

СТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СВАРИВАЕМОСТЬ ПСЕВДО- α - И ($\alpha + \beta$)-Ti СПЛАВОВ, УПРОЧНЕННЫХ СИЛИЦИДАМИ

Г. М. Григоренко, О. М. Задорожнюк

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
03680, Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Работа посвящена анализу влияния химического и фазового состава, особенностей структуры, размеров и распределения дисперсных частиц сложных силицидов титана на механические свойства опытных высокопрочных титановых сплавов с разной системой легирования. Определено, что дисперсионноупрочненные титановые сплавы после термомеханической обработки (прокатки) хорошо свариваются всеми наиболее распространенными способами, а сварные соединения имеют удовлетворительную структуру и механические характеристики. По результатам проведенных исследований установлено, что оптимальным комплексом механических свойств обладает электронно-лучевое сварное соединение титанового сплава с псевдо- α -структурой (Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-0,6Si) с равномерным распределением дисперсных упрочняющих частиц алюмосилицидов титана. Библиогр. 6, табл. 3, ил. 6.

Ключевые слова: титановые сплавы; дисперсионное упрочнение; силициды титана; структура; фазовый состав; наночастицы; механические свойства; сварные соединения

Титановые сплавы получили широкое применение во многих отраслях народного хозяйства. В аэрокосмической технике они используются для таких деталей и конструкций, как обшивка, шасси, детали для крепления, элементы крыла и другие.

Наряду с интенсивностью использования титановых сплавов в конструкциях ответственного назначения растут и требования к их прочности. Одним из путей повышения прочности является дисперсионное упрочнение, которое заключается в выделении дисперсных частиц из пересыщенного твердого раствора во время выплавки и термообработки. Эти частицы являются эффективными барьерами для скользящих в матрице дислокаций [1, 2]. Поэтому получение высоколегированных титановых сплавов, упрочненных частицами интерметаллидов, является перспективным. Наряду с интерметаллидами также известно упрочнение силицидами. Использование кремния в качестве легирующего элемента существенно повышает прочность, жаропрочность и жаростойкость тита-

новых сплавов [3, 4]. С учетом вышеперечисленного, работа, в которой рассматриваются структурные особенности таких сплавов и их связь с механическими свойствами и свариваемость, является актуальной.

Целью данной работы является изучение закономерностей влияния дисперсионного упрочнения силицидами титана на структуру, фазовый состав, свариваемость и механические свойства титановых сплавов.

Опытные сплавы выплавляли в электронно-лучевой литейной установке с медным водоохлаждаемым секционным кристаллизатором с электромагнитным перемешиванием расплава [5]. Этот способ позволяет гомогенизировать расплав и получать однородные по химическому составу слитки. Прокатку слитков диаметром 70 мм на полосы толщиной 10 мм выполняли на реверсивном двухвалковом стане. Химический состав опытных сплавов приведен в табл. 1.

№ сплава	Класс сплава	Al	Sn	Zr	Nb	Mo	V	Si
1	α	–	–	–	–	–	–	3,38
2	α	–	–	3,14	–	–	–	2,23
3	α	1,40	2,82	5,95	–	–	–	3,37
4	псевдо- α	5,64	2,20	3,53	–	0,43	0,95	0,56
5	псевдо- α	5,22	3,33	4,24	0,77	0,13	0,61	0,57
6	($\alpha + \beta$)	4,29	4,39	5,95	4,26	1,57	0,68	0,35

Таблица 2. Механические свойства опытных сплавов после прокатки

№ сплава	Класс сплава	σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ , %	KCV, Дж/см ²
1	α	745,3	—	0,1	2,33
2	α	997,6	—	0,3	2,51
3	α	721,3	—	1,1	3,27
4	псевдо- α	1209,8	1106,6	1,7	8,91
5	псевдо- α	1273,6	1130,8	4,0	10,36
6	($\alpha + \beta$)	1422,4	1331,3	1,0	4,15

Исследование микроструктуры опытных образцов показало, что использование данной технологии выплавки сплавов позволило получить в слитках равномерное распределение упрочняющих дисперсных частиц. Размер таких частиц в некоторых сплавах достигает наноразмеров (≤ 100 нм).

Сравнение результатов механических испытаний и фрактографических исследований изломов показало, что наличие дисперсных частиц, расположенных по телу зерен, способствует повышению характеристик вязкости и пластичности. Определено, что в случае наиболее равномерного распределения частиц наблюдается увеличение

предела прочности и предела текучести (табл. 2) (сплавы № 5 и № 6).

На рис. 1 приведены результаты энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) обнаруженных включений. Предположительный состав частиц, который был получен расчетным методом по стехиометрии — $(Ti, Zr)_5(Al, Si)_3$.

Возможности Оже-спектроскопии позволили определить точный химический состав на поверхности (глубина анализа 3 нм) включения размером ~ 100 нм (рис. 2, а, б).

Сравнение результатов ЭДС и Оже-спектроскопии показало, что включения, несмотря на наноразмеры, имеют неоднородный химический

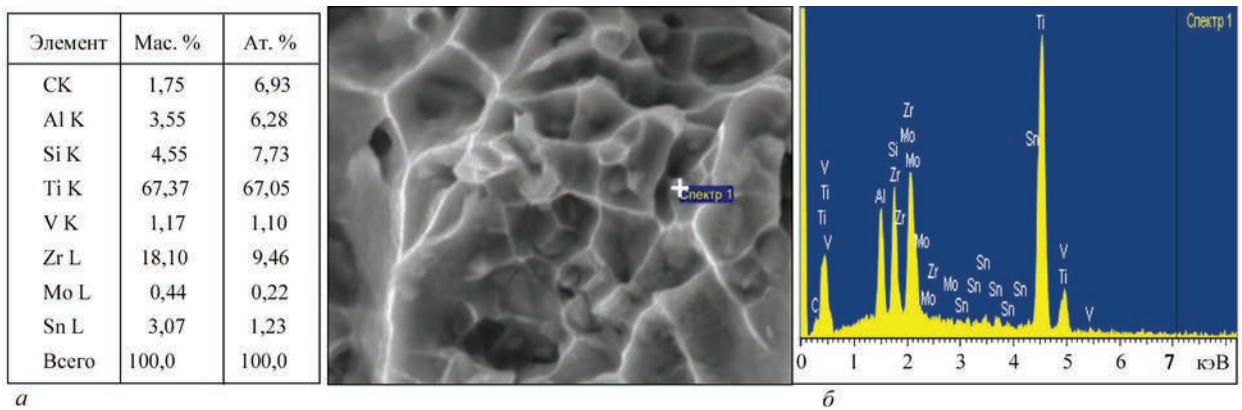


Рис. 1. Результаты ЭДС включения: количественные результаты и изображение на СЭМ, $\times 10000$ (а); характеристический спектр включения (б)

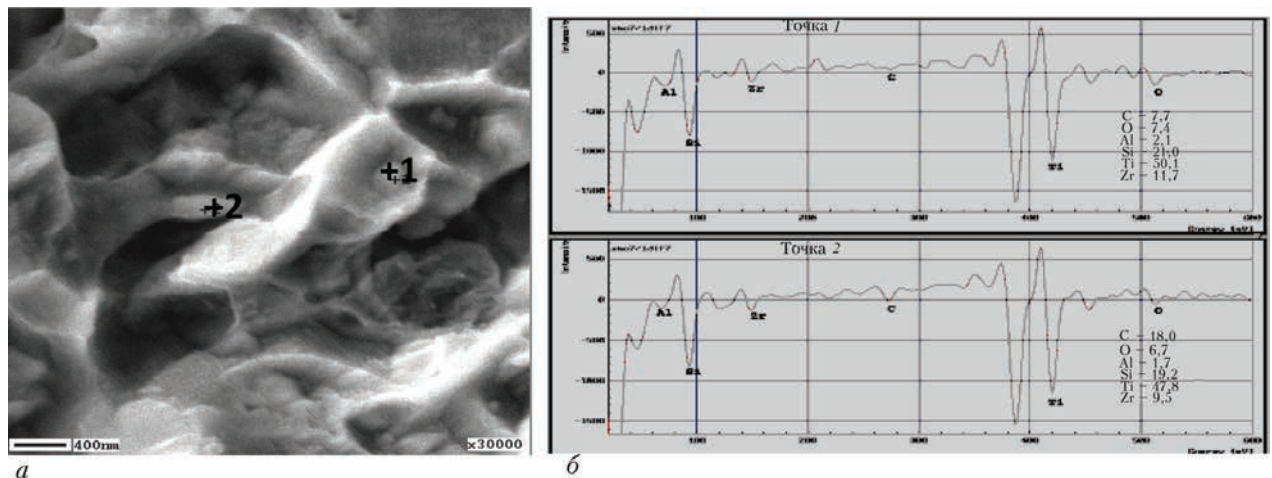


Рис. 2. Результаты Оже-спектроскопии наночастиц: а — изображение, полученное на СЭМ; б — Оже-спектр, ат. % (что соответствует мас. %: точка 1 — 2,1 С; 2,7 О; 1,3 Al; 13 Si; 55,6 Ti; 24,6 Zr; точка 2 — 4,6 С; 2,3 О; 1,2 Al; 13,3 Si; 56,9 Ti; 21,7 Zr)

состав и представляют собой сложное химическое соединение титана, циркония, алюминия и кремния. На поверхности частиц содержание кремния значительно больше, чем в средней части, и почти нет алюминия. Можно предположить, что дисперсные частицы представляют собой алюмосилицид титана, легированного цирконием типа $(\text{Ti}, \text{Zr})_5(\text{Al}, \text{Si})_3$ с силицидной оболочкой типа Ti_3Si . Схематическое изображение структуры поперечного сечения наночастиц и их образование приведено на рис. 3.

Описание особенностей структуры, фазового состава, распределения дисперсных включений и наночастиц алюмосилицидов, а также фрактографические исследования основного металла опытных сплавов подробно описаны и проанализированы в работе [6].

Одной из важнейших характеристик технологичности сплавов является их свариваемость – это свойство материалов образовывать качественные неразъемные соединения, приближающиеся по своим физико-механическим показателям к основному металлу и позволяющие создавать конструкции ответственного назначения, удовлетворяющие предъявляемым требованиям. Основными применяемыми в промышленности способами сварки титановых сплавов являются: электронно-лучевая сварка (ЭЛС), аргонодуговая сварка (АДС) с нерасходуемым электродом и сварка давлением. В первых двух случаях основной металл претерпевает расплавление и поэтому металл шва значительно отличается по структуре от основного. В случае сварки давлением соединение происходит в твердом подогретом состоянии, что позволяет сохранить физико-химические показатели близкие к основному металлу.

Проведенные исследования основного металла показали, что с точки зрения оптимизации свойств следует использовать сплавы с псевдо- α -структурой (№ 4, № 5) и $(\alpha+\beta)$ -структурой (№ 6), так как они имеют наиболее благоприятный комплекс механических свойств. Поэтому целесообразно исследовать их свариваемость.

Электронно-лучевой и прессовой сварке подвергали псевдо- α - и $(\alpha+\beta)$ -титановые сплавы с содержанием кремния 0,35...0,57 мас. %. Сварке дугой в среде аргона подвергали двухфазный сплав с наименьшим количеством кремния. Результаты исследований данных сварных соединений подробно изложены в работе [6].

В табл. 3 приведены основные результаты металлографических и фрактографических исследований основного металла и сварных соединений опытных сплавов.

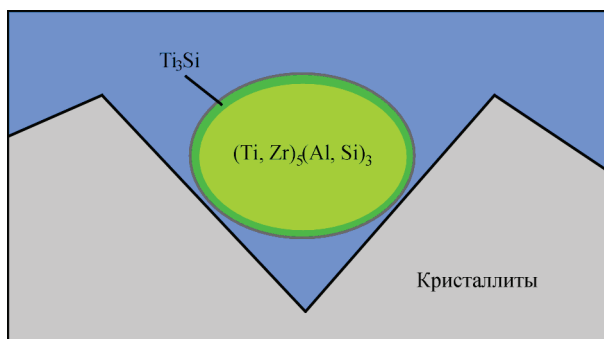


Рис. 3. Процесс образования наночастиц и их схематическая структура по сечению

Режимы сварки и термической обработки (ТО) сварных швов следующие:

ЭЛС — $U_{\text{св}} = 60$ кВ, $I_{\text{св}} = 80$ мА, $v_{\text{св}} = 7$ мм/с, локальная термообработка (ЛТО) — нагрев до 750 °С в течение 10 мин;

прессовая сварка — нагрев до 800 °С, прогрев в течение 5 мин, сжатие давлением $200\text{...}230$ МПа в течение 20 мин, ТО (сплав № 5) — закалка в воду от 1000 °С (1 ч) и старение при 600 °С (4 ч), ТО (сплав № 6) — закалка в воду от 950 °С (1 ч) и старение при 600 °С (6 ч);

АДС — $I_{\text{св}} = 350$ А, $v_{\text{св}} = 10$ м/ч, $U_{\text{св}} = 12$ В, ТО — нагрев в печи до 1000 °С в течение 1 ч, охлаждение с печью до 600 °С, выдержка 1 ч, охлаждение с печью до комнатной температуры.

Обнаруженные дисперсные упрочняющие частицы имеют однотипный химический состав и стехиометрию (алюмосилициды титана) как в основном металле всех опытных сплавов, так и во всех сварных соединениях, которые были выполнены в рамках данного исследования. Исключением является лишь сварной шов $(\alpha+\beta)$ -Ti сплава № 6 после АДС, в котором все частицы почти растворились и не идентифицировались. Только после ТО в данном сварном шве обнаружили алюмосилициды титана, которые увеличились в размерах до 50 нм и выше за счет температуры по дисперсионному механизму.

Размеры этих частиц варьируются в большом диапазоне для разных видов сварки. После ЭЛС средний размер частиц составляет порядка 180 нм для опытных псевдо- α -титановых сплавов № 4 и № 5 и порядка 80 нм для $(\alpha+\beta)$ -Ti сплава № 6. После прессовой сварки средний размер частиц псевдо- α -титанового сплава № 5 составил 150 нм, а $(\alpha+\beta)$ -Ti сплава № 6 — 60 нм. Это связано с тем, что при данном способе сварки самая низкая температура процесса. После АДС и ТО средний размер частиц $(\alpha+\beta)$ -Ti сплава № 6 составил 130 нм, что является наибольшим показателем для сплавов данного типа в сравнении с предыдущими способами сварки. Наглядно диаграмма соотно-

Таблица 3. Результаты исследований основного металла и сварных соединений свариваемых опытных дисперсионно-упрочненных сплавов

Титановые сплавы	Особенности структуры	
	основного металла	сварных соединений
№ 4: Ti-5,6Al-2,2Sn-3,5Zr-0,4Mo-1V-0,6Si (псевдо- α -Ti)	Крупные α -пластины с небольшим количеством β -фазы по границам. Большое количество частиц по границам зерен размером 150 нм. Участков хрупкого разрушения больше, чем вязкого. Микротрещины по границам зерен.	ЭЛС. Литая структура металла шва состоит из мартенситоподобной α' -фазы по границам пластинчатой α -фазы. Размер зерен 100...125 мкм. В шве большое количество частиц алюмосилицидов размером ~160 нм и их скопления 0,4×10 мкм. Множественные скольные участки. Глубокие вторичные межзеренные трещины. Локальное вязкое разрушение вокруг частиц.
№ 5: Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-0,6Si (псевдо- α -Ti)	Матрица состоит из более мелких α -пластин с небольшим количеством β -фазы по границам и включений, равномерно расположенных по всей поверхности размером 50...100 нм. Камневидный рельеф излома. Растрескивание хрупких структурных составляющих. Вязкие участки сформированы по ямочному механизму слияния пор с наночастицами.	ЭЛС. Литая структура металла шва состоит из α' -фазы и пластинчатой α -фазы, выделившейся по границам. Размер зерен ~100 мкм. Наиболее равномерное распределение алюмосилицидов размером ~190 нм. После ЛТО разница микротвердости в шве, ЗТВ и ОМ составляет 5...7 %. Разрушение по механизму внутризеренного скола с фрагментами ямочного характера разрушения. Прессовая сварка. Структура зоны соединения состоит из вытянутых зерен α -Ti. Ширина зоны 50 в центре и 150 мкм на периферии. Равномерное распределение алюмосилицидов размером 50...250 нм. После ТО зерна α -фазы округлились и возросло их количество. Через л.с. проросли общие зерна. Чистые границы зерен. Разрушение сколом: 10...15; вязкое 85...90 %.
№ 6: Ti-4,3Al-4,4Sn-6Zr-1,6Mo-0,7V-4,3Nb-0,3Si ((α + β)-Ti)	На фоне двухфазной структуры образуется α' -фаза игольчатого строения. Большое количество алюмосилицидов размером 80...160 нм. Кристаллографический характер разрушения по плоскостям скола. Единичные локальные участки вязкого разрушения.	ЭЛС. Микроструктура шва состоит из β -зерен, в объеме которых расположена α' -фаза мартенситного типа. Частицы расположены как по телу зерен, так и по границам. Размер частиц 70...110 нм; длина их скоплений 3...10 мкм. Разрушение интеркристаллитное сколом. Вторичные трещины по границам зерен. В некоторых зернах развилась пластическая деформация. Прессовая сварка. Общие зерна по линии контакта. В ЗС зерна меньше, чем в ОМ (ширина ЗК ~ 130 мкм. По границам большие скопления частиц размером 30...90 нм. После ТО обнаружены общие зерна, структура однородная. Скопления по границам уменьшились. Разрушение смешанное с межзеренными трещинами. Единичные участки вязкого разрушения с наночастицами. АДС. Микроструктура состоит из крупных вытянутых зерен по нормали к линии сплавления. В шве частицы почти растворяются. В ЗТВ и ОМ частицы присутствуют в большом количестве. Размер частиц в ЗТВ 50 нм, 1 мкм. После ТО в шве обнаружены исходные алюмосилициды размером ~ 130 нм. Излом шва без ТО хрупкий. После ТО на изломе видны межзеренные трещины и ямки с частицами.

шения размеров алюмосилицидов титана с типом структуры и видом сварки представлена на рис. 4.

Чтобы определить оптимальное сочетание структуры и фазового состава для повышения механических свойств свариваемых титановых сплавов проанализированы полученные значения пределов прочности и текучести сварных соединений в сравнении с показателями основного металла.

Среднее значение предела прочности для сварных соединений псевдо- α -титановых сплавов после ЭЛС составило 1100 МПа, а после прессовой сварки — 1250 МПа, в то время как среднее значение предела прочности для основного ме-

талла этих сплавов составило 1240 МПа. Такое завышенное значение предела прочности после прессовой сварки объясняется тем, что не удалось провести механические испытания образцов после сварки и испытывали образцы-свидетели после упрочняющей термической обработки. Таким образом, наилучшие показатели прочности имеют сварные соединения псевдо- α -титановых сплавов, выполненные ЭЛС, так как их предел прочности составляет 90 % от показателя основного металла.

Для сплава № 6 с (α + β)-структурой предел прочности после ЭЛС составил 1290 ± 10 МПа, после прессовой сварки и ТО — 1345 ± 10 МПа, а

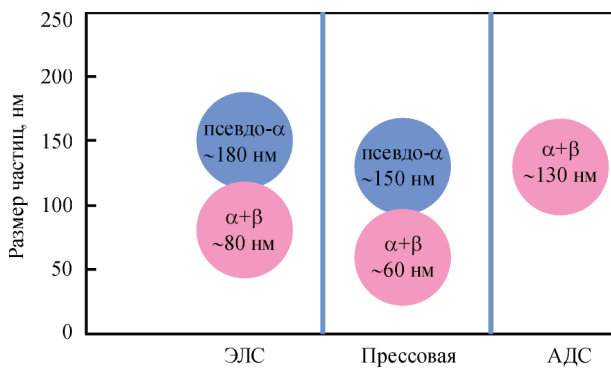


Рис. 4. Взаимосвязь размеров частиц с типом структуры и видом сварки

после АДС около 560 МПа, что нельзя считать достоверным, так как предел прочности основного металла данного сплава составляет 1422 МПа. При испытаниях на сжатие предел прочности основного металла составил порядка 1850 МПа, а предел прочности сварного соединения — 1440 ± 10 МПа. Таким образом, самым оптимальным значением предела прочности обладает сплав № 6 после ЭЛС и он составляет 90 % от показателя основного металла. То есть самым высоким и, соответственно, самым близким к показателю прочности основного металла обладает электронно-лучевое сварное соединение титанового сплава № 6 с $(\alpha + \beta)$ -структурой. Диаграмма соотношения этих показателей с показателями основного металла представлена на рис. 5.

Среднее значение предела текучести для сварных соединений с псевдо- α -структурой после ЭЛС составляет 1030 МПа, а после прессовой сварки и ТО образцов-свидетелей — 1190 МПа, в то время как среднее значение предела текучести для основного металла этих сплавов — 1120 МПа. Значение предела текучести после прессовой сварки завышенное и превышает значение для основного металла по причине, описанной выше. Таким образом, наилучшие показатели текучести имеют сварные соединения псевдо- α -титановых сплавов, выполненные ЭЛС и их предел текучести составляет ~90 % от показателей основного металла.

Для сплава № 6 с $(\alpha + \beta)$ -структурой предел текучести после ЭЛС составил в среднем 1180 МПа, после прессовой сварки и ТО — 1140 МПа, а после АДС — <1 МПа по причине высокой хрупкости данного сварного соединения. Предел текучести при растяжении основного металла данного сплава составил 1330 ± 10 МПа. При испытании на сжатие предел текучести основного металла — ~1220 МПа, а предел текучести сварного соединения — ~1320 МПа. Таким образом, самым оптимальным пределом текучести обладает сплав после ЭЛС, который составляет 90 % от показате-

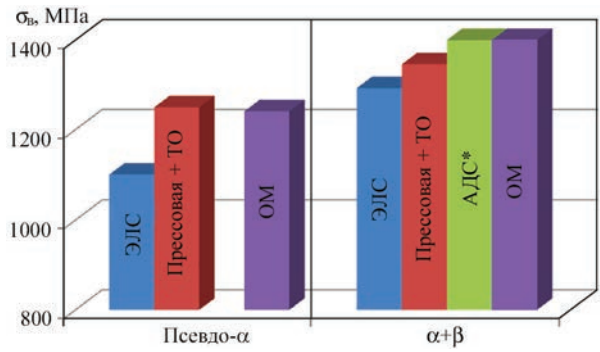


Рис. 5. Соотношение предела прочности для псевдо- α - и $(\alpha + \beta)$ -титановых сплавов после разных видов сварки: * — при испытании на сжатие

ля основного металла. То есть самым близким к показателю прочности основного металла и, соответственно, самым высоким пределом текучести обладают сварные соединения титановых сплавов с псевдо- α -структурой. Это подтверждается тем, что у сплавов с такой структурой (№ 4 и № 5) самые высокие показатели пластичности и ударной вязкости [1–5]. Диаграмма соотношения предела текучести со структурой и видом сварки представлена на рис. 6.

Подводя итоги можно сказать, что самым высоким комплексом механических свойств обладают сварные соединения, выполненные ЭЛС. При этом предел прочности электронно-лучевых сварных соединений самый высокий у сплава с $(\alpha + \beta)$ -структурой (№ 6), а вязкость и пластичность самые оптимальные у электронно-лучевых сварных соединений сплавов с псевдо- α -структурой (самые высокие показатели у сплава № 5).

Размер упрочняющих частиц алюмосилицидов титана меньше у сплава № 6, но они часто располагаются по границам зерен и объединяются в группы, что приводит к хрупкости данного сварного соединения. В сплаве № 5 они распределены более равномерно по поверхности и в объеме сварного соединения, что играет ключевую роль в

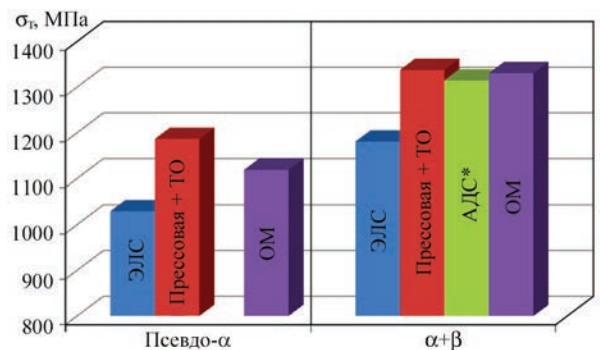


Рис. 6. Соотношение предела текучести для псевдо- α - и $(\alpha + \beta)$ -титановых сплавов после разных видов сварки: * — при испытании на сжатие

обеспечении более высоких пластических свойств без особых потерь прочности.

В результате проведенных исследований установлено, что дисперсионноупрочненные титановые сплавы после ТО (прокатки) хорошо свариваются всеми наиболее распространенными способами, а сварные соединения имеют удовлетворительную структуру и механические характеристики.

Наиболее высоким комплексом механических свойств обладает электронно-лучевое сварное соединение сплава № 5 (Ti-5,2Al-3,3Sn-4,2Zr-0,1Mo-0,6V-0,8Nb-0,6Si) с псевдо- α -структурой и равномерным распределением дисперсных упрочняющих частиц алюмосилицидов титана. В основном металле и металле шва размер дисперсных упрочняющих частиц в среднем составляет 50...190 нм.

The work is devoted to the analysis of effect of chemical and phase composition, structure peculiarities, sizes and distribution of dispersed particles of titanium silicides on mechanical properties of experimental titanium alloys with different system of alloying. It was determined that the dispersion-strengthened titanium alloys after thermomechanical treatment (rolling) are well welded by all the widely spread methods, and the welded joints have a good structure and mechanical characteristics. It was found from the results of carried out investigations, that the optimum complex of mechanical properties is typical to the electron beam welded joint with a pseudo- α structure (Ti-5.2Al-3.3Sn-4.2Zr-0.1Mo-0.6V-0.8Nb-0.6Si) with a uniform distribution of dispersed strengthening particles of titanium aluminosilicides. Ref. 6, Tables 3, Figures 6.

Key words: titanium alloys; dispersion strengthening; titanium silicides; structure; phase composition; nanoparticles; mechanical properties; welded joints

Поступила 12.05.2016

1. Трефилов В. И. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов / В. И. Трефилов, В. Ф. Моисеев, Э. П. Печковский [и др.]; под ред. В. И. Трефилова. — [2-е изд.]. — К.: Наук. думка, 1989. — 256 с.
2. Бочвар А. А. Повышение прочности или упрочнение материалов, 2012. — Режим доступа к журналу: do.gendocs.ru/docs/index-223261.html
3. Аношкин Н. Ф. Титановые сплавы с повышенной жаропрочностью / Н. Ф. Аношкин // Технология легких сплавов. — 2002. — № 1. — С. 38–50.
4. Фирстов С. А. Титановые «чугуны» и титановые «стали» / С. А. Фирстов, С. В. Ткаченко, Н. Н. Кузьменко // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2009. — № 1. — С. 14–20.
5. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве; [под ред. С. В. Ладохина]. — К.: Изд-во «Сталь», 2007. — 626 с.
6. Задорожнюк О. М. Структура, фазовый состав и свариваемость титановых сплавов с дисперсионным упрочнением: автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.02.01 «Материаловедение» / О. М. Задорожнюк. — Киев, 2015. — 22 с.

НОВАЯ КНИГА

НАПЛАВКА. МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

И.А. Рябцев, И.К. Сенченков, Э.В. Турык. — Gliwice, Wydawnictwo Politechnik Slaskiej, 2015. — 590 с.

Книга содержит следующие разделы

- Виды износа и повреждения деталей машин и механизмов.
- Классификация и характеристика основных методов наплавки.
- Методы расчета напряженно-деформированного и структурного состояния деталей в процессе наплавки и последующей эксплуатации в условиях изнашивания и циклических механических или термомеханических нагрузок.
- Долговечность наплавленных деталей, эксплуатирующихся при изнашивании и циклических механических нагрузках.
- Долговечность наплавленных деталей, эксплуатирующихся в условиях изнашивания и циклических термических и механических нагрузок.
- Нелегированные и низколегированные стали, применяемые для изготовления деталей машин, и их свариваемость.

- Структура и свойства наплавленного металла различных систем легирования.
- Методы регулирования структуры наплавленного металла.
- Электродуговая наплавка.
- Плазменная наплавка.
- Газовая наплавка.
- Индукционная наплавка.
- Лазерная наплавка.
- Электрошлаковая наплавка.
- Дефекты в наплавленном металле, их происхождение и меры борьбы с ними.
- Контроль качества и механическая обработка наплавленных деталей.
- Аттестация процедур наплавки.

С книгой можно ознакомиться в библиотеке ИЭС им. Е.О. Патона