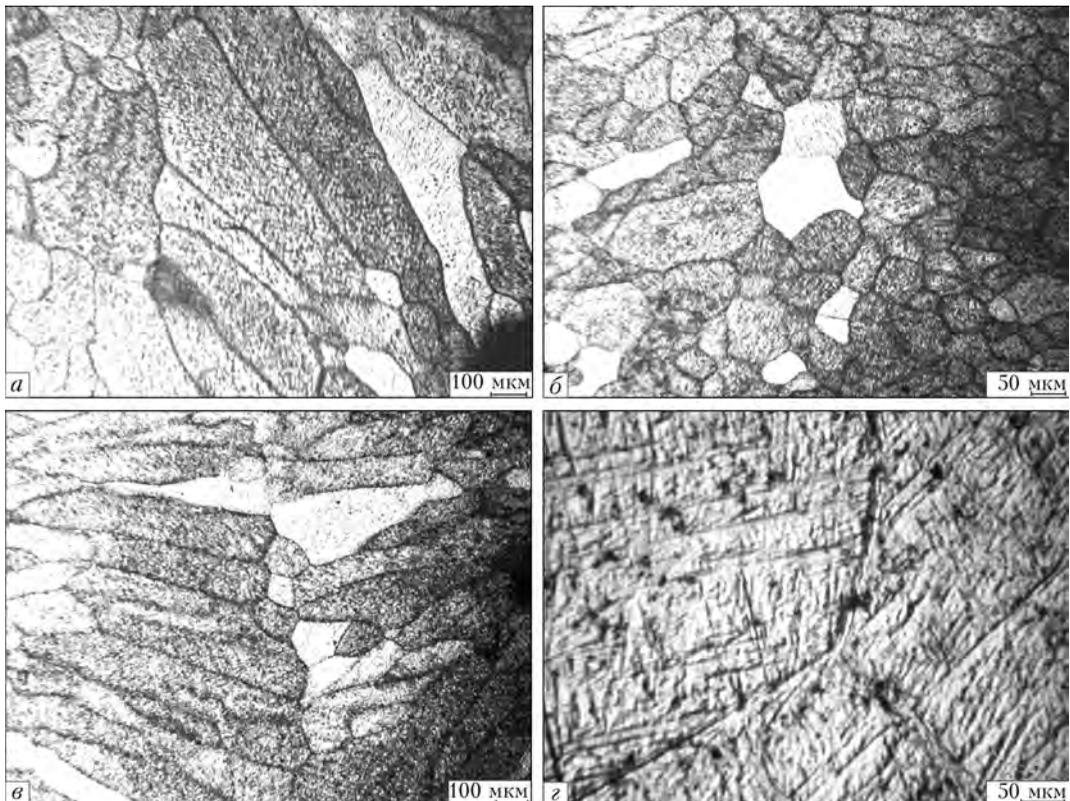


Рис. 8. Микроструктура металла шва сварного соединения сплава Ti-4,3Al-4,4Sn-6Zr-1,6Mo-0,7V-4,3Nb-0,4Si

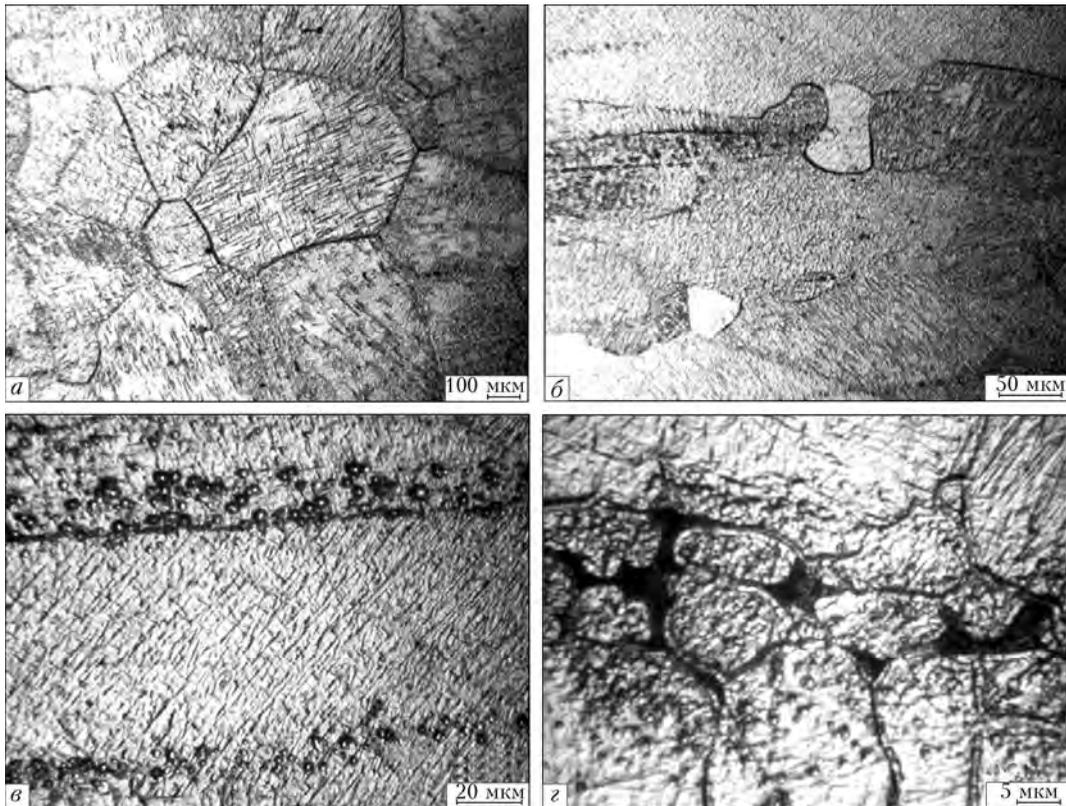


Рис. 9. Микроструктура ЗТВ сварного соединения сплава Ti-4,3Al-4,4Sn-6Zr-1,6Mo-0,7V-4,3Nb-0,4Si

происходит $\beta \rightarrow \alpha'$ -превращение с образованием пластинчатой α' -фазы, которая по своим свойствам подобна α -фазе. В участке металла ЗТВ, который нагревался до температур ниже $T_{\text{п.п}}$, тоже обнаружена пластинчатая α' -фаза. В ЗТВ видны полосы точечных выделений силицидов, вытянутые в направлении проката металла перпендикулярно шву (рис. 6, б, г). После отжига силициды, как правило, декорируют границы α -пластин.

В этих псевдо α -сплавах титана размер и количество образовавшихся силицидов способствуют проявлению модифицирующего эффекта и сдерживанию роста β -зерен в металле шва и околошовной зоны, как зафиксировано в α -сплавах с большим количеством кремния. Однако в сплаве Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-0,6Si вдоль оси шва все же образуются небольшие равноосные β -зерна (рис. 6, в).

Сплав Ti-4,3Al-4,4Sn-6Zr-1,6Mo-0,7V-4,3Nb-0,4Si (№ 6) относится к титановым $\alpha+\beta$ -сплавам мартенситного типа, его k_{β} равен 0,31. Микроструктура сплава изображена на рис. 7. После проката происходит дробление и глобуляризация пластинчатой структуры (рис. 7, а-в), а после отжига снова формируется тонкая пластинчатая структура (рис. 7, г). В направлении вдоль проката отмечены строчечные выделения очень мелкодисперсных частиц силицидов [5] несмотря на то, что содержание кремния в этом сплаве находится в пределах его растворимости в α -фазе. Алюминий понижает и без того невысокую растворимость кремния в α -титане [6].

Металл сварного шва опытного сплава Ti-4,3Al-4,4Sn-6Zr-1,6Mo-0,7V-4,3Nb-0,4Si состоит из первичных β -зерен разной формы. В верхней части шва формируются наиболее крупные зерна, вытянутые в направлении теплоотвода под углом 45...60° к оси шва (рис. 8, а). В средней части практически на всю ширину шва формируются равноосные полиэдрические зерна, значительно мельче, чем в верхней части шва (рис. 8, б). Ближе к корню шва вытянутые зерна срastaются под углом примерно 180° (рис. 8, в). На форму и размер первичных β -зерен значительно влияет режим сварки. В объеме первичных зерен фиксируется метастабильная мартенситная β' -фаза. На фоне игольчатой структуры заметны очень мелкодисперсные частицы силицидов, которые размещаются как на границах, так и в объеме зерна (рис. 8, г).

В металле ЗТВ сварного соединения сплава Ti-4,3Al-4,4Sn-6Zr-1,6Mo-0,7V-4,3Nb-0,4Si можно выделить три структурно отличных участка. Околошовная зона состоит из равноосных полиэдрических первичных β -зерен с игольчатой морфологией внутризеренной α' -фазы (рис. 9, а). Дальше от шва размещен участок ЗТВ, где произошла частичная рекристаллизация с образованием мелких равноосных зерен (рис. 9, б). Рядом с ОМ находится участок ЗТВ, который нагревался до температур, ниже чем $T_{\text{п.п}}$ и температуры рекристаллизации, и наследовал структуру ОМ. Во втором и третьем участках ЗТВ обнаружены полосы точечных образований силицидов (рис. 9, в).



Следует отметить, что именно такие полосы являются местом образования мелких равноосных зерен. Подобные структуры отмечены в сплавах с высоким содержанием кремния. В некоторых локальных местах ЗТВ образованные мелкие равноосные зерна окружены эвтектикой (рис. 9, з).

Таким образом, несмотря на то, что в сплавах разных типов с отличающимся содержанием кремния образуется разное количество частиц силицидов различной формы и размеров, все же отмечаются сходные тенденции в формировании структуры сварных соединений при ЭЛС. В участках ЗТВ, где металл нагревался ниже температуры полиморфного превращения $T_{п.п}$, для всех сплавов обнаружены строчечные скопления частиц силицидов, ориентированные вдоль проката. В участках ЗТВ, где металл нагревался выше $T_{п.п}$, можно зафиксировать измельчение зерна не только в α -сплавах с высоким, но и в $\alpha+\beta$ -сплаве с низким содержанием кремния. В металле шва также можно обнаружить измельчение зерна как для α -сплавов с высоким содержанием кремния, так и для псевдо α -, $\alpha+\beta$ -сплавов с низким содержанием кремния. Таким образом, си-

лициды кремния, содержащиеся в этих сплавах, способствуют измельчению зерна в металле шва и ЗТВ, блокируя границы растущих зерен и проявляя модифицирующий эффект.

1. *Structure and mechanical properties of Ti-Si-X in-situ composites* / S. Firstov, M. Kuzmenko, O. Koval, O. Vasylyev // Intern. conf. «Science for Materials in the Frontier of Centuries: Advantages and Challenges» (Kyiv, Ukraine, 2002). — Kyiv, 2002. — P. 623–624.
2. *Аношкин Н. Ф., Сигалов Ю. М.* Титановые сплавы с повышенной жаропрочностью // Технология легких сплавов. — 2002. — № 1. — С. 38–50.
3. *Singh A. K., Ramachandra C.* Characterization of silicides in high-temperature titanium alloys // J. of materials science. — 1997. — № 32. — P. 229–234.
4. *Грабин В. Ф.* Основы металловедения и термической обработки сварных соединений из титановых сплавов. — Киев: Наук. думка, 1975. — 264 с.
5. *Исследование структуры и механических свойств сплава Ti-7,2Al-2,9Mo-2,7W-3Nb-2,3Zr-0,4Si* / С. А. Фирстов, В. Н. Замков, Н. П. Бродниковский и др. // Общие вопросы металлургии. — 2006. — № 2. — С. 33–38.
6. *Корнилов И. И., Будберг П. Б.* Диаграммы состояния двойных и тройных систем. — М.: ВИНТИ, 1961. — С. 78–81.

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

Поступила 05.07.2011

НОВАЯ КНИГА

Welding and Allied Processes.

A series of books and monographs on welding, cutting, surfacing, brazing, coating deposition and other processes of metal treatment.

Edited by Prof. B.E. Paton, E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

Electron Beam Melting of Titanium, Zirconium and Their Alloys

B.E. Paton, M.P. Trygub and S.V. Akhonin

The book considers peculiarities of metallurgical production of titanium and zirconium ingots by the electron beam melting method. Mechanisms and patterns of behaviour of impurities, non-metallic inclusions and alloying elements during the process of electron beam melting of titanium and zirconium are detailed. Optimal technological parameters for melting of high-reactivity metals are suggested, providing high quality, technical and economic indices of this metallurgical process. Quality characteristics of the resulting ingots, including their chemical composition, micro- and macrostructure, as well as some mechanical properties of metal in the cast and wrought states, are given. Flow diagrams of melting and glazing of surfaces of the ingot are presented, and specific features of designs of electron beam units are described.

The book is meant for scientists, engineers and technicians, as well as for students of metallurgical departments of institutes of higher education.

*Заказы на книгу (216 стр., формат 165×240 мм, твердый переплет)
просьба направлять в редакцию журнала*

