



# ВЛИЯНИЕ СПОСОБА СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ НА СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА Ti-6Al-4V

**В. Н. ЗАМКОВ**, д-р техн. наук, **В. П. ПРИЛУЦКИЙ**, канд. техн. наук,  
**И. К. ПЕТРИЧЕНКО**, **Э. Л. ВРЖИЖЕВСКИЙ**, инженеры, **В. Ф. ТОПОЛЬСКИЙ**, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

С учетом особенностей термических циклов лазерной сварки сравниваются механические и коррозионные свойства соединений сплава Ti-6Al-4V, выполненных дуговой, электронно-лучевой и лазерной сваркой. Установлено, что склонность металла швов, полученных лазерной сваркой, к растрескиванию под напряжением в агрессивной среде на порядок выше, чем дуговой. Отжиг сварных соединений не уменьшает их чувствительность к возникновению трещин.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, электронно-лучевая сварка, лазерная сварка, титановые сплавы, механические свойства, коррозионная стойкость под напряжением

В последние годы зафиксирована устойчивая тенденция к расширению сферы применения лазерной сварки в авиа- и судостроении, автомобильной промышленности и др. [1–5]. Основными аргументами в пользу замены дуговых способов сварки лазерными является возможность резко увеличить производительность (скорость сварки), сократить (в ряде случаев полностью исключить) расход сварочных материалов, снизить трудоемкость подготовки кромок под сварку при выполнении швов на металле средней толщины, уменьшить деформации сварных (особенно листовых) конструкций. В то же время следует отметить, что количество публикаций, которые посвящены оценке свойств соединений, выполненных лазерной сваркой из различных конструкционных материалов, например из сплавов титана, весьма незначительное. Поскольку, однако, для лазерной сварки характерны чрезвычайно высокие температурные градиенты, скорости нагрева и охлаждения металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) [6–8], для ее успешного применения необходимы всесторонние исследования влияния жестких термических циклов, свойственных этому способу, на работоспособность сварных соединений.

Цель данной работы заключается в проведении сравнительных исследований механических свойств и склонности к коррозионному разрушению сварных соединений сплава Ti-6Al-4V, выполненных лазерным, электронно-лучевым и дуговым способами сварки вольфрамовым электродом по слою флюса [9].

Выбор в качестве объекта исследований сплава Ti-6Al-4V обусловлен тем, что он широко применяется в промышленном производстве сварных конструкций как в странах дальнего зарубежья (марка Grade 5), так и в СНГ (марка ВТ6), хорошо сваривается и детально изучен.

Химический состав и механические свойства образцов основного металла, используемого в работе (табл. 1, 2), свидетельствуют о том, что они полностью отвечают требованиям как ASTM, так и стандарта России на листовые полуфабрикаты из сплава Ti-6Al-4V.

Стыковые соединения (рис. 1) из пластин размерами 6×200×300 мм сваривали с применением CO<sub>2</sub>-лазера мощностью 5 кВт, установки для электронно-лучевой сварки УЛ144 (энергоблок ЭЛА 60/60) и промышленного оборудования для дуговой сварки титана вольфрамовым электродом. В последнем случае использовали флюс марки АНТ-25А. В качестве защитного газа при лазерной сварке применяли гелий, а при дуговой — аргон. Режимы сварки (табл. 3) во всех случаях обеспечивали выполнение швов за один проход без разделки кромок. Присадочную проволоку не применяли. Результаты химического и газового анализов (табл. 1) показали неизменность содержания легирующих элементов в металле швов (независимо от способа сварки) в отличие от основного металла. Зафиксировано также и незначительное отличие металла швов по содержанию примесей. Поэтому структуру и свойства сварных соединений при каждом способе сварки определяли исключительно особенностями источника нагрева и термического цикла.

Несмотря на то что погонная энергия при лазерной сварке была меньше, чем при электронно-луче-

**Таблица 1. Химический состав основного металла и металла швов**

Объект исследования	Массовая доля элементов, %						
	Al	V	Fe	C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
Основной металл	5,54	3,85	0,22	0,10	0,16	0,018	0,0035
Металл шва (дуговая сварка)	5,49	3,82	0,21	0,11	0,17	0,015	0,0042
То же (электронно-лучевая сварка)	5,61	3,86	0,23	0,10	0,16	0,015	0,0030
То же (лазерная сварка)	5,53	3,81	0,22	0,12	0,18	0,017	0,0064



Таблица 2. Механические свойства основного металла\*

Направление вырезки образцов	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Поперечное сужение, %	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>
Вдоль проката	1017	968	24	34
Поперек проката	1015	968	22	36

\* Здесь и в табл. 5 приведены средние значения результатов испытания пяти образцов.

Таблица 3. Сравнительные параметры термического воздействия на основной металл при исследованных способах сварки

Параметры	Способ сварки		
	лазерный	электронно-лучевой	дуговой
Погонная энергия, Дж/см	1350	4800	6000
Ширина ЗТВ, мм ( $t > t_{пл}$ )	3,1	8,0	16,5
Длительность пребывания металла при $t > t_{пл}$ , с	1,65	19	38
Скорость нагрева, °С/с:			
в околошовном участке	~20000	3000	700
на границе ( $\alpha + \beta$ )→ $\beta$ -перехода	2770	360	150
Скорость охлаждения, °С/с:			
в околошовном участке	1120	530	57
на границе ( $\alpha + \beta$ )→ $\beta$ -перехода	220	100	11

Примечание. Ширину ЗТВ определяли путем измерения, остальные данные рассчитаны в соответствии с работами [7–9].

Таблица 4. Режимы сварки и параметры швов

Способ сварки	Сварочный ток, А	Напряжение, кВ	Скорость сварки, м/ч	Ширина шва, мм		
				верх	середина	корень
Дуговой	210	0,011	9	8,2	6,5	5,7
Электронно-лучевой	$8 \cdot 10^{-5}$	60	25	5,8	3,8	2,5
Лазерный	—	—	75	4,5	1,5	0,8

Примечание. Лазерная сварка выполнялась на установке мощностью 4,5 кВт.

Таблица 5. Механические свойства сварных соединений

Способ сварки	Временное сопротивление, МПа	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>		Место разрушения
		шов	ЗТВ	
Дуговой	1019	27	35	По шву
Электронно-лучевой	1015	34	32	По шву и основному металлу
Лазерный	964	26	31	По шву и ЗТВ

вой и дуговой соответственно в 3,5 и 4,5 раза, а расчетные значения скоростей нагрева и мгновенных скоростей охлаждения металла в ЗТВ отличались на порядок (табл. 3), показатели прочности и ударной вязкости всех сварных соединений имели незначительные отличия и были близки к параметрам этих характеристик основного металла (табл. 2, 5). Следует лишь отметить пониженные значения прочности сварных соединений, выпол-

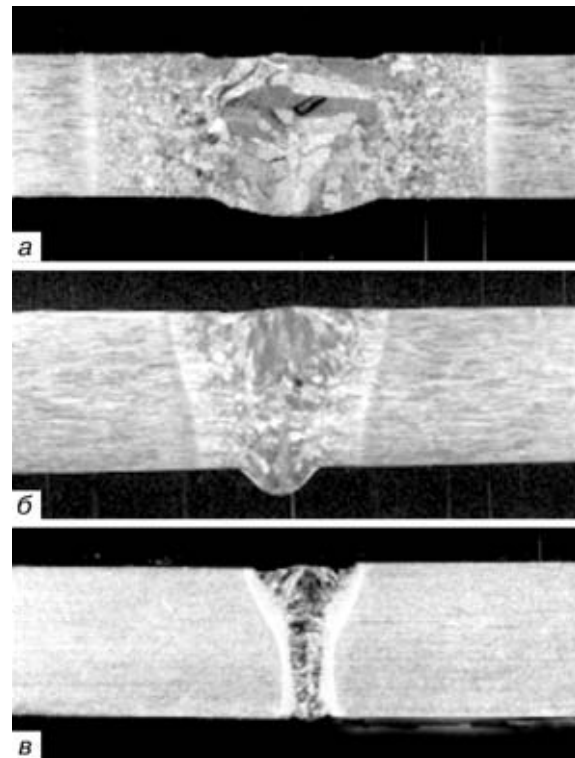


Рис. 1. Макроструктура сварных соединений: а — дуговая; б — электронно-лучевая; в — лазерная сварка

ненных лазерной сваркой. Это, вероятно, вызвано особенностями фазовых и структурных превращений в условиях высоких скоростей нагрева и охлаждения [10], свойственных этому способу.

Склонность сплава Ti-6Al-4V и его сварных соединений к коррозионному разрушению определяли по двум показателям: стойкости против сплошной коррозии в искусственной морской воде и стойкости против коррозионного растрескивания под напряжением в растворе  $\text{CH}_3\text{OH} + 0,4\% \text{HCl}$ . В обоих случаях испытания производили при комнатной температуре. Следует отметить, что содержание HCl в метаноле превышало его значение, предусмотренное ГОСТ 9.901.2-89 и ГОСТ 26294-84 для ускоренных испытаний сварных соединений титановых сплавов на коррозионное растрескивание.

Результаты испытаний на склонность к сплошной коррозии (табл. 6) подтвердили, что как сам сплав, так и его сварные соединения (независимо от способа сварки) отличаются высокой стойкостью в морской воде (согласно ГОСТ 13819-68) и имеют  $i_k$  одного порядка. В то же время зафиксировано некоторое различие в абсолютных значениях скорости коррозии в зависимости от способа сварки. Так,  $i_k$  металла изолированных зон сварных соединений, выполненных электронно-лучевым и лазерным способами (в отличие от дугового), и основного металла практически одинаковы (табл. 6). Скорости сплошной коррозии, которые определялись в этих же зонах, но в целых сварных соединениях, — значительно выше. При этом относительное увеличение значений  $i_k$  для соединений, сваренных электронно-лучевым и лазерным способами, больше, чем дуговыми. Увеличение абсолютных значений  $i_k$ , измеренных в целых сварных



**Таблица 6.** Скорости сплошной коррозии основного металла и металла сварных соединений в зависимости от способа сварки,  $i_k \cdot 10^{-3}$  мм/год

Объект исследования	Основной металл	Металл шва			Металл ЗТВ		
		дуговой	электронно-лучевой	лазерный	дуговой	электронно-лучевой	лазерный
Изолированные зоны сварного соединения*	1,9	2,5	2,1	1,8	2,7	2,3	2,0
Целое сварное соединение**	3,9	4,3	4,6	4,6	5,1	5,0	5,5

\* Металл шва, металл ЗТВ и основной металл вырезаны из сварного соединения. \*\* Испытывали стойкость зон целого сварного соединения с применением прижимной электрохимической ячейки.

соединениях, очевидно, обусловлено взаимным влиянием отдельных участков соединения друг на друга и связано прежде всего с уровнем локальности и характером остаточных напряжений в целом соединении. Поскольку локальность остаточных напряжений в сварных соединениях при электронно-лучевых и особенно лазерных способах выше, чем при дуговых, то в них и больше относительное увеличение  $i_k$ .

Результаты испытаний основного металла и металла сварных соединений на стойкость против коррозионного растрескивания под напряжением (табл. 7) еще раз подтвердили известные положения о причинах, определяющих чувствительность сплава Ti-6Al-4V к этому виду разрушения. Поскольку трещиностойкость титановых сплавов в агрессивной среде зависит от наличия, уровня и степени локализации внутренних напряжений в металле наряду с его структурным состоянием и химической гомогенностью [11, 12], то сварные соединения имеющие, как правило, остаточные напряжения и концентрационную неоднородность (при любом способе сварки), более склонны к растрескиванию [11, 13, 14]. В условиях растягивающих напря-

**Таблица 7.** Стойкость сплава Ti-6Al-4V и его сварных соединений против коррозионного растрескивания под напряжением

Объект исследования	Длительность испытаний, ч	
	Без отжига	Отжиг, 750 °С, 1 ч
Основной металл (исходное состояние)	165*, 1050, 1050	1050, 1050, 1050
Сварное соединение (дуговая сварка)	290*, 650, 670, 1320, 1320	1320, 1320, 1320
То же (электронно-лучевая сварка)	17*, 90*, 45*, 83*	114*, 135*, 65*, 120*
То же (лазерная сварка)	3*, 4*, 2*, 4*	12*, 17*, 14*

\* Образец растрескался в указанный период времени.

жений в агрессивной среде трещины в ( $\alpha + \beta$ )-титановых сплавах, и в частности в сплаве Ti-6Al-4V, возникают по границам зерен и фаз [13], а их распространение обусловлено образованием гидридов титана в вершине трещины за счет диффузии водорода [15].

При прочих равных условиях склонность к появлению трещины и скорость ее распространения

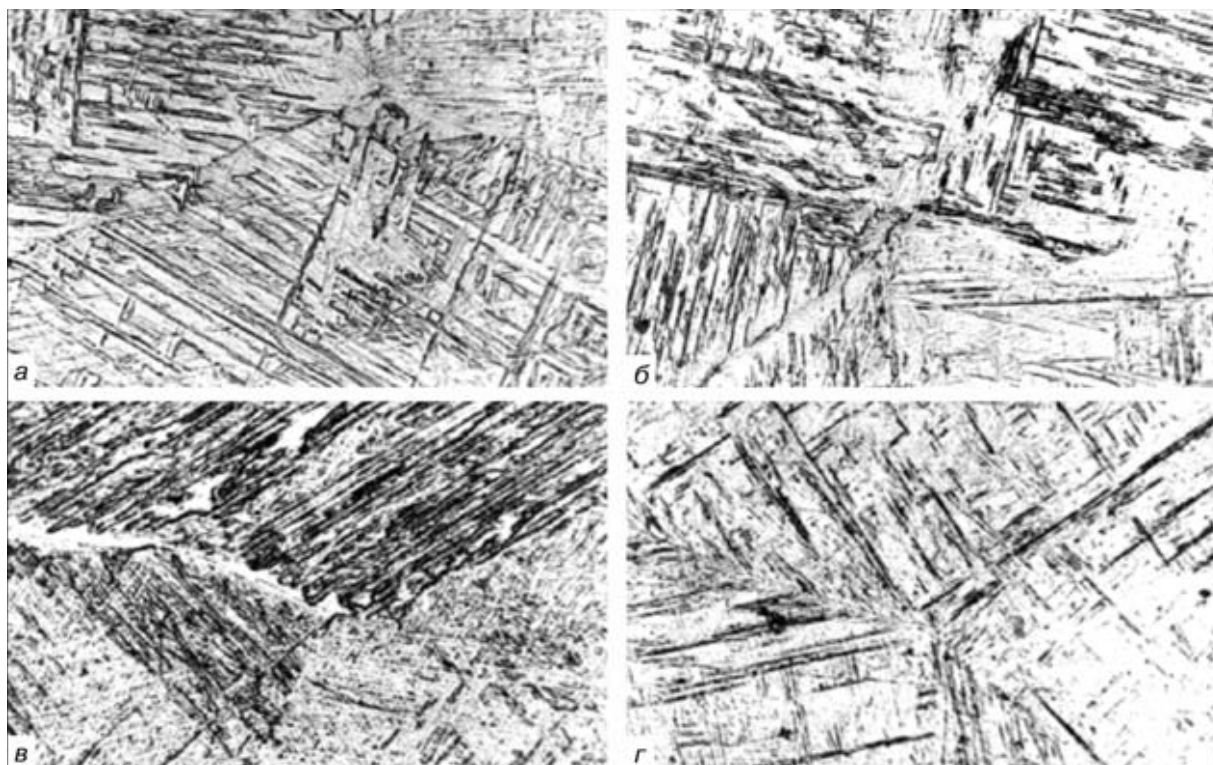


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 400$ , уменьш. 4/5) металла шва: а — дуговая; б — электронно-лучевая; в — то же (после отжига); г — лазерная сварка

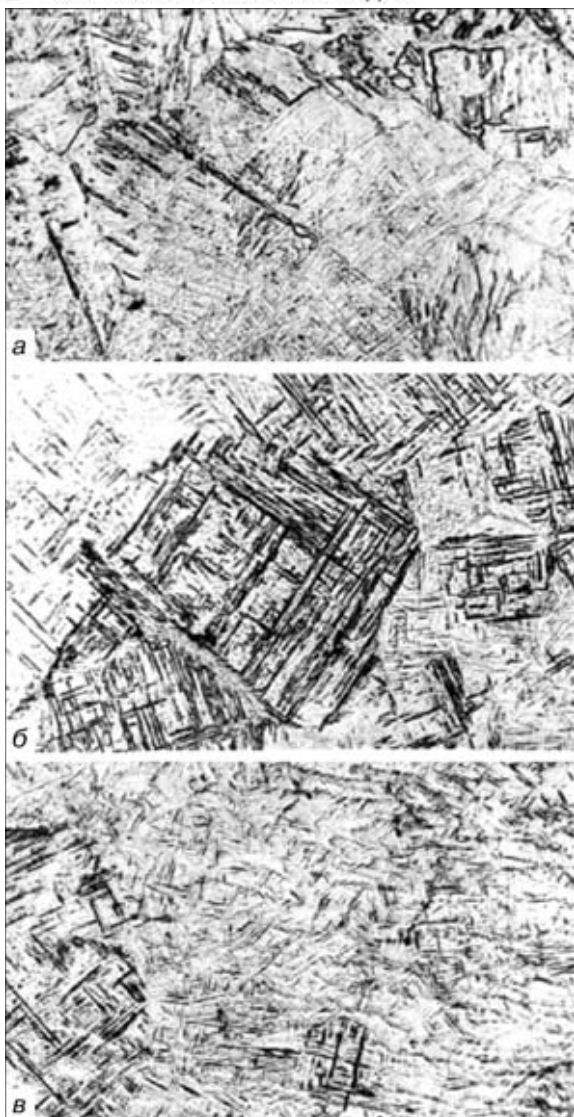


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 400$ , уменьш.  $4/5$ ) металла ЗТВ: *a* — дуговая; *b* — электронно-лучевая; *v* — лазерная сварка

зависят от количественного соотношения  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз в металле, их размеров и морфологии. Чем выше объемный процент  $\beta$ -фазы и чем она более дисперсная, тем устойчивее ( $\alpha + \beta$ )-сплав против коррозионного растрескивания. Трещиностойкость сплава возрастает также, если  $\alpha$ -фаза имеет пластинчатое строение [13, 15, 16].

Таким образом, данные, приведенные в табл. 7, свидетельствуют о достаточно высокой трещиностойкости сплава Ti-6Al-4V. Причем, если результаты испытаний основного металла в состоянии поставки имели значительный разброс, то после отжига ( $t = 750^\circ\text{C}$ , 1 ч) все образцы выдержали испытания в течение 45 сут без возникновения трещин. Аналогичные стойкость против коррозионного растрескивания под напряжением и ее зависимость от отжига после сварки показали также соединения, выполненные дуговой сваркой по слою флюса. По-видимому, положительное влияние отжига в обоих случаях связано со снятием остаточных напряжений после прокатки (в основном металле) и после сварки (в сварных соединениях), поскольку существенного изменения микроструктуры металла отжиг не вызвал, в частности не изменились форма и

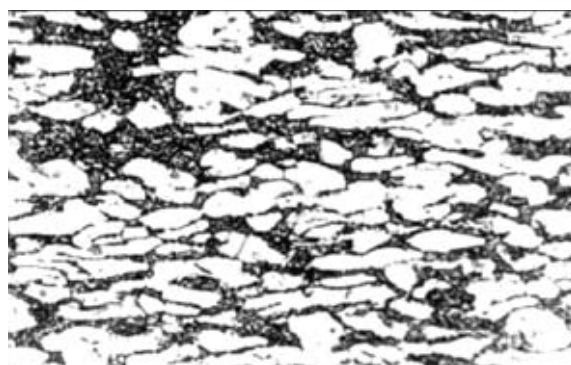


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 400$ , уменьш.  $4/5$ ) основного металла толщина  $\alpha$ -пластин (см. рис. 2, б, в). В то же время отжиг мало повлиял на сопротивляемость коррозионному растрескиванию сварных соединений, полученных электронно-лучевым и лазерным способами. Это позволяет предположить, что их низкая коррозионная стойкость под напряжением связана главным образом с особенностями микроструктуры металла шва и ЗТВ, обусловленными жесткими термическими циклами. Так, для внутризеренного строения металла швов, выполненных лазерной и электронно-лучевой сваркой, характерным является игольчатая морфология продуктов распада, возникающая при высоких скоростях охлаждения из  $\beta$ -области (см. рис. 2). Толщина игл  $\alpha$ -фазы в них в несколько раз меньше, чем толщина  $\alpha$ -выделений в металле швов, выполненных дуговой сваркой, значительно меньше и размер первичных  $\beta$ -зерен. Игольчатое строение  $\alpha$ -фазы сохранилось и после отжига, хотя в самих иглах и в матрице появились некоторые изменения, связанные с их распадом. Отличительной чертой микроструктуры металла околошовных участков ЗТВ в соединениях, выполненных лазерной сваркой, является отсутствие роста зерна (рис. 3, в). Очертания глобулярных зерен  $\alpha$ -фазы, характерных для основного металла (рис. 4), обнаружены в отдельных местах, вплоть до зоны сплавления. Выделение игл мартенситной  $\alpha$ -фазы происходит в пределах  $\alpha$ -глобулей. Только единичные перекристаллизованные зерна в металле ЗТВ проявили способность к росту. В общем же следует отметить, что методами оптической металлографии, кроме расхождения в размерах элементов структуры, не удалось выявить принципиальных различий микроструктуры соединений, выполненных электронно-лучевой и лазерной сваркой, которые могли бы быть ответственны за низкую сопротивляемость этих соединений коррозионному растрескиванию.

Помимо морфологии и дисперсности элементов структуры, на характер разрушения ( $\alpha + \beta$ )-сплавов титана значительное влияние может оказывать дислокационное строение [17, 18].

## Выводы

1. Механические свойства сварных соединений сплава Ti-6Al-4V, выполненных дуговым способом вольфрамовым электродом по слою флюса, а также электронно-лучевой и лазерной сваркой, находятся на одном уровне и близки к соответствующим показателям основного металла.



2. Независимо от способа сварки металл соединения и основной металл отличаются высокой сопротивляемостью сплошной коррозии в морской воде. Скорости коррозии металла шва, ЗТВ и основного металла одного порядка и близки по абсолютным значениям.

3. Минимальной стойкостью (на два порядка меньше основного металла) против коррозионного растрескивания под напряжением как в состоянии после сварки, так и после отжига характеризуются сварные соединения, выполненные лазерной сваркой. Дуговая сварка вольфрамовым электродом по слою флюса обеспечивает трещиностойкость сварных соединений, равную этому показателю основного металла. Сварные соединения, выполненные электронно-лучевой сваркой, занимают промежуточное положение.

4. Для выяснения причин склонности лазерных сварных соединений к коррозионному растрескиванию под напряжением необходимы детальное исследование особенностей микроструктуры металла, сформировавшейся в условиях термических циклов, характерных для этого способа сварки.

1. Schutte M. European laser market — place'94 // Blech Rohre Profile. — 1995. — №2. — P. 115-116.
2. Irving B. What's the latest news on laser beam welding and cutting? // Welding J. — 1994. — № 26. — P. 34-35.
3. Cam G., Dos Santos I. F., Kocak M. Laser and electron beam welding of Ti-alloys: Literature review // GKSS/Rept. — 1997. — № 35. — P. 1-26.
4. Зайффарт П. Рівень та тенденції розвитку в галузі лазерних джерел обробки // Міжнарод. наук.-техн. конф. «Зварювання в енергетиці» (2-3 жовт. 1996 р., Київ): Тез. доп. — Київ, 1996. — С. 25-26.
5. Leuschen B., Spies B. Stand und Entwicklungstendenzen des Laserstrahlschweißens und schneidens im Automobilbau

Mechanical and corrosion properties of the arc, electron beam and laser welded joints are compared, allowing for peculiarities of thermal cycles of laser welding. Investigations were conducted on a titanium alloy of the Ti-6Al-4V grade. Susceptibility of the laser weld metal to stress corrosion cracking in an aggressive environment was found to be by an order of magnitude higher than that of the arc weld metal. Annealing of the welded joints does not decrease their sensitivity to cracking.

- // 4. Aachener Schweisstechn. Kolloq. «Schweisstechn. 1994: Fortschr., Erfahrungen, Tend.» (Aachen, 10 Juni, 1994). — Aachen, 1994. — S. 155-168.
6. Лазерная обработка материалов / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев и др. — М.: Машиностроение, 1975. — 296 с.
7. Лазерная и электроннолучевая обработка материалов. Справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев и др. — М.: Машиностроение, 1985. — 495 с.
8. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н. Лазерная сварка металлов. — М.: Высш. шк., 1988. — 207 с.
9. Paton V. E., Zamkov V. N., Priloutsky V. P. Le soudage A-TIG du titane et de ses alliages // Soudage et techniques connexes. — 1998. — № 11/12. — P. 23-26.
10. Ивасиши О. М., Ошкадеров С. П. Влияние скорости нагрева под закалку на структуру сплавов ВТ23 и ВТ6 // Металловед. и терм. обраб. металлов. — 1982. — № 7. — С. 14-16.
11. Шелепков Г. М., Блащук В. Е., Мелехов Р. К. Изготовление и эксплуатация оборудования из титана. — Киев: Техніка, 1984. — 120 с.
12. Изучение механизма микроразрушений сплава Ti-6Al-4V с игольчатой структурой методом акустической эмиссии / С. Масино, Т. Нория, Х. Судзуки, Т. Киси // J. Jap. Inst. Metals. — 1991. — № 7. — С. 756-764.
13. Цейкер У. Титан и его сплавы. — М.: Металлургия, 1979. — 512 с.
14. Титан и его сплавы / Л. С. Мороз, Б. Б. Чечулин, И. В. Полин и др. — Л.: Судпромгиз, 1960. — Т.1. — 515 с.
15. Чечулин Б.Б., Хесин Ю. Д. Циклическая и коррозионная прочность титановых сплавов. — М.: Металлургия, 1987. — 206 с.
16. Федотов А. С. Закономерности разрушения двухфазных титановых сплавов с различной микроструктурой // Металловед. и терм. обраб. металлов. — 1984. — № 5. — С. 55-57.
17. Влияние структуры на трещиностойкость сплава ВТ3-1 / В. С. Томсинский, М. И. Шишкина, А. К. Безрукова и др. // Там же. — 1981. — № 12. — С. 33-34.
18. Анисимова Л. И., Попов А. А. Связь характера разрушения с микроструктурой и свойствами (α+β)-титановых сплавов // Там же. — 1985. — № 12. — С. 45-48.

Поступила в редакцию 03.07.2000